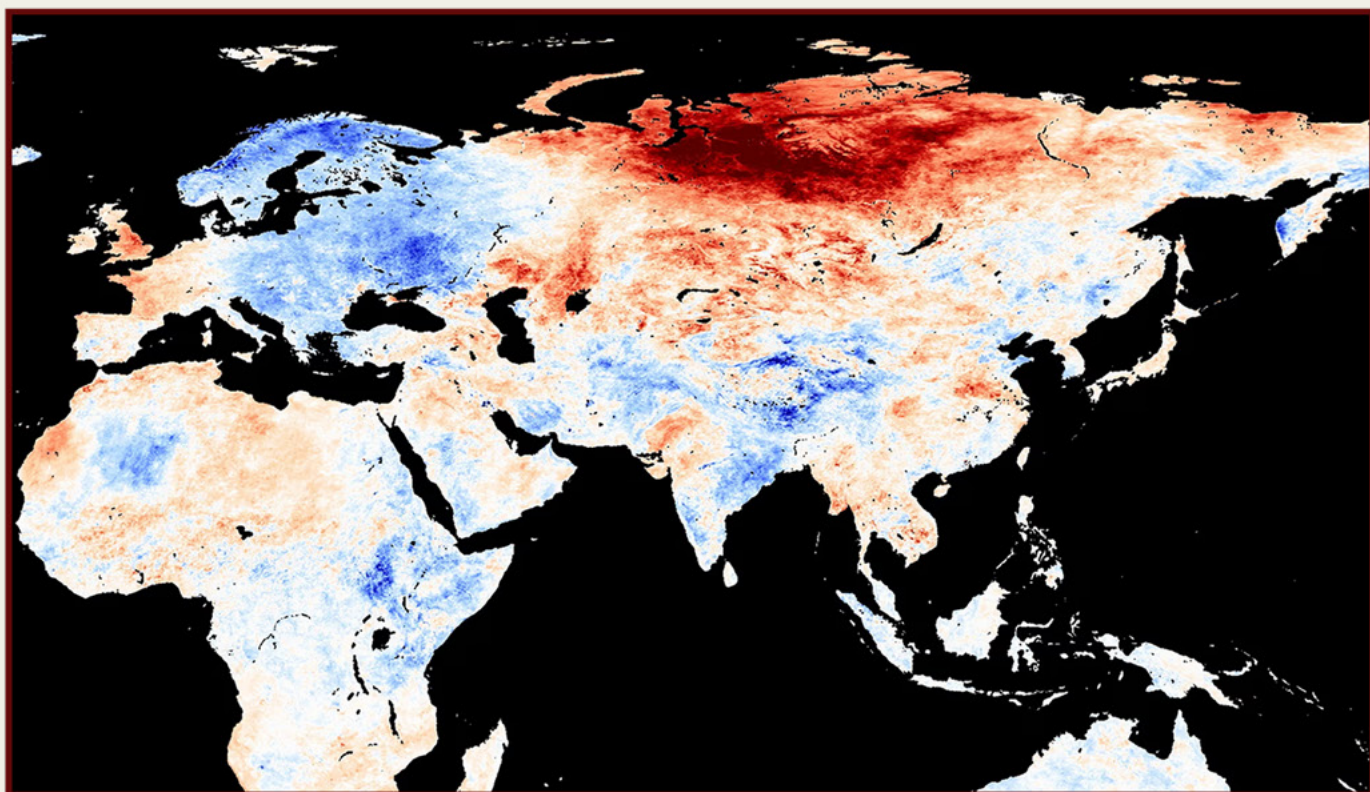


O HROZBE PRERAZENIA

MAGMATICKEHO CHOCHOLA NA SIBÍRI

A STRATÉGIÁCH RIEŠENIA TOHTO PROBLÉMU



O HROZBE PRERAZENIA

MAGMATICKÉHO CHOCHOLA NA SIBÍRI

A STRATÉGIÁCH RIEŠENIA TOHTO PROBLÉMU

OBSAH

Stručný popis geodynamického modelu zmeny klímy na Zemi v súčasnom období	4
Posun jadra smerom k Sibíri v roku 1998	16
Sibír a sibírska Arktída sa otepľujú 3 až 4-krát rýchlejšie ako zvyšok sveta	21
Nepriame príznaky vzostupu sibírskeho chochola	25
Topenie permafrostu	27
Prejavy bahenného vulkanizmu	29
Ohrev pôdy	31
Teplota prízemného vzduchu	32
Zvyšovanie počtu bleskov	34
Poškodzovanie ozónovej vrstvy	36
Štruktúra, pravdepodobné rozmery a lokalizácia magmatického chochola na základe publikovaných a pozorovaných údajov	38
Lokalizácia magmatického chochola	44
Rast seizmickej aktivity ako indikátor destabilizácie tektonických platní	48
Zdôvodnenie neodvratnosti prerazenia sibírskeho chochola	72
Scenár 1: Náhle prerazenie sibírskeho chochola	73
Aktivácia supervulkánov a sopečných systémov	80
Kyslé dažde	82
Sopečná zima	83
Scenár 2: Postupné prerážanie sibírskeho chochola	85
Dôsledky postupného prerážania sibírskeho chochola pre Rusko	90
Dôsledky postupného prerážania sibírskeho chochola pre celý svet	91
Dlhodobé dôsledky postupného prerážania sibírskeho chochola pre planétu	92
Scenár 3: Plánované kontrolované odplyňovanie (degazácia)	93
Existujúce metódy vulkanického geoinžinierstva	93
Príklad programu plánovaného odplyňovania sibírskeho chochola	100
Zdôvodnenie výberu miesta pre vedecko-výskumné vrtý na monitorovanie dynamiky súčasného sibírskeho magmatického chochola	102
Špecifiká vrtania a blokovanie magmatických kanálov počas plánovaného odplyňovania	105
Výber optimálneho času na vrtanie vrtov počas plánovaného odplyňovania	106
Scenáre výsledkov realizácie plánovanej degazácie sibírskeho chochola	106
Záver	109
Príloha 1	110
Zoznam použitej literatúry	112

Stručný popis geodynamického modelu zmeny klímy na Zemi v súčasnom období

Posledných 30 rokov dochádza na Zemi k bezprecedentnému a synchronizovanému nárastu klimatických zmien, anomálií a extrémnych udalostí vo všetkých vrstvách planéty a jej geofyzikálnych parametroch. Progresia týchto zmien sa exponenciálne zrýchľuje. Komplexná analýza vedeckých údajov ukazuje, že hlavnými príčinami rastu anomálií vo všetkých vrstvách Zeme sú astronomické cykly, ktoré ovplyvňujú celú Slnecnú sústavu každých 12 000 rokov.

Hypotézu vonkajšieho astronomického pôsobenia potvrdzuje pozorovanie podobných klimatických, geodynamických a magnetických anomálií na iných planétach Slnecnej sústavy a ich satelitoch, prebiehajúcich v súčasnom období synchronne so zmenami na Zemi. Napríklad na Uráne, Jupiteri a Venuši bolo zaznamenané zvýšenie rýchlosti vetra a rozmerov hurikánov. Súčasne je na Marse pozorované topenie

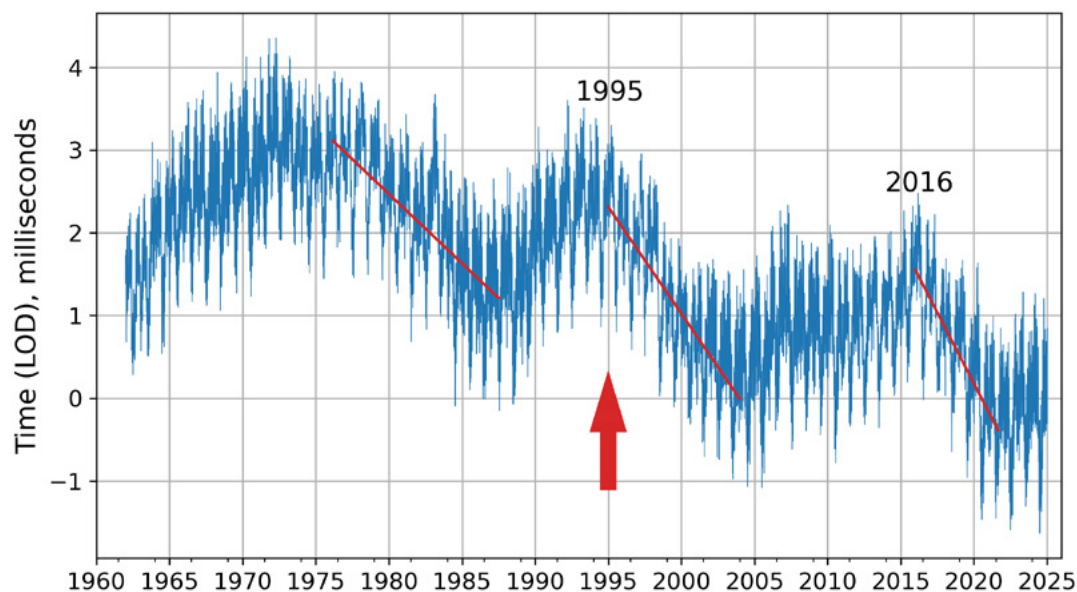
ľadových čiapok na pólach, a aj sopečná aktivita na Venuši a Marse stále rastie. Okrem toho sa na Marse zosilňuje seizmická aktivita, čo poukazuje na vznik anomálnej geodynamickej aktivity.

Kritické zmeny v systéme Zeme v dôsledku 12 000 ročnej astronomickej cyklickosti sa v súčasnom cykle začali v roku 1995, keď boli zaznamenané významné geofyzikálne anomálie vrátane prudkého zrýchlenia rotácie Zeme (obr. 1), posunu jej osí¹ (obr. 2) a začiatku prudkého driftu severného magnetického pólu² (obr. 3). Tieto javy naznačujú významné zmeny v zemskom jadre.

¹Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48(7). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

²Dyachenko, A. I. (2003). Earth's magnetic poles. MCCME.

Odchýlka v dĺžke dňa



Obr. 1

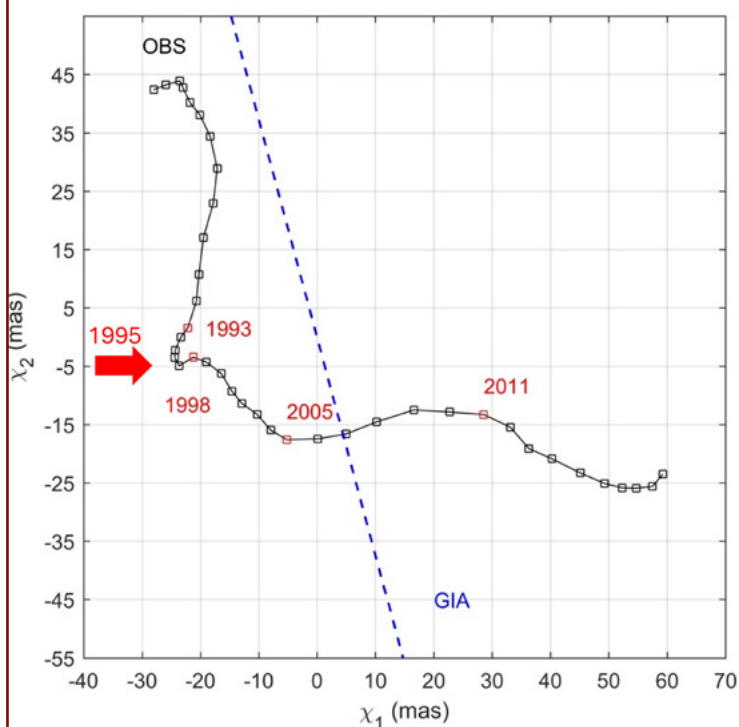
Odchýlka dĺžky dňa v milisekundách za obdobie od roku 1962 do roku 2023

Zdroj údajov: IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory.

Dĺžka dňa – parametre orientácie Zeme:

https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

Červené čiary na obrázku sú trendové línie, ktoré ukazujú, ako rýchlo sa skracujú dni. Napríklad čiara vľavo klesá pozvoľnejšie, zatiaľ čo čiara vpravo, čiara zrýchlenia od roku 2016, je už takmer vertikálna, čo znamená, že dni sa skracujú niekoľkonásobne rýchlejšie, a teda planéta sa otáča rýchlejšie.



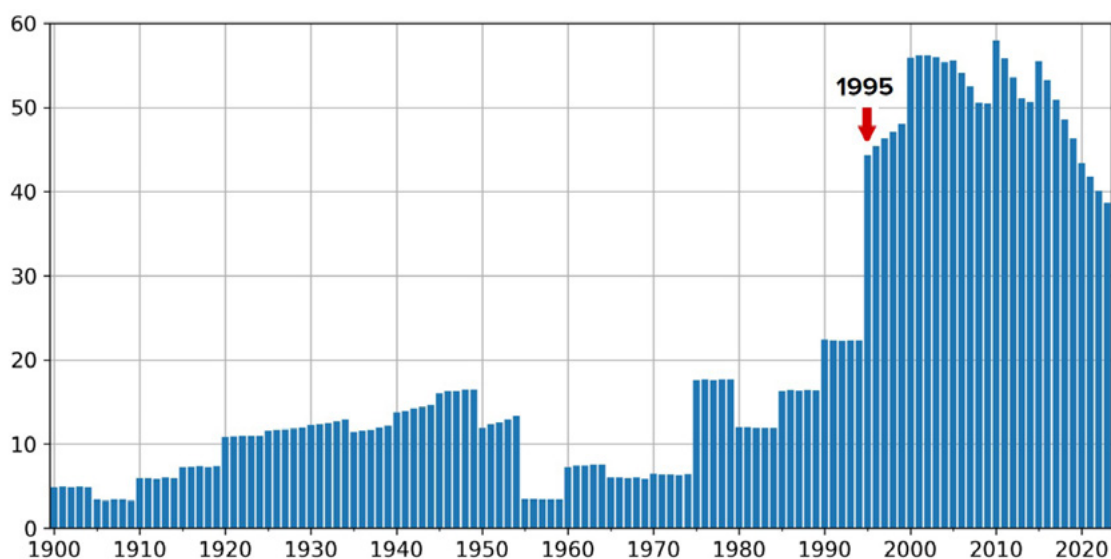
Obr. 2

Dlhodobá trajektória pozorovanej excitácie po odstránení ročných a Chandlerových cyklov pomocou metódy kĺzavého priemeru (čierna čiara so štvorcami) a smer polárneho driftu v dôsledku glaciálnej izostatickej úpravy – GIA (modrá prerušovaná čiara).

Veľkosť kĺzavého priemeru podskupiny je stanovená na 84 mesiacov, čo je najmenší spoločný násobok 12 mesiacov (ročný cyklus) a 14 mesiacov (Chandlerov cyklus), podľa štúdie Liu et al. (2017).

Zdroj: Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. Geophysical Research Letters, 48(7). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

Rýchlosť pohybu severného magnetického pólu (km/rok)



Obr. 3

Rýchlosť pohybu severného magnetického pólu (km/rok)

Zdroj: údaje o polohe magnetického severného pólu NOAA

<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy>

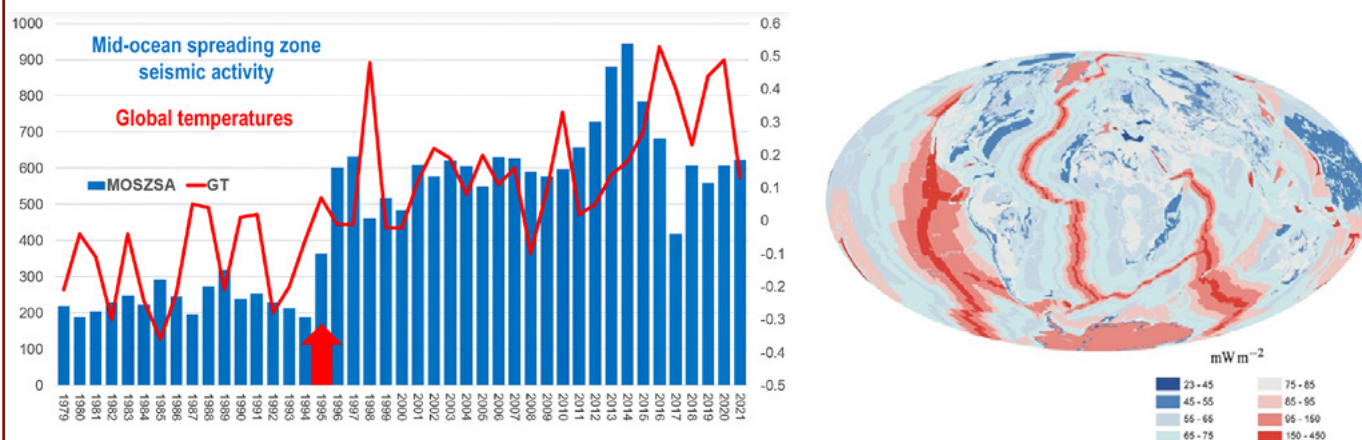
Podľa hypotézy vstupuje v tomto čase Slniečna sústava do zóny, v ktorej vonkajšie kozmické pôsobenie začalo významne vplývať na planéty, konkrétne na ich jadrá. Zmeny pozorované v zemskom jadre v roku 1995 naznačujú zvýšenie zahrievania vonkajšieho jadra, z čoho je možné vyvodiť záver, že k zemskému jadru začala prúdiť doplnková energia. Takéto hlboké zmeny v jadre Zeme si vyžadujú biliardnásobne viac energie, ako ľudstvo vyprodukovalo za celú existenciu civilizácie.

Prítok vonkajšieho pôsobenia k zemskému jadru viedol k aktivácii procesov spojených s tavením plášťa a stúpaním magmy k povrchu, čo vyvolalo reťazovú reakciu seizmickej a sopečnej aktivity, ako aj zosilnenie zahrievania z hlbín a nárast klimatických katastrof po celom svete.

Napríklad od roku 1995 je pozorovaný výrazný rast seizmickej aktivity, čo sa prejavuje zvýšením frekvencie, magnitúdy a energie zemetrasení. Tento trend je pozorovaný tak na kontinentoch ako aj na dne oceánov (obr. 4) a zahŕňa oblasti, ktoré predtým nevykazovali seizmickú aktivitu, čo poukazuje na globálny charakter zmien.

Je dôležité poznamenať, že nárast počtu zemetrasení s magnitúdou 5,0 a viac nesúvisí so zlepšením technológií seizmického monitorovania (obr. 5), ale odráža skutočné zmeny v geodynamickom systéme Zeme. Súhrnné údaje z Medzinárodného seizmologického centra (ISC) potvrdzujú, že počet zemetrasení sa za posledných 25 rokov výrazne zvýšil a naďalej rastie (obr. 6).

Nárast počtu zemetrasení na dne oceánov pozdĺž stredooceánskych chrbtov



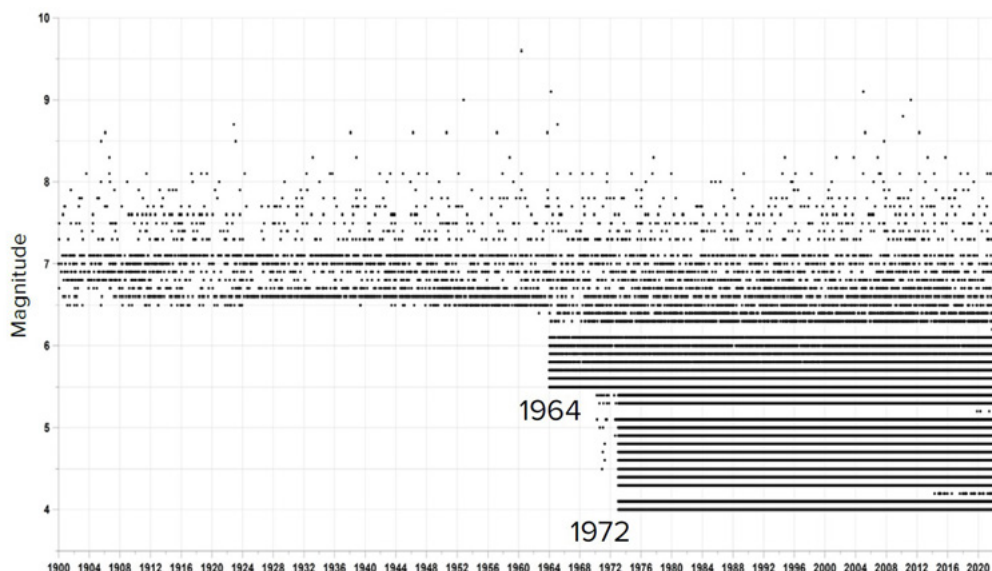
Obr. 4

Súčasný nárast počtu zemetrasení na dne oceánov a globálnych teplôt atmosféry (vľavo). Geotermálne zahrievanie stredooceánskych chrbtov (vpravo)

Zdroj: Davies & Davies, 2010; Viterito, A. (2022). 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources, 29 (5).

<https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Diagram ilustruje prudký nárast počtu zemetrasení od roku 1995 na oceánskom dne pozdĺž stredooceánskych chrbtov a úzku koreláciu seizmicity na dne oceánu s teplotami atmosféry, čo poukazuje na doplnkový hlbinný zdroj ohrevu oceánu ako aj atmosféry.

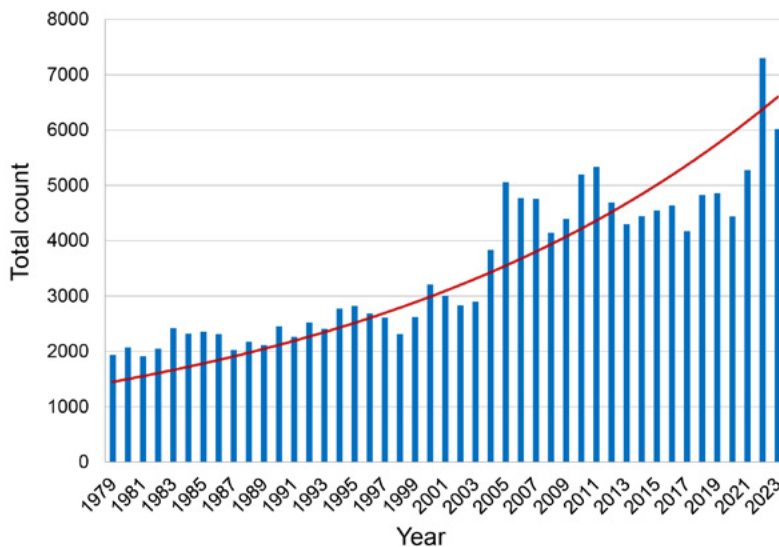


Obr. 5

Na grafe sú čiernymi bodmi znázornené zemetrasenia rôznej sily v rôznych rokoch

Do roku 1964 boli zaznamenávané len zemetrasenia s magnitúdou 6,5 a viac. Od roku 1964 (s inštaláciou citlivejších snímačov) – od 5,5 a viac. Od roku 1972 – od 4,0 a viac, bez ohľadu na ich umiestnenie.

Zemetrasenia M5+ 1979-2023, ISC



Obr. 6

Zemetrasenia s magnitúdou 5,0 a viac od roku 1979 do roku 2023 podľa databázy ISC.

Súbor údajov bol zostavený pomocou algoritmu maximálnych hodnôt magnitúdy obsiahnutých v databáze ISC pre každú z udalostí (pozri Prílohu 1).

Okrem toho je v blízkosti sopiek pozorované zvýšenie seizmickej aktivity, vrátane supervulkánov, ako sú Yellowstone v Spojených štátoch, Campi Flegrei v Taliansku, Taupo na Novom Zélande a ďalších sopiek, ktoré vybuchli v predchádzajúcich 12 000-ročných cykloch. Zvyšuje sa aj celkový počet dní so sopečnými erupciami, pričom dochádza k anomálnym erupciám, pri ktorých je vyvrhnutá láva prehriata a má netypické zloženie, charakteristické pre magmu z hlbokých vrstiev pláštá^{3,4,5,6,7}.

Osobitnú pozornosť si zasluhuje nárast počtu zemetrasení s hlbokým ohniskom, ktoré sa vyskytujú v hĺbke väčšej ako 300 km a niekedy

v hĺbke až 750 km pod povrchom Zeme. Tieto javy nevznikajú v zemskej kôre, ale v plášti, kde sa materiál pláštá zvyčajne deformuje plynulo, a netriešti sa, čo robí povahu takýchto zemetrasení nezvyčajnou.

Keďže k týmto zemetraseniam dochádza v podmienkach extrémneho tlaku a vysokých teplôt, možno usúdiť, že tieto silné výbuchy sú energeticky porovnateľné so súčasným výbuchom mnohých atómových bômb vo vnútri zemskeho pláštá. Okrem toho zemetrasenia s hlbokým ohniskom často vyvolávajú silné zemetrasenia v zemskej kôre, čo zosilňuje ich ničivé účinky^{8,9}.

³Castro, J., & Dingwell, D. (2009). Rapid ascent of rhyolitic magma at Chaitén volcano, Chile. *Nature*, 461, 780-783. <https://doi.org/10.1038/nature08458>

⁴Smirnov, S. Z., et al. (2021). High explosivity of the June 21, 2019 eruption of Raikoke volcano (Central Kuril Islands): Mineralogical and petrological constraints on the pyroclastic materials. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 418, 107346. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107346>

⁵Why the Tongan eruption will go down in the history of volcanology. (2022). *Nature*, 602, 376-378. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00394-y>

⁶Halldórsson, S. A., Marshall, E. W., Caracciolo, A., et al. (2022). Rapid shifting of a deep magmatic source at Fagradalsfjall volcano, Iceland. *Nature*, 609, 529-534. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04981-x>

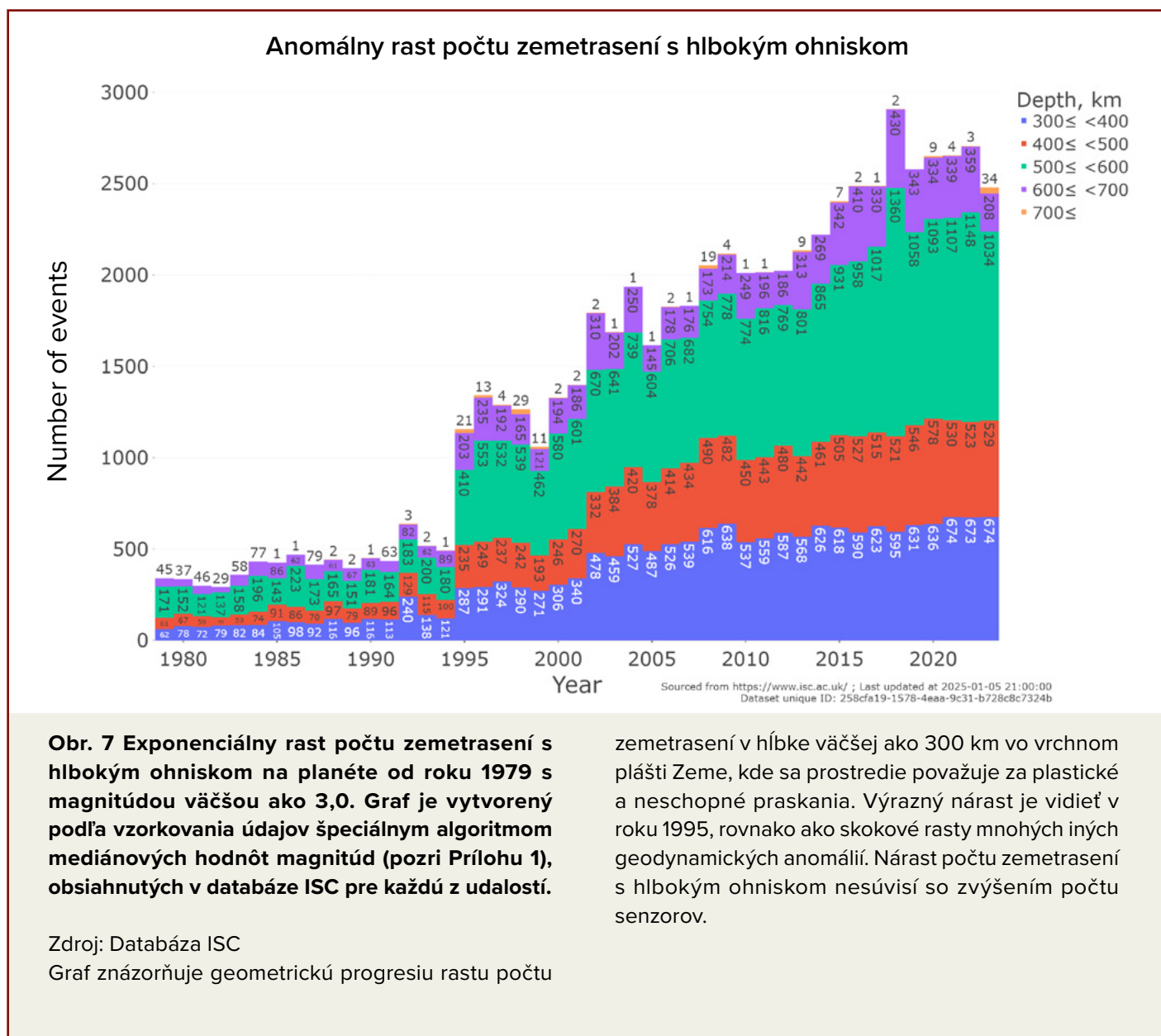
⁷D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports*, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>

⁸Mikhailova, R. S. (2014). Strong earthquakes in the mantle and their influence in the near and far zone. *Geophysical Survey RAS*. <http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mihaylova.pdf>

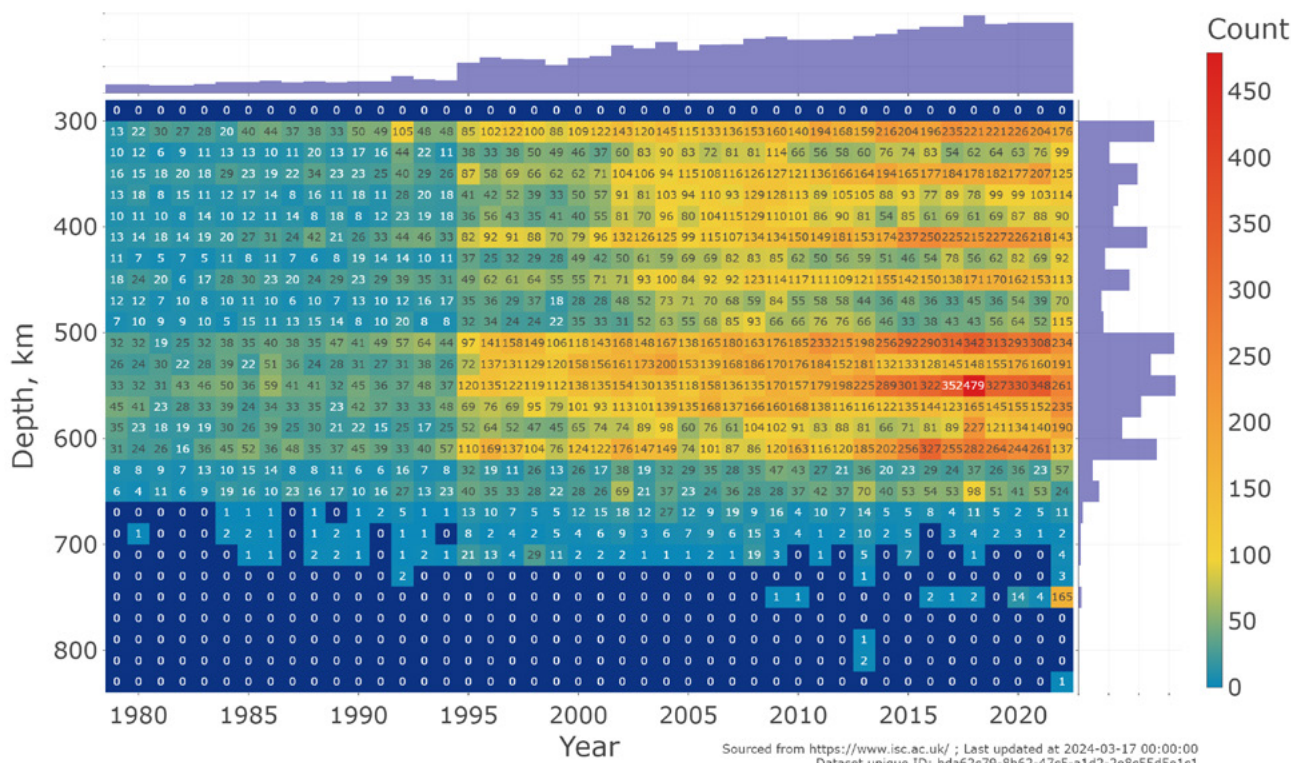
⁹Mikhailova, R. S., Ulubieva, T. R., & Petrova, N. V. (2021). The Hindu Kush earthquake of October 26, 2015 with Mw=7.5, 10~7: Previous seismicity and aftershock sequence. *Earthquakes in Northern Eurasia*, 24(2015), 324-339. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.31>

Od roku 1995 je pozorovaný prudký exponenciálny nárast počtu takýchto hlbokých zemetrasení (obr. 7, 8), čo sa zhoduje s ďalšími geodynamickými anomáliami, ktoré začali v rovnakom období. Pribúdanie týchto

vnútroplášťových explózií poukazuje na zvyšovanie energie v hĺbinách planéty a intenzívne tavenie pláštia, čo môže viesť k rozsiahlym erupciám sopiek.



Anomálny rast počtu zemetrasení s hlbokým ohniskom



Obr. 8

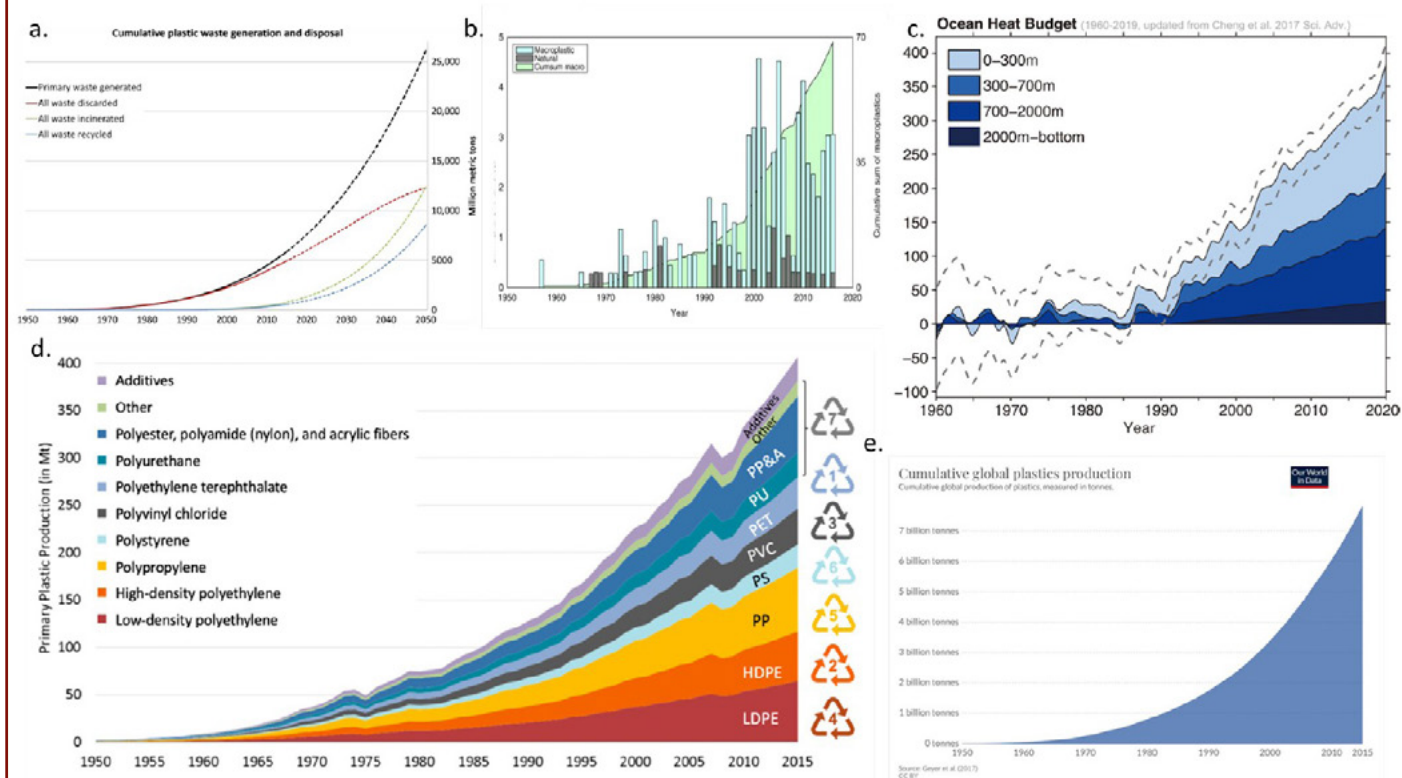
Graf počtu zemetrasení s hlbokým ohniskom podľa rokov a hĺbky s magnitúdou väčšou ako 3,0

Zdroj: Databáza ISC

Nárast počtu zemetrasení s hlbokým ohniskom poukazuje na tavenie pláštia, ktorý sa ohrieva od jadra. Vplyvom odstredivých síl začína roztavená magma v plášti prudko stúpať k povrchu Zeme, pričom eroduje a zahrieva litosféru zvnútra viac ako zvyčajne. Práve stúpanie magmy spôsobuje zvýšenie geotermálneho prúdenia z útrob, aktiváciu magmatických chocholov pod ľadovcami západnej Antarktídy a stredného Grónska, čo urýchljuje topenie ľadovcov a permafrostu zdola nahor.

Oceán sa v súčasnosti otepľuje tak ako nikdy predtým, čo výrazne zosilňuje extrémne prírodné javy – záplavy, hurikány a tropické cyklóny. Oceán

zohráva kľúčovú úlohu pri regulácii tepla na planéte, pretože je schopný absorbovať a prerozdeľovať prebytočné teplo, čím predchádza katastrofálnym následkom. Avšak teraz, keď sa zvyšuje zahrievanie Zeme v dôsledku geodynamickéj aktivity spôsobenej astronomickými cyklami, oceán stratil svoju funkciu odvádzať teplo z útrob. Dôvodom je antropogénne znečistenie oceánu. Plastový odpad sa rozpadá na mikroplasty a nanoplasty, čím sa znižuje tepelná vodivosť vody (obr. 9).



Obr. 9

Graf zmeny teploty oceánov v rokoch 1960 – 2019 a jeho porovnanie s grafmi rastu produkcie syntetických polymérov, ich využitia v rôznych odvetviach hospodárstva a likvidácie plastového odpadu v oceáne (z rôznych zdrojov)

a) Celkové množstvo vyprodukovaného a zneškodneného plastového odpadu

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7).

<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

b) Celkové množstvo makroplastov v oceáne a ročné ukazovatele

Ostle, C., Thompson, R. C., Broughton, D., Gregory, L., Wootton, M., & Johns, D. G. (2019). The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nature Communications*, 10(1622).

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

c) Zmena teploty svetového oceánu v rokoch 1960-2019 (Purkey and Johnson, 2010; updated from Cheng et al., 2017)

Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 137–142.

<https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

d) Celosvetová výroba primárneho plastu podľa typu

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7).

<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

e) Celkové množstvo vyrobených plastov od roku 1950

Zdroj údajov: Plastic Marine Pollution Global Dataset

K zvyšovaniu teploty vody dochádza nielen na povrchu, ale aj v celom vodnom stĺpci, a tiež na dne oceánu. Príčinou zahrievania oceánu je stúpajúca magma, ktorá obzvlášť silno zahrieva oceánsku kôru. Tá je v porovnaní s kontinentálnou tenšia a zraniteľnejšia.

Historické údaje z geologických štúdií a výskumov ľadových jadier svedčia o tom, že Zem zažívala podobné katastrofické cykly každých 12 000 rokov¹⁰. A každých 24 000 rokov boli planetárne katastrofy niekoľkonásobne silnejšie, čo dokazujú štúdie vrstiev popola zo sopečných erupcií v ľadových jadrách¹¹ (obr. 10) a ďalšie geochronologické štúdie. Presne do takéhoto cyklu teraz Zem vstupuje. Súčasný cyklus však zintenzívňuje antropogénny faktor, akým je znečistenie oceánov, čo ešte viac narušilo funkciu oceánu regulovať energetickú rovnováhu Zeme.

Ako sa oceán otepľuje, plastový odpad sa rozkladá na mikro- a nanoplasty, čím sa ešte viac znižuje tepelná vodivosť oceánu. Táto strata tepelnej vodivosti je kritická v obdobiach zvýšenej geodynamickej aktivity spôsobenej astronomickými cyklami. Nahromadenie prebytočnej energie v útrobach Zeme viedlo

k zvýšeniu počtu zemetrasení s hlbokým ohniskom a rýchlej tvorbe nových magmatických komôr, čo ešte viac prehľbuje nestabilitu planéty. Tento uzavretý kolobeh urýchľuje zahrievanie a destabilizáciu planéty a približuje Zem k neodvratnej záhube.

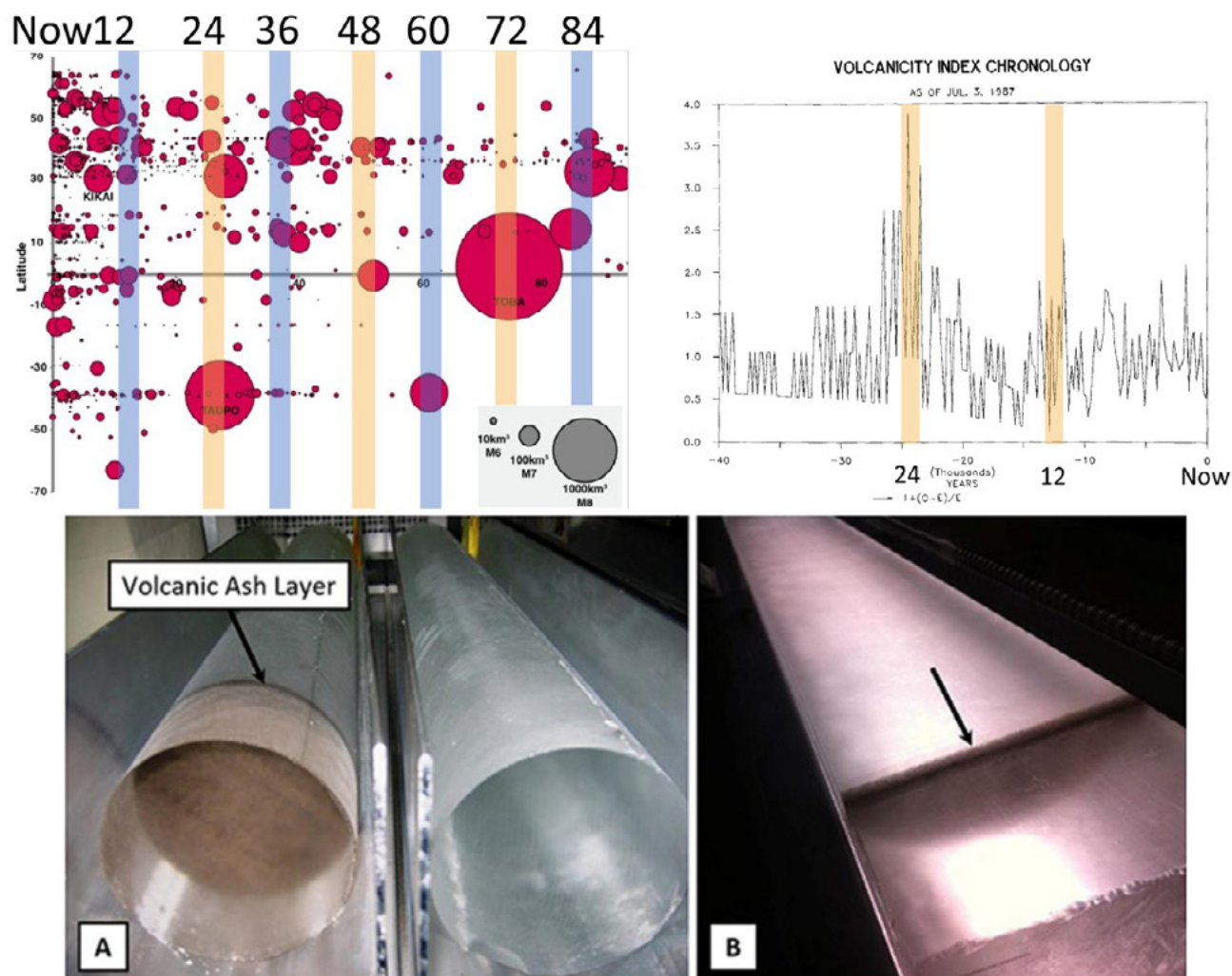
Matematické modelovanie ukazuje, že svetové ekonomické a sociálne systémy sa môžu v priebehu nasledujúcich 4 – 6 rokov zrušiť v dôsledku narastajúcich škôd spôsobených klimatickými katastrofami. Exponenciálny rast počtu katastrofických udalostí hrozí tým, že sa Zem v nasledujúcom desaťročí stane nevhodnou pre život (obr. 11).

Na rozdiel od predchádzajúcich cyklov sa súčasný stav planéty zhoršuje znečistením spôsobeným činnosťou človeka, čo neponecháva veľkú nádej na prežitie ekosystémov a samotnej planéty Zem. **Je dôležité pochopiť, že vyriešenie problému znečistenia a otepľovania oceánu môže spomaliť rozvoj katakliziem, ale nezastaví ich.**

¹⁰Arushanov, M. L. (2023). Climate dynamics: Space factors. LAMBERT Academic Publishing.

¹¹Sawyer, D. E., Urgeles, R., & Lo Iacono, C. (2023). 50,000 yr of recurrent volcanoclastic megabed deposition in the Marsili Basin, Tyrrhenian Sea. *Geology*, 51(11), 1001-1006. <https://doi.org/10.1130/G51198.1>

Katastrofické sopečné erupcie s cyklom 12 000 rokov



Obr. 10

Údaje z výskumov vrstiev popola zo sopečných erupcií za posledných 100 000 rokov v antarktických a arktických ľadových jadrách z prác rôznych autorov

Zdroje: Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3(5).

<https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>

Bryson, R. A. (1989). Late quaternary volcanic

modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125.

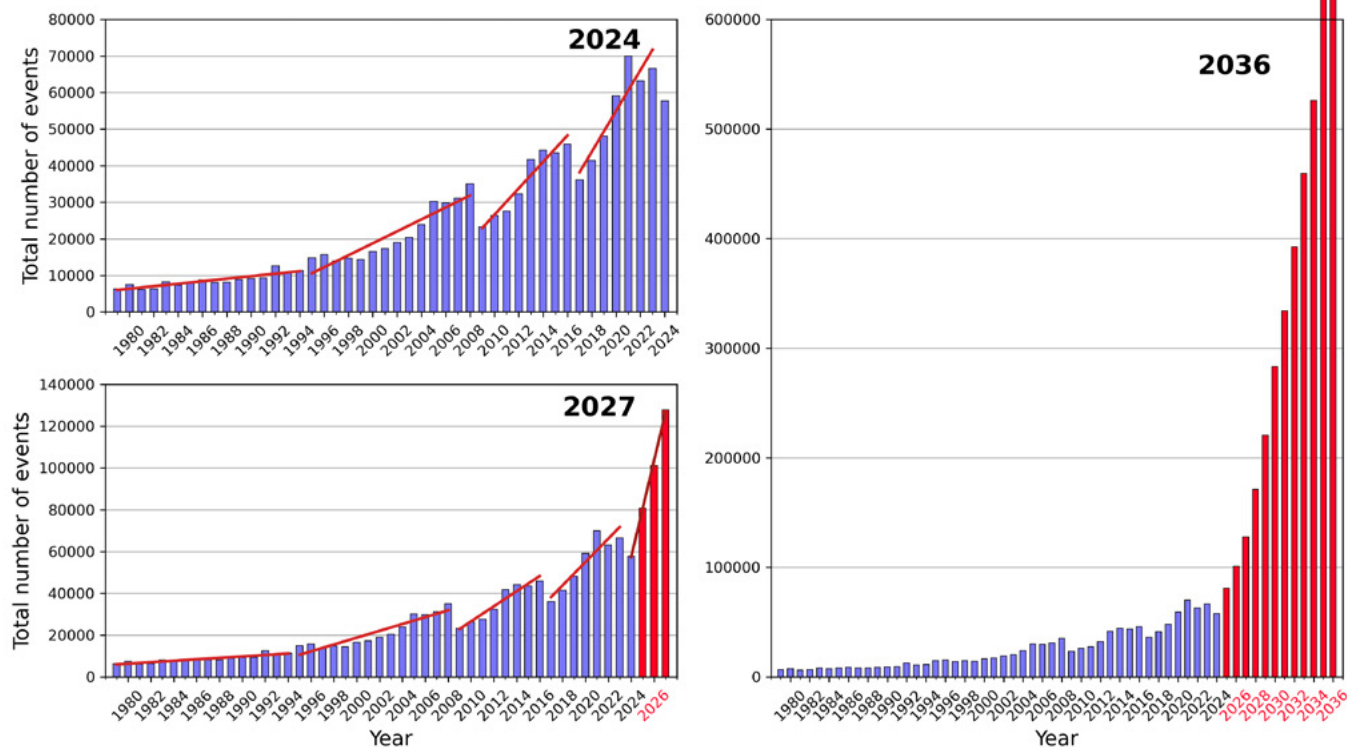
<https://doi.org/10.1007/bf00868307>

Grafy znázorňujú katastrofickú sopečnú aktivitu každých 12 000 rokov a ešte intenzívnejšiu každých 24 000 rokov (s prihliadnutím na nepresnosti pri určovaní veku). Takéto katastrofické udalosti viedli k prudkým teplotným výkyvom, živelným pohromám, sopečným zimám a k masovému vymieraniu druhov. Mnohé supervulkány, ktoré vybuchli v minulých cykloch, začali v súčasnosti vykazovať anomálnu aktivitu, obzvlášť od roku 1995.

Progresia nárastu katakliziem na príklade zemetrasení

M3+ Earthquakes Globally 1979-2024

volcanodiscovery.com



Obr. 11

Model exponenciálneho rastu počtu prírodných katakliziem na príklade zemetrasení do roku 2036

Grafy znázorňujú geometrickú progresiu rastu počtu a sily zemetrasení na planéte s prihliadnutím na aktuálny trend. V každej ďalšej etape sa počet zemetrasení zvyšuje 3-násobne. Už k roku 2028 bude na Zemi denne dochádzať k 1 000 zemetraseniam

s magnítudou väčšou ako 3,0. V súčasnosti denne dochádza k 125 zemetraseniam s magnítudou väčšou ako 3,0. S vysokou pravdepodobnosťou sa už o 6 rokov budú na Zemi každý deň vyskytovať zemetrasenia, ktoré budú svojou deštruktívnosťou ekvivalentné zemetraseniu v Turecku a Sýrii zo 6. februára 2023.

Táto správa sa zameriava na ďalšiu hrozbu, vyvolanú zmenami v jadre v dôsledku prítoku doplnkovej energie k nemu. V rokoch 1997 – 1998 vedci pomocou satelitných údajov z výskumov ťažiska Zeme zaznamenali bezprecedentný jav – skok vnútorného jadra Zeme. V dôsledku tejto udalosti sa jadro planéty posunulo na sever, v smere od západnej Antarktídy k východnej Sibíri a Tajmýrskemu polostrovu v Ruskej federácii. V dôsledku tohto posunu jadra došlo v tomto smere k nekontrolovanému vzostupu magmy, vďaka čomu začal pod Sibírou rýchlo stúpať obrovský magmatický chochol.

V súčasnosti už sibírsky chochol dosiahol spodnú časť zemskej kôry v severnej oblasti východosibírskeho kratónu a začal nadvíhovať platňu – čo znamená, že žeravá magma si už začala prepaľovať cestu na povrch. Nekontrolované prerazenie sibírskeho chochola

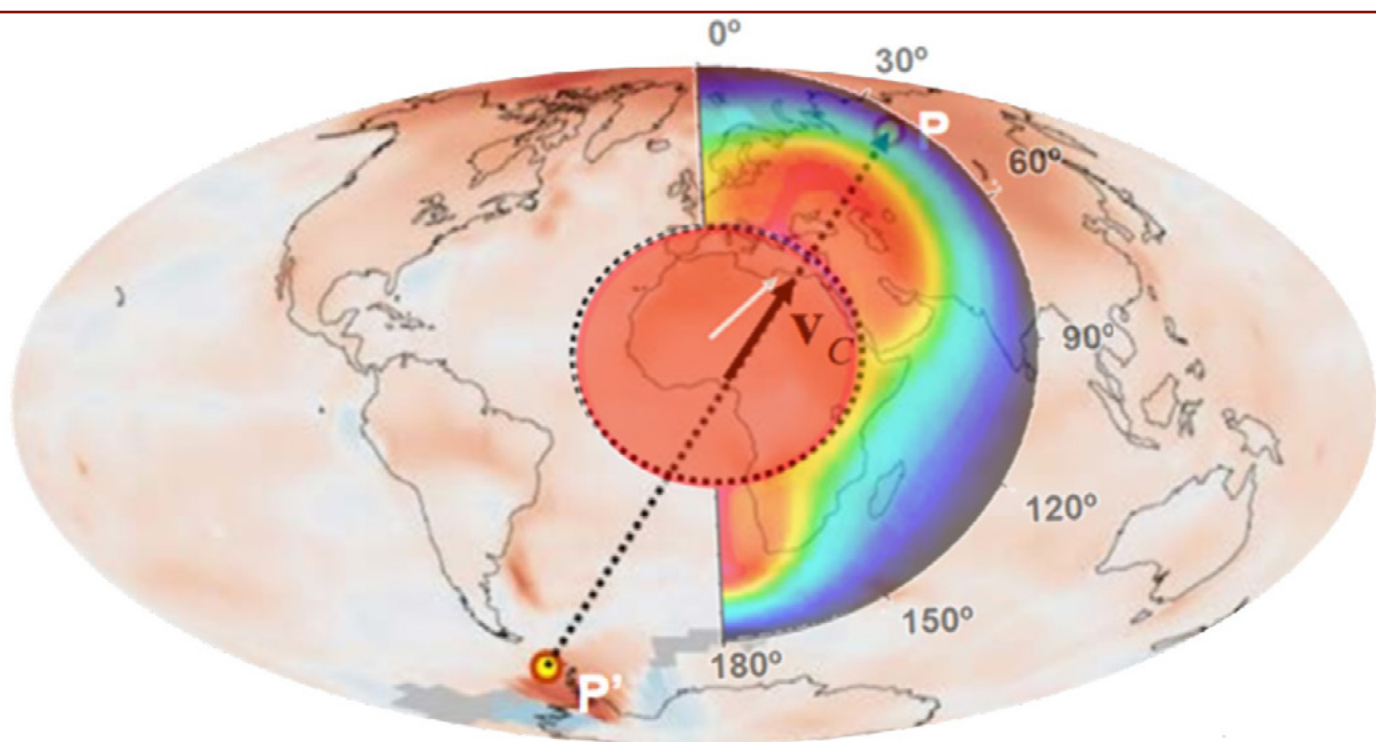
môže spôsobiť globálne vymieranie, čím by ľudstvo stratilo akúkoľvek šancu na prežitie, keďže podľa výpočtov bude takáto erupcia 1000-krát silnejšia ako najsilnejšia erupcia supervulkánu Yellowstone. Podobné erupcie magmatického chochola na Sibíri sa už vyskytli pred 250 miliónmi rokov a viedli k veľkému permskému vymieraniu. Existujú tri varianty ďalšieho vývoja udalostí, ktoré sú popísané v tejto správe.

Sú tu navrhnuté aj kroky na riešenie problému vzostupu sibírskeho chochola a minimalizáciu rizík jeho nekontrolovaného prerazenia.

Posun jadra smerom k Sibíri v roku 1998

V rokoch 1997 – 1998 vedci pomocou satelitných údajov z výskumov ťažiska Zeme zaznamenali bezprecedentný jav – skok vnútorného jadra Zemee^{12,13}. V dôsledku tejto

udalosti sa jadro planéty posunulo na sever, v smere od západnej Antarktídy k Tajmýrskemu polostrovu na severe východnej Sibíri (obr. 12).



Obr. 12

Skok jadra v rokoch 1997 – 1998 a tepelné vlny v magme spôsobené posunutím jadra. J. V. Barkin

Mapa znázorňuje vektor posunutia vnútorného jadra v smere od západnej Antarktídy k východnej Sibíri, k Tajmýrskemu polostrovu. Diagram je zakreslený na mape tepelných anomálií atmosféry.

Zdroj: Геофизические следствия относительных смещений и колебаний ядра и мантии Земли. Презентация Ю. В. Баркина, Москва, ИФЗ, ОМТС. 16. сентября 2014.

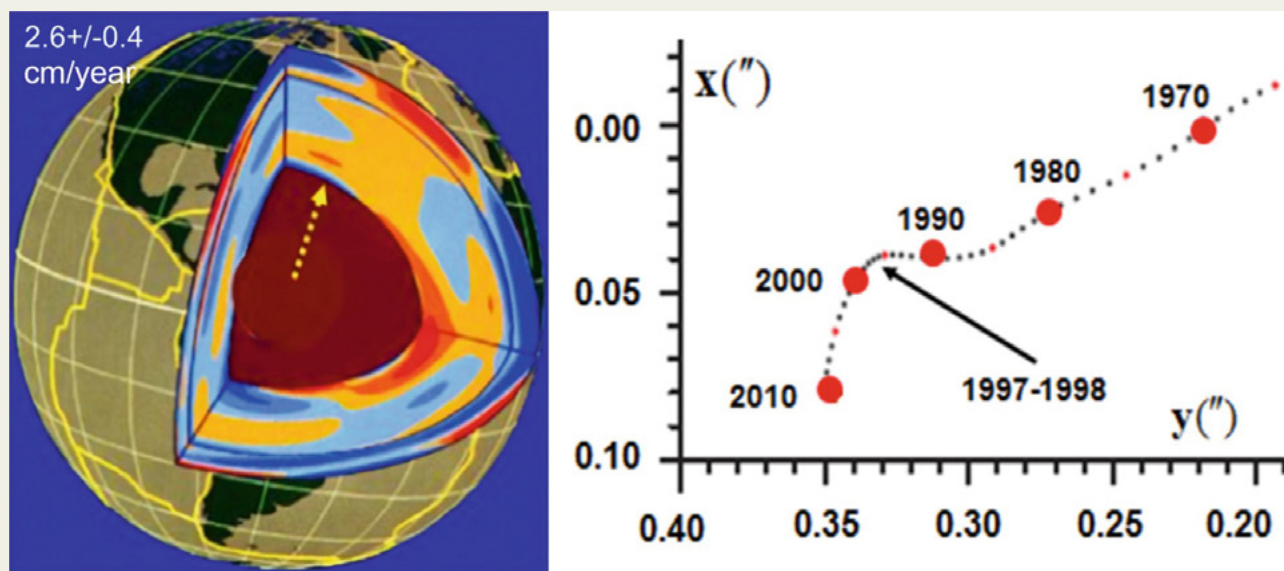
¹² Barkin, Yu. V. (2011). Synchronous jumps in activity of natural planetary processes in 1997-1998 and their unified mechanism. In Geology of Seas and Oceans: Proceedings of the XIX International Scientific Conference on Marine Geology (Vol. 5, pp. 28-32). GEOS.

¹³ Smolkov, G. Ya. (2018). Exposure of the solar system and the earth to external influences. Physics & Astronomy International Journal, 2(4), 310-321. <https://doi.org/10.15406/paij.2018.02.00104>

V rovnakom čase štyri rôzne vedecké tímy nezávisle od seba zaznamenali anomálne zmeny rôznych geofyzikálnych parametrov Zeme. Na základe satelitných údajov tím autorov z Lomonosovovej Moskovskej štátnej univerzity a Ústavu fyziky Zeme Ruskej akadémie vied zistil v roku 1998 posun ťažiska Zeme¹⁴ (obr. 13).

V tom istom období zaznamenala Medzinárodná služba rotácie Zeme (IERS) prudké zrýchlenie rotácie planéty. Zároveň na stanici Medicina v Taliansku vedci zaznamenali skok gravitácie¹⁵. A takisto bola pozorovaná prudká zmena tvaru Zeme¹⁶, zaznamenaná pomocou laserového zameriavacieho systému z amerických satelitov.

Podľa doktora fyzikálnych a matematických vied, profesora J. V. Barkina, doktora technických vied, profesora G. J. Smolkova¹⁷, doktora geografických vied, profesora M. L. Arušanova¹⁸, akademika Ruskej akadémie vied, zaslúžilého profesora Lomonosovovej Moskovskej štátnej univerzity, doktora geologických a mineralogických vied V. J. Chaina¹⁹ a mnohých iných vedcov, skok jadra zapríčinil zmeny vo všetkých vrstvách Zeme.



Obr. 13

Vnútna stavba Zeme, smer dlhodobého driftu ťažiska Zeme a trajektória jeho pólu na zemskom povrchu v rokoch 1990 – 2010, s obratom približne o 90° v rokoch 1997 – 1998 v smere k Tajmýrskemu polostrovu

Zdroj: Г. Я. Смольков // Гелиогеофизические исследования. Выпуск 25, 14-29, 2020.

<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569> (dátum prístupu: 01.02.2024)

Zdroj grafu: J. V. Barkin, R. K. Klige, 2012.

¹⁴ Zotov, L. V., Barkin, Yu. V., & Lyubushin, A. A. (2009). Geocenter motion and its geodynamics. In Proceedings of the Conference "Space Geodynamics and Modeling of Global Geodynamic Processes" (pp. 98-101). Siberian Branch of RAS.

¹⁵ Romagnoli, C., Zerbini, S., Lago, L., Richter, B., Simon, D., Domenichini, F., Elmi, C., & Ghirotti, M. (2003). Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations. Journal of Geodynamics, 35(4-5), 521-539. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00012-7)

¹⁶ Cox, C., & Chao, B. F. (2002). Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998. Science, 297(5582), 831-833. <https://doi.org/10.1126/science.1072188>

¹⁷ Barkin, Yu. V., & Smolkov, G. Ya. (2013). Abrupt changes in trends of geodynamic and geophysical phenomena in 1997-1998. In Proceedings of the All-Russian Conference on Solar-Terrestrial Physics (pp. 16-21). Irkutsk.

¹⁸ Arushanov, M. L. (2023). Causes of Earth's climate change as a result of cosmic impact, dispelling the myth of anthropogenic global warming. Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft, 53, 4-14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979>

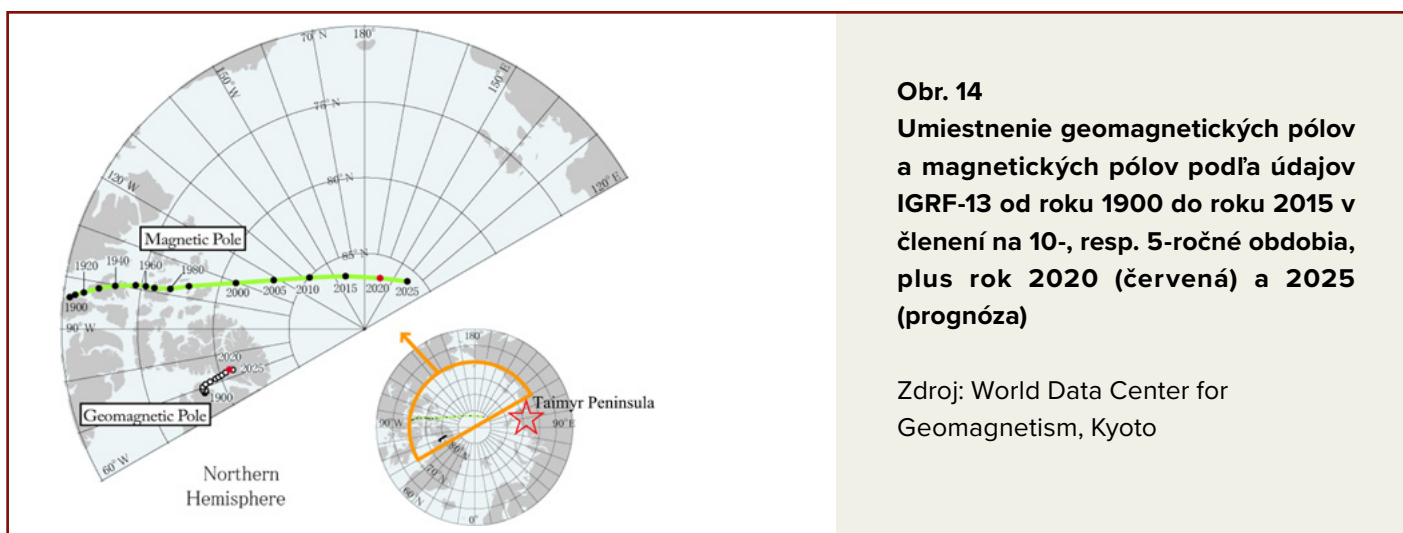
¹⁹ International Committee GCGE GEOCHANGE. (2010). Global environmental changes: Threat to civilization development (Vol. 1). London: GCGE. ISSN 2218-5798

Dôležité je poznamenať, že práve týmto smerom sa v roku 1995 začal prudký drift severného magnetického pólu. Od začiatku minulého storočia sa pohyboval priemernou rýchlosťou 10 km/rok, a potom sa rýchlosť náhle zvýšila až na maximum 57 km/rok, a po zmene svojej trajektórie zamieril k Sibíri a Tajmýrskemu polostrovu²⁰ (obr. 3, 14).

To naznačuje, že podmienky na posun jadra v smere k Tajmýrskemu polostrovu sa začali vytvárať už v roku 1995 v dôsledku toho, že vonkajšie tekuté jadro Zeme sa stalo redším. V roku 2013 vedci z University of Leeds zistili, že k týmto zmenám v magnetickom poli začalo dochádzať v dôsledku zrýchlenia prúdenia tekutého železa vo vonkajšom jadre Zeme²¹ (obr. 15), ktoré sa začalo pravdepodobne v roku 1995.

Na základe publikovaných údajov bola objavená korelácia medzi frekvenciou inverzií

magnetického poľa a intenzitou plášťového magmatizmu^{22,23,24}. Je pritom známe, že inverzie magnetického poľa sú pravdepodobne spojené s procesmi prebiehajúcimi vo vonkajšom jadre blízko hranice medzi jadrom a plášťom²⁵. Korelácia medzi zmenou intenzity plášťového magmatizmu a frekvenciou inverzií magnetického poľa Zeme naznačuje, že poruchy magnetického poľa Zeme vznikajú vo vonkajšom jadre v dôsledku zmien intenzity prestupu tepla na bázach chocholov, nachádzajúcich sa na rozhraní jadra a plášťa. K zvýšeniu celkového tepelného výkonu chocholov dochádza v dôsledku vzniku nových chocholov, ako aj v dôsledku zvýšenia tepelného výkonu už aktívnych chocholov. Dá sa predpokladať, že geodynamické poruchy vo vonkajšom jadre a plášti nastávajú v obdobiach vzniku chochola a jeho výlevu na povrch²⁶.



Obr. 14
Umiestnenie geomagnetických pólov a magnetických pólov podľa údajov IGRF-13 od roku 1900 do roku 2015 v členení na 10-, resp. 5-ročné obdobia, plus rok 2020 (červená) a 2025 (prognóza)

Zdroj: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto

²⁰Dyachenko, A. I. (2003). Earth's magnetic poles. MCCME.

²¹Livemore, P. W., Hollerbach, R., & Finlay, C. C. (2017). An accelerating high-latitude jet in Earth's core. *Nature Geoscience*, 10, 62–68. <https://doi.org/10.1038/ngeo2859>

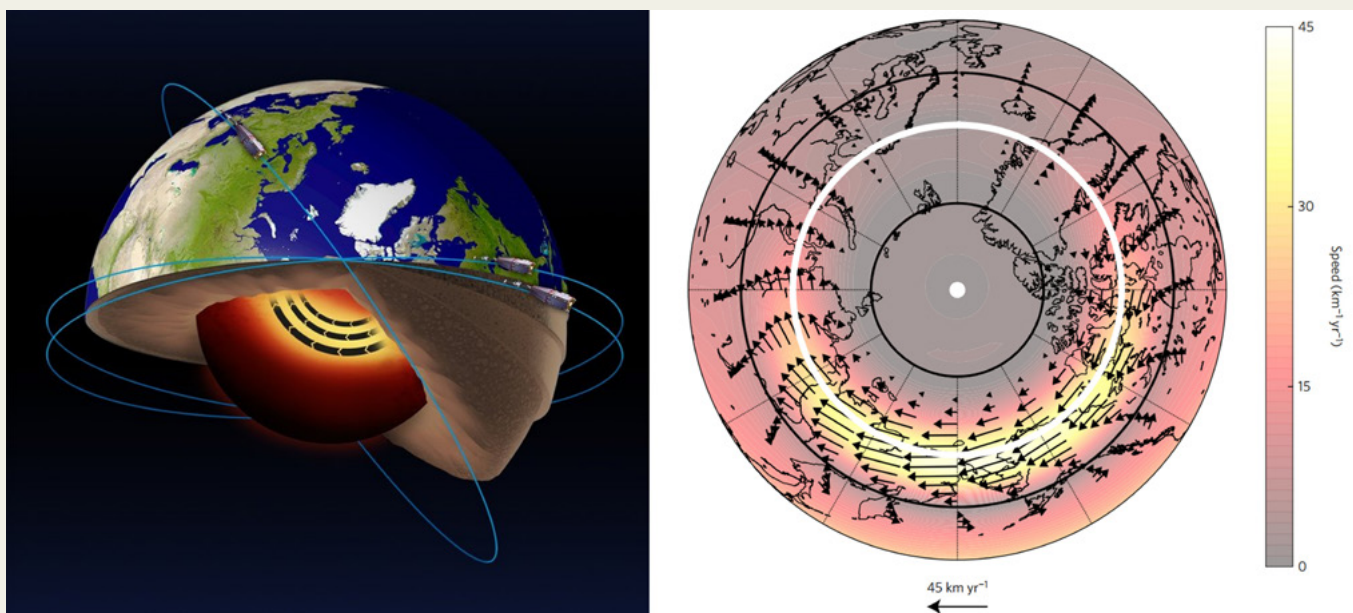
²²Alain Mazaud, Carlo Laj, The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 107, Issues 3–4, 1991, Pages 689–696, ISSN 012-821X, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90111-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T)

²³Roger L. Larson, Peter Olson, Mantle plumes control magnetic reversal frequency, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 107, Issues 3–4, 1991, Pages 437–447, ISSN 0012-821X, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90091-U](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90091-U)

²⁴Zonenshain, L.P., Kuzmin, M.I. "Deep Geodynamics of the Earth" // "Geology and Geophysics", 1993, Vol. 34 (4), pp. 3–13.

²⁵Dobretsov, N.L., Kirdyashkin, A.G., Kirdyashkin, A.A. "Deep Geodynamics". Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, GEO Branch, 2001, 408 p.

²⁶Kirdyashkin, A.A., Kirdyashkin, A.G. Interaction of a Thermochemical Plume with Mantle Free-Convective Flows and Its Influence on Mantle Melting and Recrystallization // *Geology and Geophysics*, 2013, Vol. 54, No. 5, pp. 707–721.



Obr. 15

Analýza satelitných údajov ESA Swarm odhalila prítomnosť dýzového prúdenia v tekutej železnej časti zemského jadra v hĺbke 3 000 km pod povrchom a aj to, že toto dýzové prúdenie sa zrýchľuje

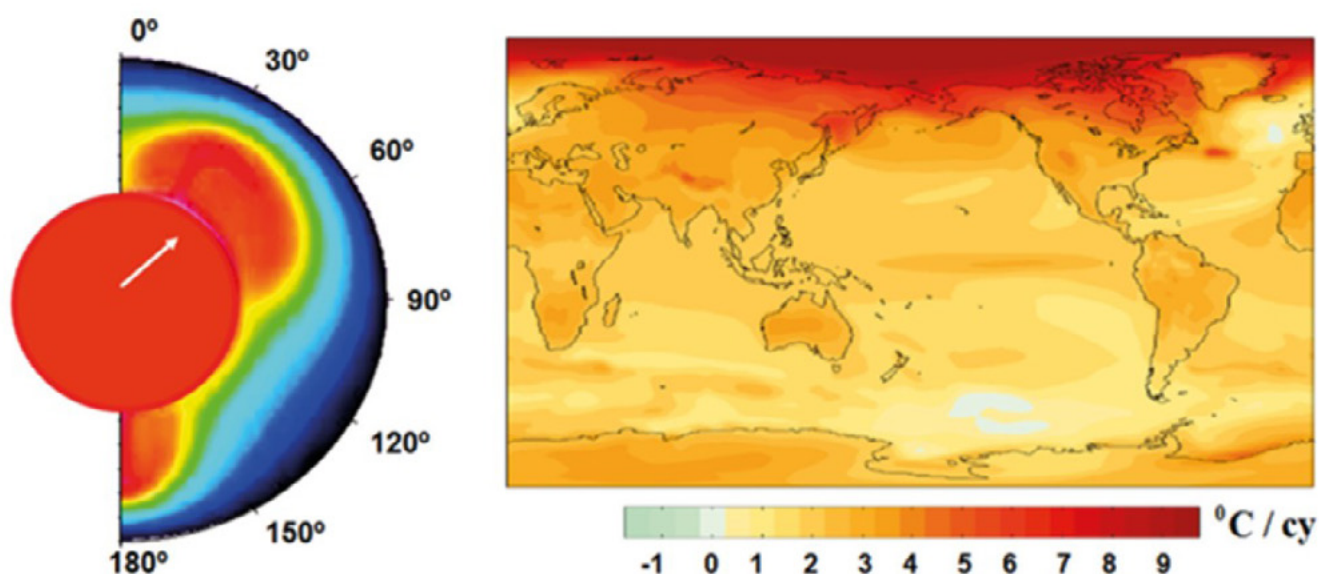
Zdroj: ESA

Livermore, P. W., Hollerbach, R., & Finlay, C. C. (2017). An accelerating high-latitude jet in Earth's core. *Nature Geoscience*, 10, 62-68. <https://doi.org/10.1038/ngeo2859>

Terajší drift severného magnetického pólu smerom k Tajmýrskemu polostrovu teda môže byť ďalším dôkazom, poukazujúcim na zmeny vo vonkajšom tekutom jadre Zeme, a na prudký vzostup chochola z rozhrania medzi jadrom a plášťom pod Sibírou.

V dôsledku vonkajšieho kozmického pôsobenia na zemské jadro sa teda v roku 1995 začalo zahrievanie vnútorného jadra a tavenie vonkajšieho, čo spôsobilo prudké zrýchlenie driftu severného magnetického pólu. Skvapalnenie vonkajšieho jadra bolo podmienkou, ktorá spôsobila v rokoch

1997 – 1998 posun jadra smerom k Sibíri, k Tajmýrskemu polostrovu. Podľa hypotézy, ktorú predložil doktor vied profesor J. V. Barkin, posun jadra vyvolal asymetrický prísun tepla smerom k Sibíri (obr. 16). Je dôležité poznamenať, že k prenosu tepla v plášti dochádza predovšetkým prostredníctvom konvektívneho miešania. Možno teda konštatovať, že vzostup magmy smerom k Sibíri bol primárne zapríčinený posunom jadra. Neskôr sa v tejto oblasti Sibíri začalo pozorovať anomálne zahrievanie atmosféry a toto zahrievanie sa každoročne zintenzívňuje.



Obr. 16

Vynútené relatívne rozkolísanie jadra a plášťa a schéma asymetrického prívodu tepla do horných vrstiev plášťa (vľavo) Lineárne trendy otepľovania povrchu (v °C za storočie) z údajov NCAR CCSM3 boli spriemerované podľa špeciálneho scenára (https://www.researchgate.net/figure/Linear-surface-warming-trend-in-C-per-century-from-NCAR-CCSM3-averaged-from-9-ensemble_fig1_266558233) (vpravo).

Zdroj: Баркин Ю. В. Циклические инверсионные изменения климата в Северном и Южном полушариях Земли // Геология морей и океанов: Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. — М.: ГЕОС. 2009. С. 4–8.

Sibír a sibírska Arktída sa otepľujú 3 až 4-krát rýchlejšie ako zvyšok sveta

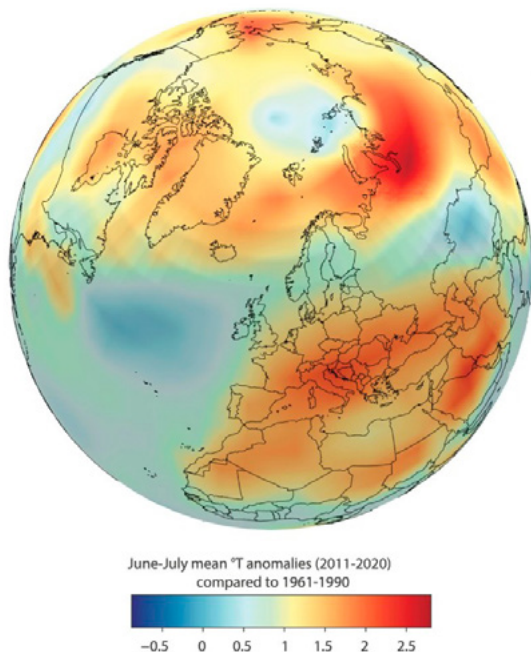
Podľa rôznych organizácií územie Ruska, najmä arktická oblasť, zažíva extrémne otepľovanie.

Podľa údajov vedcov z Medzivládneho panelu pre zmenu klímy (IPCC) za rok 2021 sa Rusko otepľuje trikrát rýchlejšie ako zvyšok sveta a jeho arktické a sibírske oblasti sa otepľujú štyrikrát rýchlejšie, než je celosvetový priemer.

V roku 2022 šéf Roshydrometu Igor Šumakov s odvolaním sa na údaje Svetovej meteorologickej organizácie²⁷ uviedol, že územie Ruska sa otepľuje 2,5-krát rýchlejšie ako zvyšok planéty, pričom najrýchlejším tempom rastie teplota v severnej polárnej oblasti krajiny, najmä v posledných desaťročiach. Sibír patrí medzi oblasti s najintenzívnejším otepľovaním

na svete (obr. 17), ktoré je na základe rekonštruovaných klimatických podmienok z dendroklimatologických štúdií za posledných 7 000 rokov bezprecedentné²⁸.

Woodwellovo centrum pre výskum klímy (Woodwell Climate Research Center, WCRC)²⁹ v USA vykonalo rozsiahlu štúdiu s cieľom posúdiť, ako zmena klímy ovplyvnila teplotu, vlhkosť pôdy, hĺbku snehovej pokrývky, úroveň zrážok a ďalšie kľúčové klimatické parametre v rôznych oblastiach Arktídy. Na tento účel vedci skombinovali a systematizovali údaje zozbierané pomocou satelitov, lietadiel, dronov a pozemných meteorologických staníc za posledných 40 rokov.



Obr. 17

Priemerné teplotné anomálie v júni až júli na severnej pologuli (polostrov Jamal a Tajmýrsky polostrov) za posledné desaťročie pozorovaní (2011 – 2020). Teploty sú vyjadrené ako anomálie vo vzťahu k východiskovej klíme rokov 1961 – 1990 s použitím súboru údajov HadCRUT.5

Zdroj: Hantemirov, R.M., Corona, C., Guillet, S. et al. Current Siberian heating is unprecedented during the past seven millennia. Nat Commun 13, 4968 (2022)

<https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x>

²⁷TASS. (2024, January). Russia's territory is warming 2.5 times faster than the rest of the planet. TASS News Agency. <https://tass.ru/obschestvo/16009287>

²⁸Hantemirov, R. M., Corona, C., Guillet, S., et al. (2022). Current Siberian heating is unprecedented during the past seven millennia. Nature Communications, 13, 4968. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x>

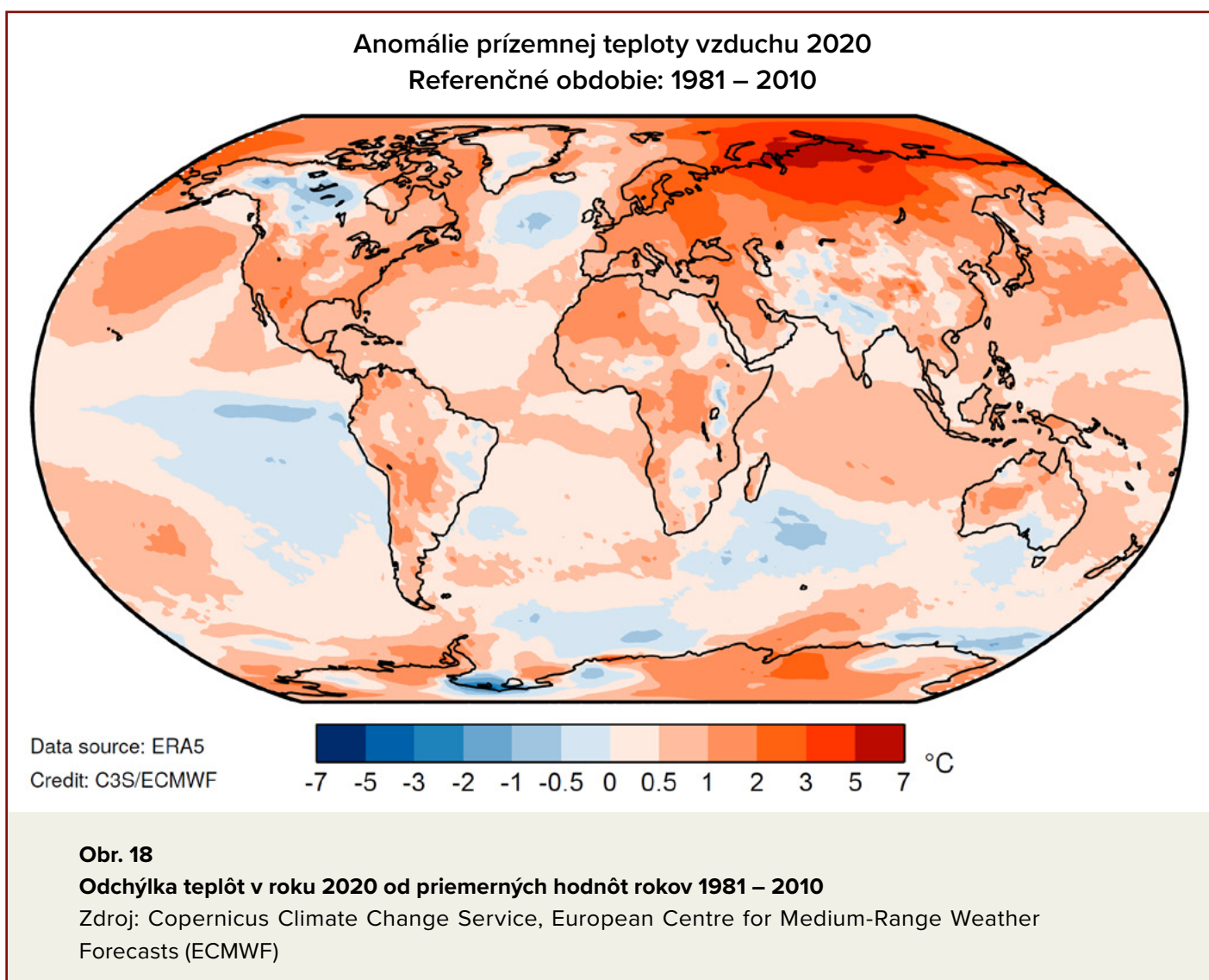
²⁹Watts, J. D., Potter, S., Rogers, B. M., Virkkala, A.-M., Fiske, G., Arndt, K. A., et al. (2025). Regional hotspots of change in northern high latitudes informed by observations from space. Geophysical Research Letters, 52, e2023GL108081. <https://doi.org/10.1029/2023GL108081>

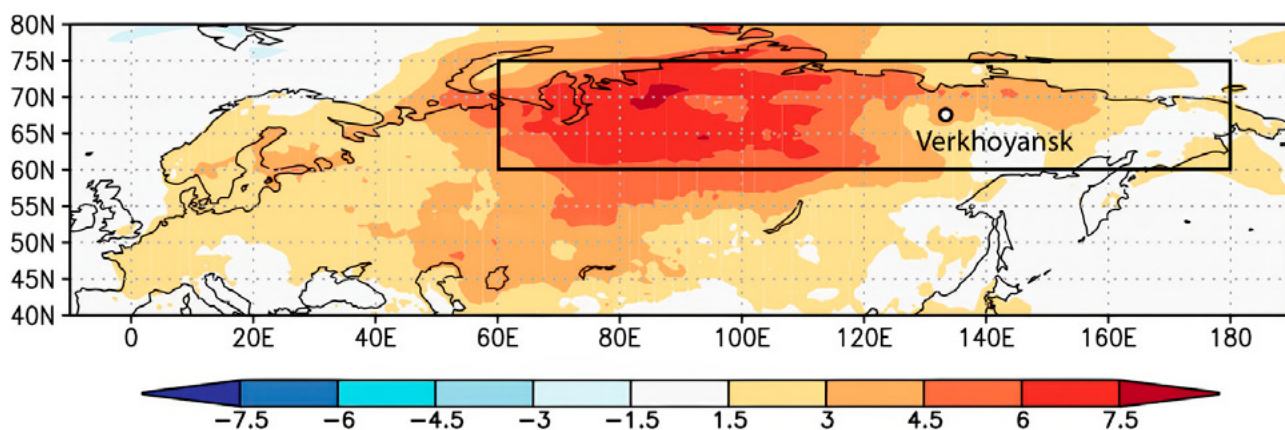
Následná analýza týchto údajov umožnila výskumníkom identifikovať asi dve desiatky klimatických „horúcich lôžok“. Otepľovanie najviac zasiahlo polárne a centrálné oblasti východnej Sibíri, kde sa priemerné ročné teploty každé desaťročie zvyšovali o 1,1 °C, čo niekoľkonásobne prevyšuje tempá globálneho otepľovania. Ešte rýchlejšie stúpala teplota na Tajmýrskom polostrove: 1,7 °C za desaťročie. Podobne sa od konca 80. rokov 20. storočia zvyšovali aj teploty v sibírskej tajge rýchlosťou 0,6 °C za desaťročie.

Vlny tepla na Sibíri v posledných rokoch dosiahli novú alarmujúcu úroveň, najmä v roku 2020, keď teploty v celom regióne prudko vzrástli (obr. 18).

Teploty na Sibíri boli od januára do júna o viac ako 5 °C nad priemerom a v júni až o 10 °C nad priemerom (v porovnaní s úrovňami rokov 1981 – 2010). Toto extrémne horúce obdobie malo za následok prekročenie lokálnych teplotných rekordov, a to aj na meteorologickej stanici Verchojansk, ktorá 20. júna zaznamenala absolútny rekord +38 °C (obr. 19).

Ruská meteorologická služba uviedla, že nameraná teplota bola najvyššia, aká bola kedy zaznamenaná za polárnym kruhom.





Obr. 19

Dlhotrvalúce sibírske horúčavy: priemerné teploty za január – jún 2020 v porovnaní s normou (1981 – 2010) v sibírskom regióne a poloha mesta Verchojansk, kde bola v júni zaznamenaná rekordná denná teplota +38 °C za polárnym kruhom

Zdroj: Ciavarella, A., Cotterill, D., Stott, P. et al. Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. *Climatic Change* 166, 9 (2021) <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>

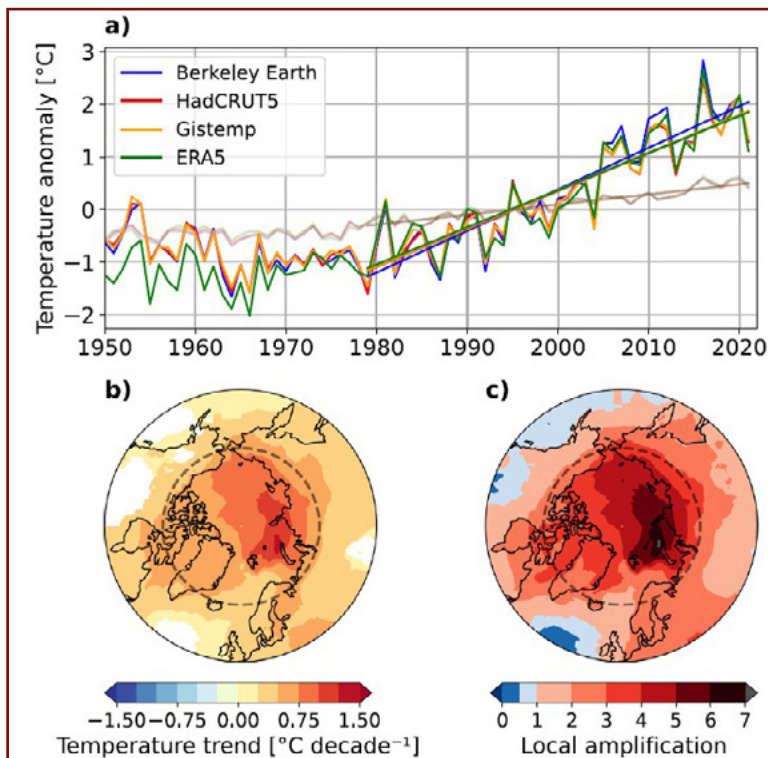
Tieto tepelné vlny nepretrvávajú na Sibíri nepretržite, ale vyskytujú sa pulzujúco.

Je to spôsobené tým, že prieniky magmy, ktoré spôsobujú tieto tepelné vlny, majú vlnový charakter. V atmosfére, kde sa vzduchové masy voľne pohybujú a miešajú, môžu vlny tepla klesnúť po niekoľkých mesiacoch, ako sa to stalo v roku 2020, na rozdiel od vln tepla vo vodnom prostredí.

Podľa výskumu z roku 2022 sa sibírska Arktída otepľuje takmer 4-krát rýchlejšie ako je celosvetový priemer, čo je vyšší pomer, než s akým sa predtým počítalo v klimatických modeloch, čo vedcov veľmi prekvapilo³⁰ (obr. 20).

Je dôležité poznamenať, že k tomuto otepľovaniu arktickej oblasti dochádza práve v oblasti Tajmýrskeho polostrova. Túto anomáliu v oceánskej zóne Sibíri možno vysvetliť tým, že oceánska kôra je tenšia a rýchlejšie vedie teplo, a voda má väčšiu tepelnú kapacitu ako atmosféra. Preto práve oceánska voda intenzívne akumuluje a zadržiava teplo zo stúpajúceho magmatického chochola, napriek tomu, že vzostup chochola prebieha pod kontinentálnou kôrou relatívne ďaleko od pobrežia.

³⁰Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>



Obr. 20

Dynamika priemernej ročnej teploty v Arktíde.
a) Priemerné ročné teplotné anomálie v Arktíde ($66,5^{\circ}$ s. š. – 90° s. š.) (tmavé farby) a v globálnom meradle (svetlé farby) za obdobie 1950 – 2021, odvodené z rôznych dátových súborov o výsledkoch pozorovaní. Teplotné anomálie sa vypočítavajú vo vzťahu k priemerným hodnotám za 30-ročné obdobie 1981 – 2010. Prerušovaná čiara na obr. b) a c) označuje polárny kruh ($66,5^{\circ}$ s. š.)

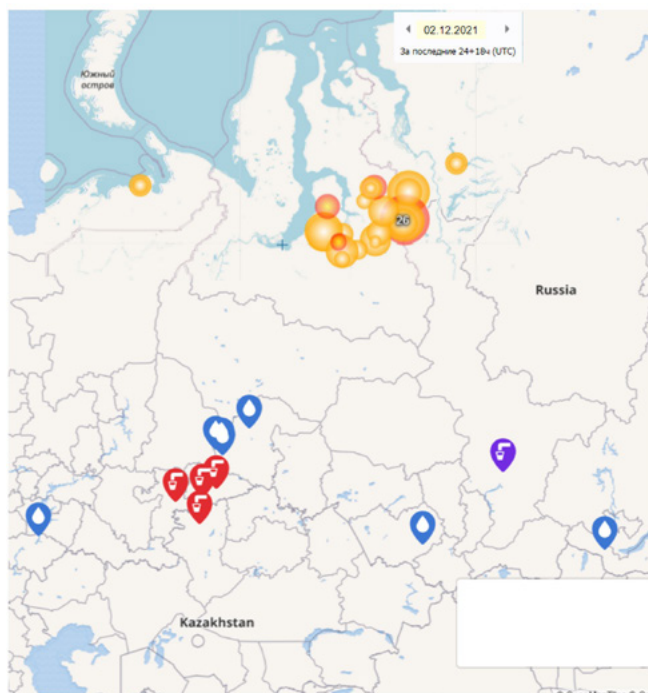
Zdroj: Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 3, 168.

<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

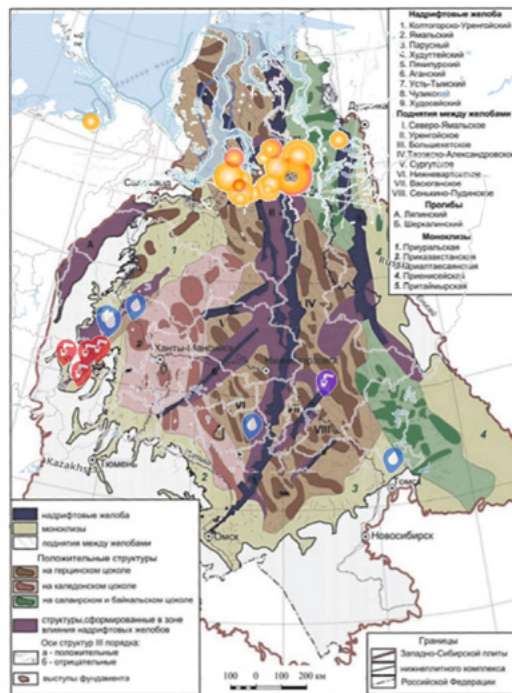
Nepriame príznaky vzostupu sibírskeho chochola

V dôsledku prieniku magmatického chochola do zemskej kôry pod Sibírou dochádza nielen k zohrievaniu atmosféry, ale aj k celému radu ďalších anomálií: topeniu permafrostu zdola nahor, zvyšovaniu seizmickej aktivity v regióne, výstupu horúcej vody na povrch, čo spôsobuje vrenie vody v studniach, bezprecedentným lesným požiarom na celej Sibíri, a to aj pod snehom. Maximálna lokalizácia požiarov pod

snehom sa v posledných rokoch začala objavovať v polárnych oblastiach na juhu Tajmýrskeho a Gydského polostrova, ako aj polostrova Jamal. Dôležitým faktorom je, že prejavy požiarov pod snehom („zombie požiarov“) aj vriaca voda v studniach sa vyskytujú nad zónami hlbinných zlomov (obr. 21).



Winter fires under Distribution of fires and thermal springs in Western Siberia (as of 02.12.2021)



Tectonic structure map of the Lower Plate complex of the West Siberian Plate [Geological Structure..., 2005]"

Obr. 21

Mapa lokalizácie zimných požiarov pod snehom za polárnym kruhom v roku 2021



Fotografie požiarov pod snehom v Sverdlovskej oblasti

V severných zemepisných šírkach dochádza k nárastu emisií metánu a vodíka z podložia, narastá počet kráterov po výbuchoch zemného plynu a na arktickom šelfe sa zintenzívňuje bahenný vulkanizmus. Zahrievanie zdola spôsobuje degradáciu permafrostu a rozklad hydrátov plynov, čo vedie k uvoľňovaniu plynov,

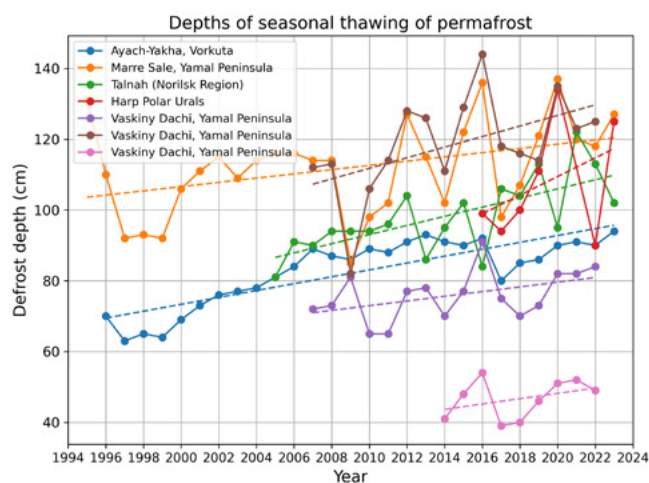
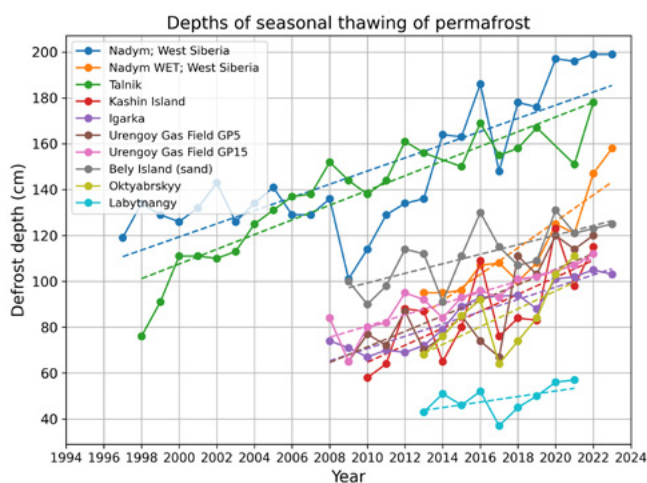
vytváraniu kráterov po výbuchoch a pribúdaniu bahenného vulkanizmu. Plyn uvoľnený z hĺbín ovplyvňuje stav atmosféry a spôsobuje ďalšie tepelné, geochemické a elektromagnetické anomálie. Pozrime sa na tieto procesy podrobnejšie.

Topenie permafrostu

Ďalším ukazovateľom dodatočného geotermálneho tepla prichádzajúceho od plášťového chochola je stav permafrostu. Autori správy analyzovali údaje o hĺbke sezónneho rozmŕzania permafrostu na teritóriu Ruska od roku 1994 do roku 2023. Databáza bola zostavená na základe meraní uskutočnených v rámci medzinárodného programu cirkumpolárneho monitorovania aktívnej vrstvy (Circumpolar Active Layer Monitoring, CALM), skúmajúceho aktívnu podpovrchovú vrstvu permafrostu, a je dostupná na webovej stránke permafrost.su.

Momentálne je v Rusku 58 aktívnych lokalít, ktoré monitorujú permafrost štandardizovanými metódami, a 46 z nich vykonáva merania už viac ako 10 rokov, čo umožňuje identifikovať dlhodobé trendy. Analýza súboru údajov umožnila identifikovať lokality, kde je pozorovaný stabilný trend zväčšovania hĺbky rozmŕzania, čo naznačuje dodatočné zahrievanie tejto zóny.

Identifikované boli dve skupiny údajov: lokality so zreteľnejším trendom zväčšovania hĺbky rozmŕzania v hĺbkach od 40 cm do 200 cm (obr. 22 a) a lokality s menej intenzívnou rýchlosťou rozmŕzania permafrostu v hĺbkach od 40 cm do 140 cm (obr. 22 b).



Obr. 22

Dynamika hĺbky sezónneho rozmŕzania permafrostu v rôznych regiónoch s rôznou intenzitou: a) s výraznejším nárastom hĺbky rozmŕzania; b) s menej výrazným rastom hĺbky rozmŕzania

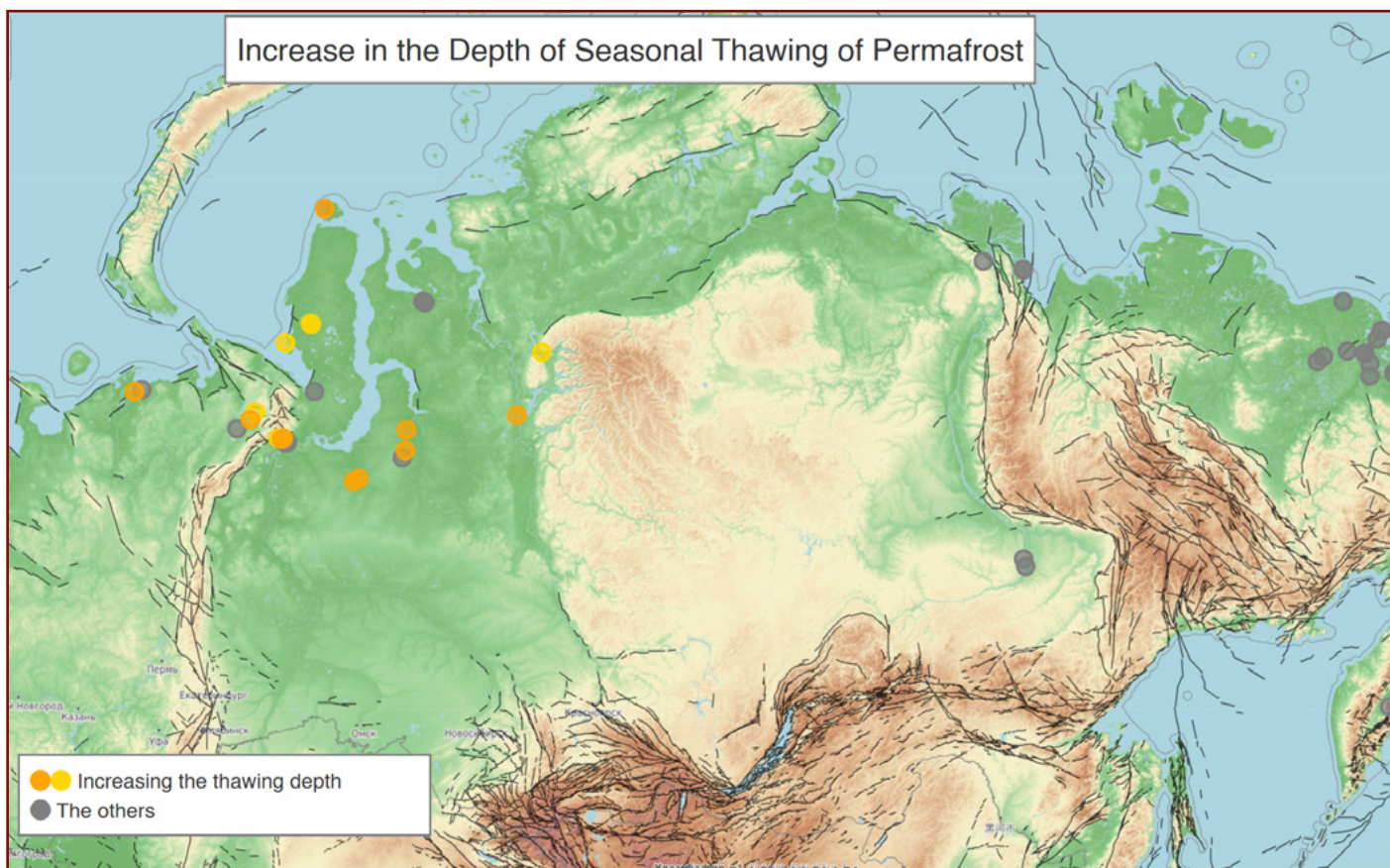
Zdroj údajov: <https://permafrost.su>

Merania sa vykonávajú v rámci medzinárodného programu cirkumpolárneho monitoringu (CALM):

<https://www2.gwu.edu/~calm>

Kvôli prehľadnosti boli všetky skúmané body zakreslené do mapy a označené oranžovou a žltou farbou (obr. 23). Je dôležité poznamenať, že tieto body sú sústredené hlavne v určitých oblastiach: na severe západnej Sibíri, na polostrove Jamal a južne od Gydskeho a Tajmýrskeho polostrova.

Táto lokalizácia oblastí maximálneho rozmŕzania permafrostu zodpovedá oblasti so zníženými rýchlosťami seizmických vln v plášti, v predpokladanej zóne rozlievania hlavy magmatického chochola. To je zase príčinou zvýšenia teploty pôdy, a to aj v zmrznutej vrstve.



Obr. 23

Miesta zvyšujúcej sa hĺbky sezónneho rozmŕzania vrstvy permafrostu. Miesta merania sú označené bodmi: sivá – miesta, kde nie je badateľný nárast sezónneho rozmŕzania; žltá – miesta, kde narastá hĺbka rozmŕzania

Zdroj údajov: <https://permafrost.su>

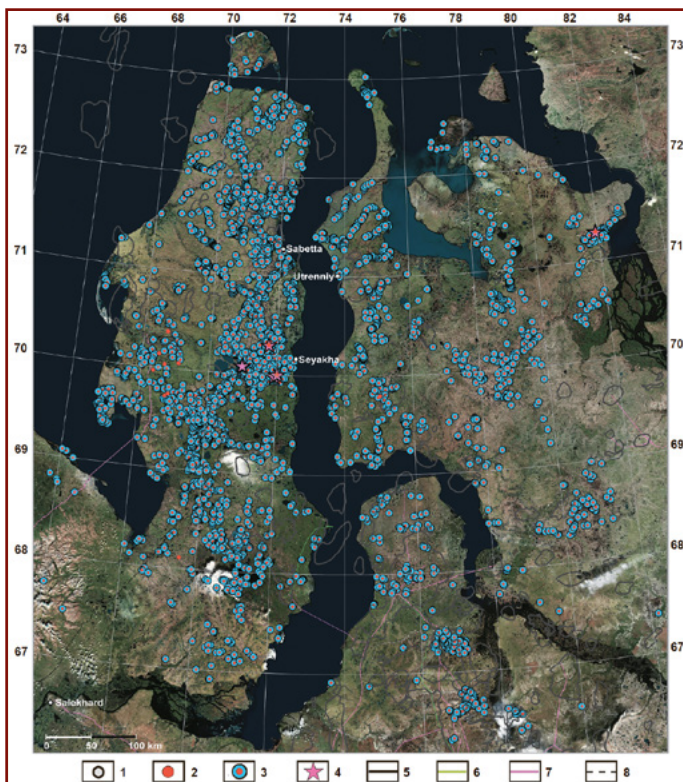
Merania sa vykonávajú v rámci medzinárodného programu cirkumpolárneho monitoringu (CALM):

<https://www2.gwu.edu/~calm>

Prejavy bahenného vulkanizmu

Doplňkové zahrievanie stúpajúcou magmou vedie k degradácii permafrostu a pôsobí na hydráty plynov zakonzervované v týchto pôdach, čím sa uvoľňujú veľké objemy plynov, ktoré sú v nich obsiahnuté. Okrem toho dochádza k migrácii plynu z plynových ložísk a plynom vysoko nasýtených vodonosných vrstiev, čo znižuje také vlastnosti pôd ako sú pružnosť a pevnosť, a prispieva ku skvapalňovaniu ílov, čo vedie k možným procesom bahenného vulkanizmu. Bahenný vulkanizmus je geologický proces, pri ktorom sa cez trhliny v zemskej kôre vplyvom vnútorného geostatického tlaku vychrlia zmesi plynu, vody a úlomkovitého materiálu.

Práve takéto procesy objavili vedci z Ruskej akadémie vied (RAV) na arktickom polostrove Jamal³¹. V dôsledku komplexu geologicko-geofyzikálnych výskumov s využitím údajov diaľkového prieskumu Zeme v období rokov 2014 až 2022 bolo objavených viac ako 3 000 zón mohutných emisií plynu s formovaním kráterov na dne termokrasových jazier, riek a na pobrežnej časti Karského mora (obr. 24).



Obr. 24 Rozmiestnenie zón mohutných emisií plynov na severe západnej Sibíri. Označenia: 1 – obývané sídla, 2 – izolované krátery emisií plynu, 3 – krátery emisií plynov na dne nádrží, 4 – prejavy bahenného vulkanizmu, 5 – obrysy ropných a plynových ložísk, 6 – ropovody, 7 – plynovody, 8 – železničná trať. Mapa je zložená z mozaiky satelitných snímok databázy ESRI

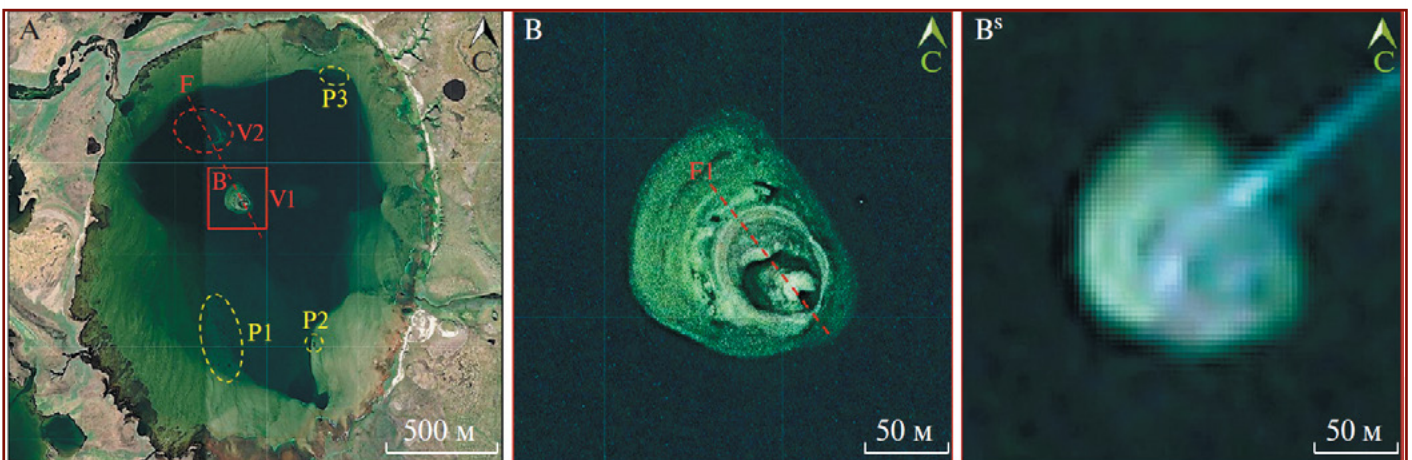
Zdroj: Богоявленский В. И., Никонов Р. А., Богоявленский И. В. Новые данные об интенсивной дегазации земли в Арктике на севере Западной Сибири: термокарстовые озёра с кратерами выбросов газа и грязевыми вулканами. Арктика: экология и экономика 13, 353–368 (2023).

<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

³¹ Bogoyavlensky, V. I., Nikonov, R. A. & Bogoyavlensky, I. V. New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: thermokarst lakes with gas blowout craters and mud volcanoes. AEE 13, 353–368 (2023). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

V rokoch 2022 – 2023 boli podľa údajov diaľkového prieskumu Zeme na dne termokrasových jazier Labvarto a Jambuto po prvýkrát objavené veľké bahennovulkanické štruktúry, ktoré periodicky vykazujú aktívny bahenný vulkanizmus³² (obr. 25). Termokrasové jazero je vodná plocha, ktorá vzniká v dôsledku rozmŕzania permafrostu. Teda nielen rozmŕzanie jazera, ale aj skvapalňovanie ílu hlboko pod jazerom poukazujú na hlbinný zdroj ohrevu.

Podľa autorov štúdie kedysi takéto zjavné bahennovulkanické štruktúry na dne termokrasových jazier v celej cirkumarktickej oblasti neboli známe.



Obr. 25

Vesmírna snímka WorldView-2 termokrasového jazera Labvarto (A) a jeho zväčšený fragment (B) s doplnením fragmentu vesmírnej snímky Sentinel-2 (B^s). Označenia: P1, P2 a P3 sú pockmarky – kráterovité priehlbiny; V1 a V2 sú bahenné sopky; F a F1 sú predpokladané zlomy

Zdroj: Богоявленский В. И. Новые данные о грязевом вулканизме в Арктике на полуострове Ямал. Доклады Российской академии наук. Науки о Земле 512, 92–99 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

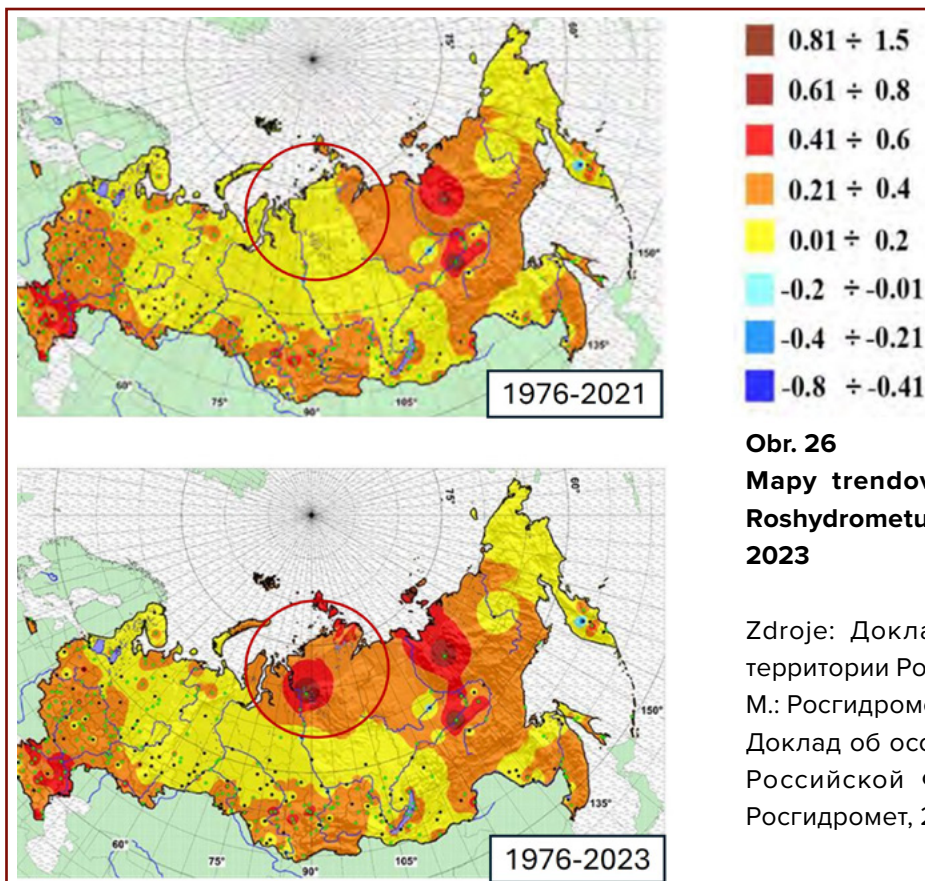
³² Bogoyavlensky, V. I. NEW DATA ON MUD VOLCANISM IN THE ARCTIC ON THE YAMAL PENINSULA. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle 512, 92–99 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

Ohrev pôdy

Na základe údajov Roshydrometu za roky 2021 – 2023 boli zanalyzované teplotné mapy pôdy v hĺbkach 80, 160 a 320 cm. Najinformatívnejším bolo porovnanie teplotných trendov za obdobia rokov 1976 – 2021 a 1976 – 2023 (obr. 26). Medzi rokmi 2021 až 2023 sa na mape trendov objavila jasná anomália južne od Gydskeho a Tajmýrskeho polostrova, ktorá sa územne zhoduje s oblasťou so zníženou rýchlosťou seizmických vĺn v plášti,

identifikovaných metódami seizmickej tomografie pod litosférou sibírskeho regiónu.

S prihliadnutím na značnú hĺbku meraní (320 cm) a široké pokrytie pozorovaní (466 meteorologických staníc v Rusku) možno predpokladať, že zistená teplotná anomália súvisí s nárastom geotermálneho tepla v dôsledku vzostupu magmatického chochola.



Obr. 26

Mapy trendov ohrevu pôdy na základe správ Roshydrometu. Hore: 1976 až 2021, dole: 1976 až 2023

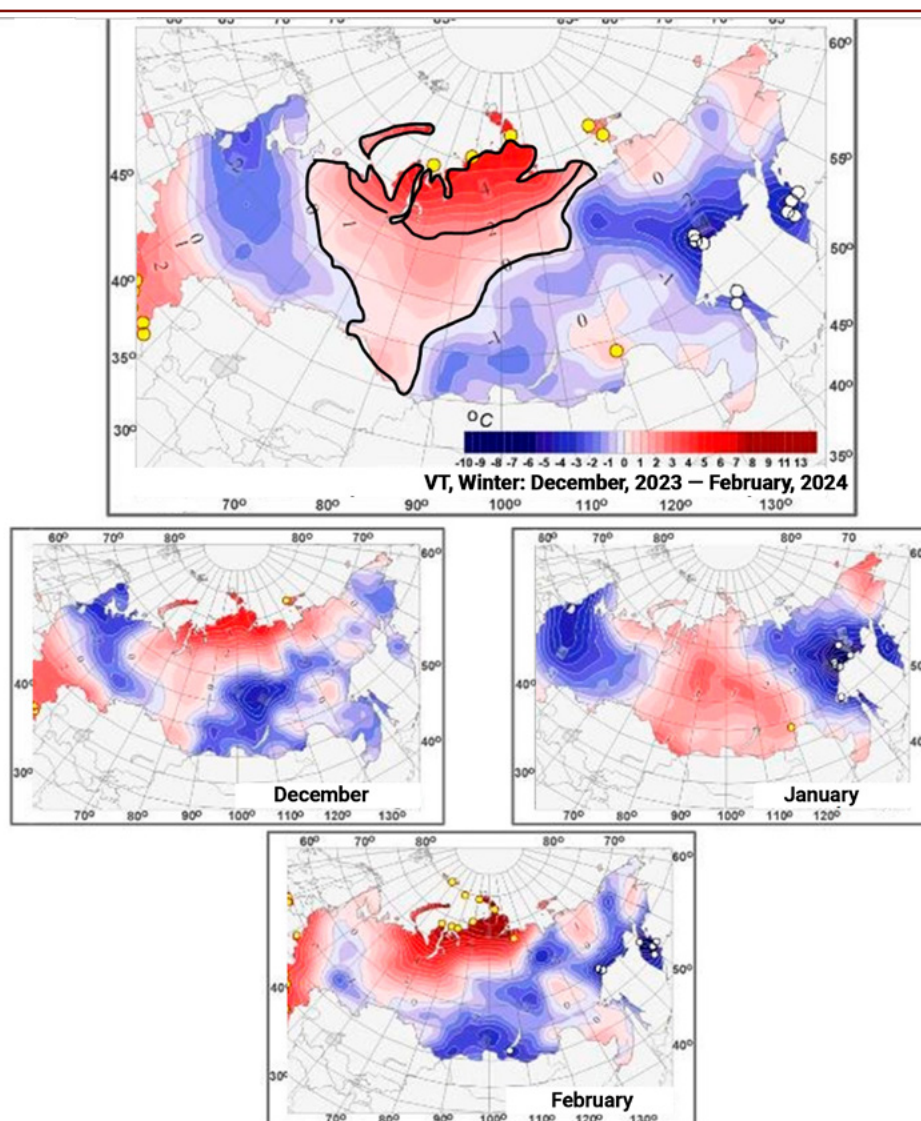
Zdroje: Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. — М.: Росгидромет, 2022. — 110 с.

Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. — М.: Росгидромет, 2024. — 104 с.

Teplota prízemného vzduchu

Údaje pozorovania teplôt za zimné obdobie rokov 2023 – 2024 odrážajú aj anomálny charakter prízemných teplôt vzduchu (obr. 27). Mapa priemerných teplotných anomálií za obdobie od decembra 2023 do februára 2024 ukazuje v oblasti Gydskeho a Tajmýrskeho polostrova zvýšenie teploty o 2,0 – 4,5 °C oproti normálu.

Vzhľadom na severnú polohu tejto oblasti, môže takéto výrazné zvýšenie teploty v zime súvisieť s tepelným vplyvom plášťového chochola.



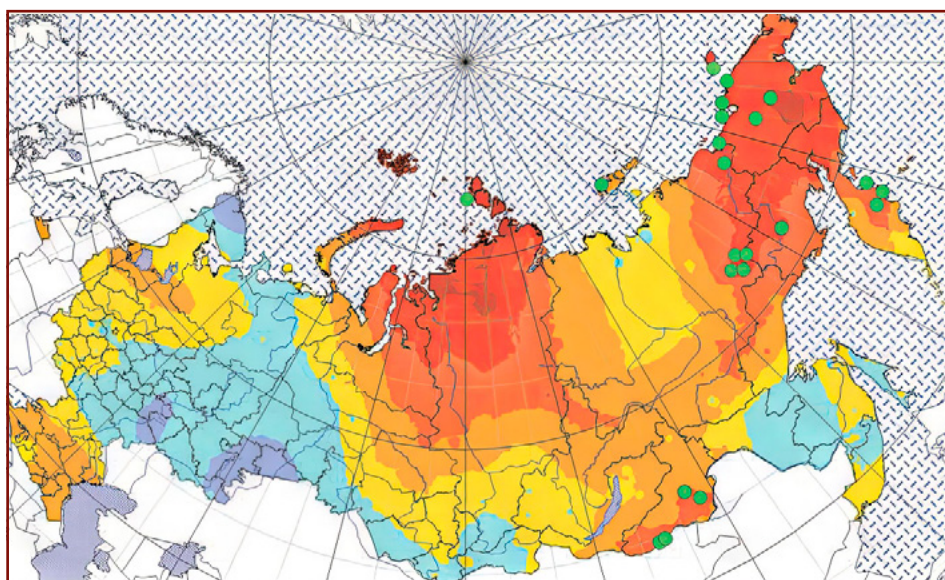
Obr. 27

Polia priemernej sezónnej a priemerných mesačných anomálií teploty prízemného vzduchu (°C) na území Ruska v zime 2023/24

Zdroj: Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. — М.: Росгидромет, 2024.

Podotýkame, že analýza máp priemerných mesačných teplôt³³ za január a júl v období 2001 – 2022 poukazuje na ustálenú teplotnú anomáliu v skúmanom regióne (obr. 28, 29). Možno teda konštatovať, že táto anomália nie

je pozorovaná len v posledných 2 rokoch, ale stabilne sa prejavuje počas celého 23-ročného obdobia pozorovaní, čo potvrdzuje závery o vplyve prieniku chochola na prízemné teploty.

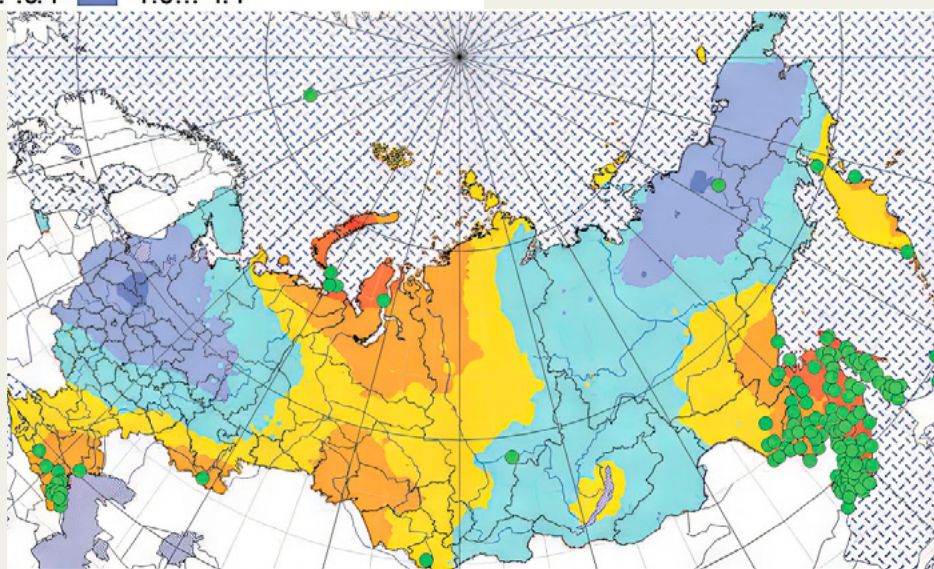


Obr. 28
Koeficienty lineárneho trendu (°C/10 rokov) priemernej mesačnej teploty vzduchu za roky 2001 – 2022 (v rámci hraníc Ruska do februára 2022) – január

Zdroj: Шерстюков Б. Г.
Глобальное потепление и его возможные причины
// Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 7–37.
<https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

Obr. 29
Koeficienty lineárneho trendu (°C/10 rokov) priemernej mesačnej teploty vzduchu v Moskve za roky 2001 – 2022 (v rámci hraníc Ruska do februára 2022) – júl

Zdroj: Шерстюков Б. Г.
Глобальное потепление и его возможные причины
// Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 7–37.
<https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>



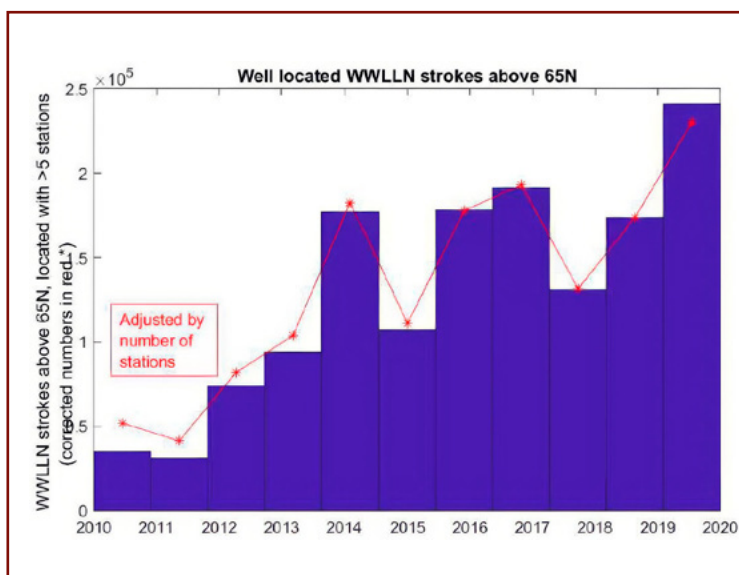
>=2.0 1.0...1.4 0.0...0.4 -0.5...-0.9 -1.5...-1.9
1.5...1.9 0.5...0.9 -0.0...-0.4 -1.0...-1.4

³³ Sherstyukov, B. G. (2023). Global warming and its possible causes. Journal of Hydrometeorology and Ecology, 70, 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

Zvyšovanie počtu bleskov

Vedecká komunita je znepokojená nárastom počtu búrok a úderov bleskov v Arktíde. Počet úderov bleskov v Arktíde nad 65° s. š. sa od roku 2010 do roku 2020 strojnásobil³⁴ (obr. 30). Zvláštnosťou je, že väčšina týchto bleskov sa sústreďuje v oblasti severnej Sibíri, ale v oblasti severnej Kanady a Grónska sa prakticky nevyskytujú (obr. 31, 32).

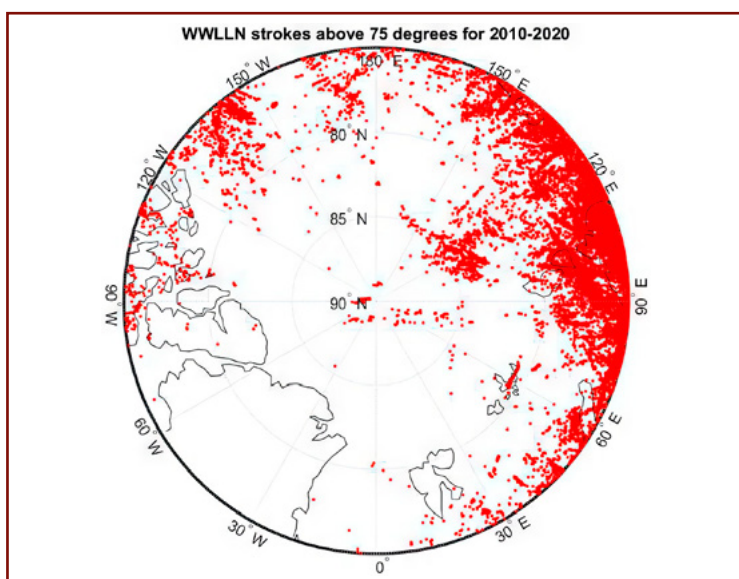
Blesky sa pohybujú smerom k severnému pólu, tak ako sa v auguste 2019 vo veľkom písalo o tom, že niekoľko bleskov bolo zaznamenaných iba pár stoviek kilometrov od severného pólu³⁵. Väčšina bleskov v polárnych oblastiach (severne od 80° s. š.) je každé leto spôsobená len počas niekoľkých dní s intenzívnymi búrkami. Tieto búrky sa však stali novou zvláštnosťou oblasti, keďže v predchádzajúcich rokoch tu búrok bývalo veľmi málo.



Obr. 30

Presne zaznamenané výboje bleskov WWLLN nad 65° s. š. (označené modrou farbou), červená čiara v grafe znázorňuje korekciu na základe celkového počtu staníc WWLLN. WWLLN – World Wide Lightning Location Network (Celosvetová sieť lokalizácie bleskov)

Zdroj: Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091366
<https://doi.org/10.1029/2020GL091366>



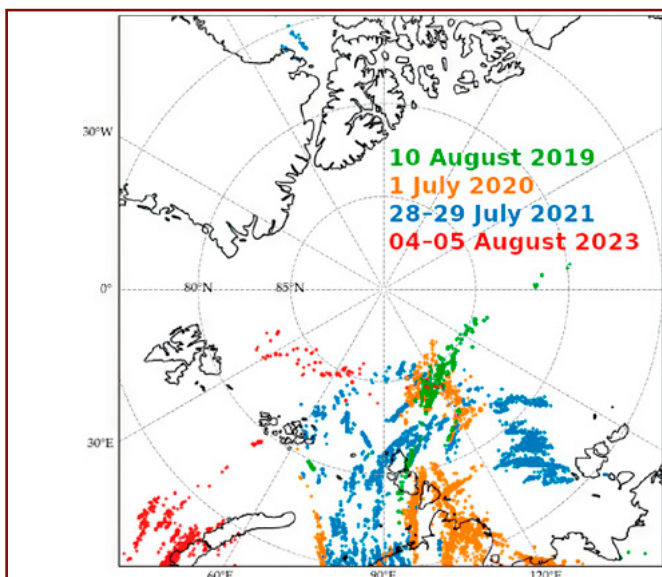
Obr. 31

Globálne rozloženie bleskov WWLLN v júni, júli a auguste 2010 – 2020. nad 75° s. š. WWLLN – World Wide Lightning Location Network (Celosvetová sieť lokalizácie bleskov)

Zdroj: Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091366.
<https://doi.org/10.1029/2020GL091366>

³⁴Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091366.
<https://doi.org/10.1029/2020GL091366>

³⁵Samenow, J. (2019, August 12). Lightning struck near the North Pole 48 times on Saturday, as rapid Arctic warming continues. *The Washington Post*.
<https://www.washingtonpost.com/weather/2019/08/12/lightning-struck-within-miles-north-pole-saturday-rapid-arctic-warming-continues/>



Obr. 32

Miesta bleskov detekované WWLLN počas búrok v rokoch 2019 – 2023. Zelená – 2019, oranžová – 2020, modrá – 2021, červená – 2023

Zdroj: Popykina, Alena, Nikolay Ilin, Maria Shatalina, Colin Price, Fedor Sarafanov, Andrey Terentev & Andrey Kurkin. 2024. „Thunderstorms near the North Pole“ Atmosphere 15, no. 3: 310. <https://doi.org/10.3390/atmos15030310>

Príčina pretrvávajúcej polohy týchto búrok v niekoľkých posledných rokoch spočíva v extrémnych letných horúčavách na severe Sibíri s teplotami dosahujúcimi 35 °C počas letných mesiacov. Predpokladá sa tiež, že zvýšenie celkovej ionizácie atmosféry v tomto regióne v dôsledku prieniku magmatického chochola je tiež dôležitým faktorom zvýšenia počtu bleskov. K tomu dochádza v dôsledku prechodu tepelnej energie na elektrickú podľa Jutkinovho efektu v procese vnútroplášťových výbuchov, ku ktorým dochádza pri kontakte prúdov magmy rôznych teplôt. V dôsledku toho sa z hĺbky uvoľňuje obrovské množstvo energie, čo vedie k zvýšeniu statického napätia na povrchu pôdnej vrstvy, zmene povrchového potenciálu, zvýšeniu ionizácie vzduchu a v dôsledku toho k zvýšeniu počtu bleskov.

Dochádza aj k uvoľňovaniu značných objemov plynov cez trhliny v kôre. To môže ovplyvniť tvorbu oblačnosti, ako aj miestne poveternostné podmienky. Prienik magmy je kľúčovým faktorom zahrievania povrchu, zvyšovania vlhkosti a vzniku tepelných anomálií, ktoré vedú k búrkovým oblakom a bleskom.

Keďže búrky a blesky pre svoj vznik vyžadujú kombináciu studeného vzduchu, teplého vzduchu a konvektívnej nestability, umiestnenie sibírskeho plášťového chochola vytvára optimálne podmienky pre ich vznik.

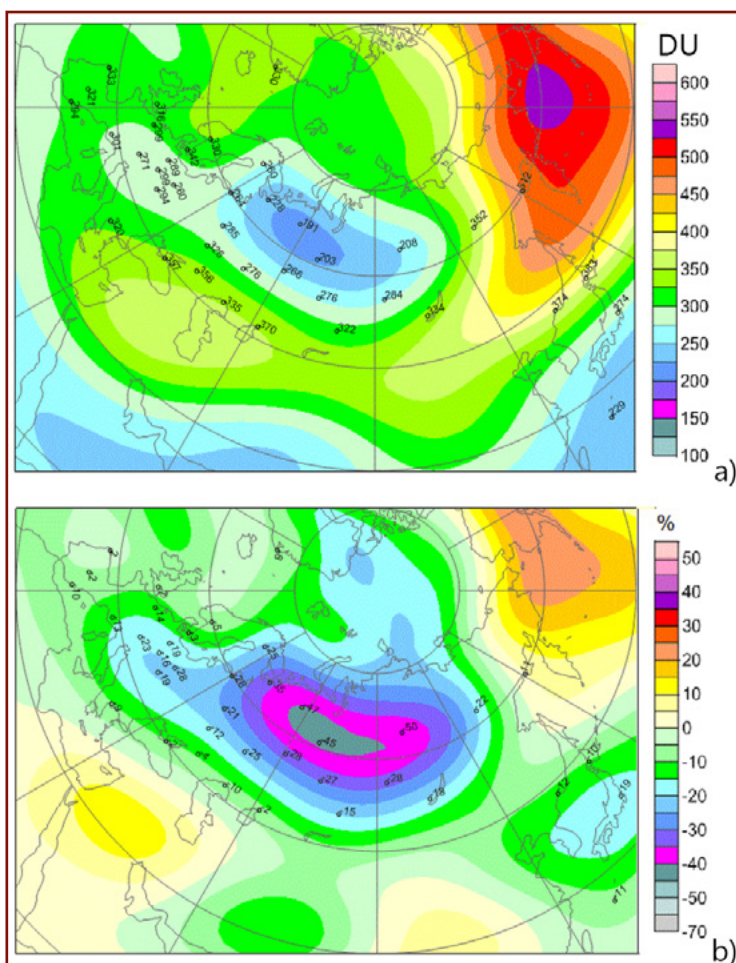
Poškodzovanie ozónovej vrstvy

Magmatická aktivita v hĺbkach je sprevádzaná uvoľňovaním značného množstva sopečných plynov, ku ktorým patria vodík, metán a oxid uhličitý. Emisie vodíka podľa prác V. L. Syvorotkina³⁶ spôsobujú deštrukciu ozónovej vrstvy. Keďže vzostup magmy má pulzačný charakter, degazácia a následné narušenie ozónovej vrstvy bude mať tiež sporadický, teda epizodický prejav.

Anomálie ozónovej vrstvy sú nad severnou Sibírou pozorované od rokov 1997 – 1998, teda po posunutí zemského jadra smerom k Tajmýrskemu polostrovu. Epizódy poškodzovania ozónovej vrstvy boli pozorované

v rokoch 2011, 2016 a 2020³⁷. Maximálny deficit ozónu bol zaznamenaný v roku 2016³⁸. Koncom januára 2016 (prvýkrát od začiatku pozorovaní v roku 1973) bola nad severným Uralom a Sibírou zaznamenaná ozónová anomália s celkovým obsahom ozónu 190 – 200 DU (Dobsonových jednotiek), čo je o 40 – 45 % menej ako priemerné dlhodobé hodnoty. Táto anomália pretrvávala až týždeň (obr. 33).

Výrazné zníženie celkového obsahu ozónu zaznamenal aj prístroj OMI (Ozone Monitoring Instrument) inštalovaný na NASA satelite AURA (obr. 34).



Obr. 33

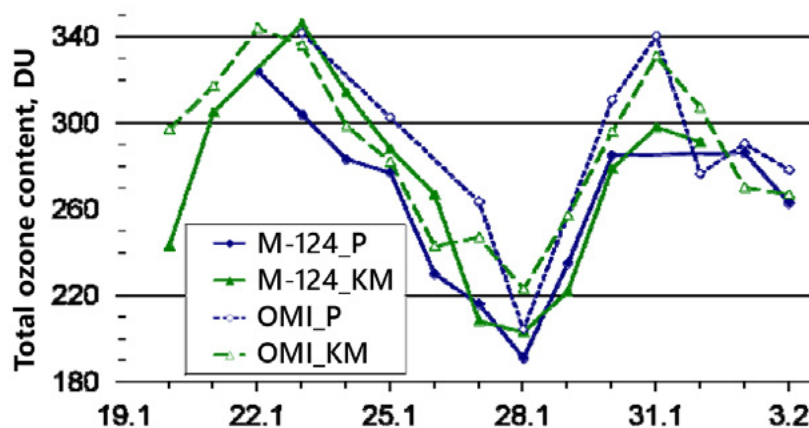
Celkový obsah ozónu (a) a jeho odchýlky od normy (b) 28. januára 2016 na základe satelitných údajov WOUDC[<http://woudc.org/>], čísla na mape sú meraniami celkového obsahu ozónu na staniciach ozónometrickej siete

Zdroj: Никифорова М. П., Варгин П. Н., Звягинцев А. М., Иванова Н. С., Кузнецова И. Н., Лукьянов А. Н. (2016). Озоновая мини-дыра над Северным Уралом и Сибирью. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, № 360, с. 168–180. В материалах Гидрометеорологической конференции, 9-10 февраля, Том 4, с. 91-96. Воронеж: Научно-исследовательские публикации.

³⁶Syvorotkin, V. L. DEEP DEGASSING IN POLAR REGIONS OF THE PLANET AND CLIMATE CHANGE. APOG (2018) doi:[10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art48](https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art48)

³⁷Xia, Y. et al. Significant Contribution of Severe Ozone Loss to the Siberian Arctic Surface Warming in Spring 2020. Geophysical Research Letters 48, e2021GL092509 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL092509>

³⁸Nikiforova, M.P. Extremely low total ozone values over the northern Ural and Siberia in the end of January 2016. AOO (2017) doi:[10.15372/AOO20170102](https://doi.org/10.15372/AOO20170102)



Obr. 34

Celkový obsah ozónu na základe meraní pozemným ozónometrom M-124 na staniciach Pečora (P) a Chanty-Mansijsk (KM) a prístrojom OMI na satelite AURA (USA) v období od 20. januára do 3. februára 2016

Zdroj: Никифорова М. П., Варгин П. Н., Звягинцев А. М., Иванова Н. С., Кузнецова И. Н., Лукьянов А. Н. (2016). Озоновая мини-дыра над Северным Уралом и Сибирью. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, № 360, с. 168-180. В материалах Гидрометеорологической конференции, 9-10 февраля, Том 4, с. 91-96. Воронеж: Научно-исследовательские публикации.

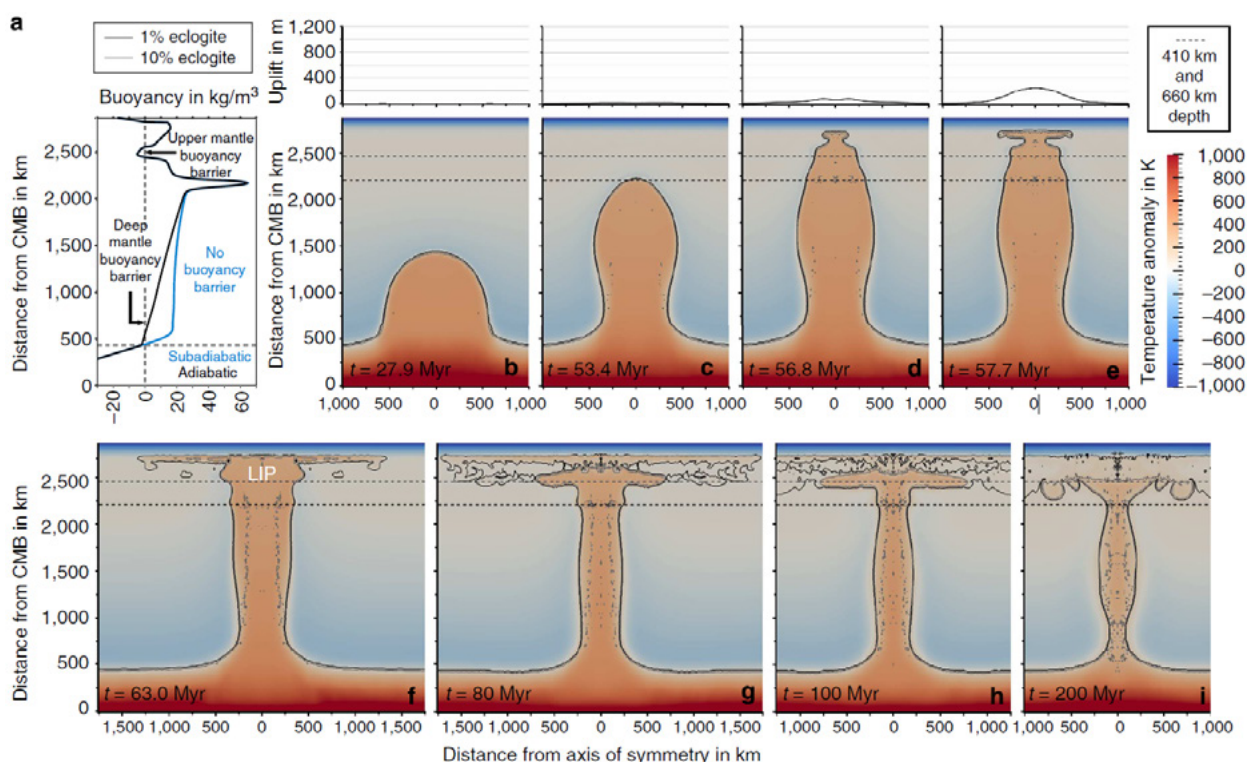
Je dôležité poznamenať, že priemerné dlhodobé sezónne kolísanie celkového obsahu ozónu v extratropických zemepisných šírkach severnej pologule má minimum v septembri a maximum v marci až apríli. Ale v roku 2016 došlo k degradácii ozónu nezvyčajne skoro, v januári 2016, a celkový obsah ozónu v tomto mesiaci bol najnižší v celej histórii prístrojových pozorovaní.

Degradácia ozónovej vrstvy nad sibírsym regiónom teda môže byť ďalším indikátorom úniku plynov pozdĺž zlomov v dôsledku postupu magmatického chochola k povrchu.

Štruktúra, možné rozmery a lokalizácia magmatického chochola na základe publikovaných a pozorovaných údajov

Štruktúra chochola sa dá hypoteticky prirovnať k hříbu. Má takzvaný chvost, ktorý vynáša žeravý materiál z rozhrania medzi jadrom a plášťom. Vrchná časť chochola, ktorá sa pri stúpaní rozširuje,

je hlava chochola. Keď chochol dosiahne hranicu (základňu) litosféry a narazí na žiaruvzdornú vrstvu stuhnutých hornín, jeho hlava sa začne roztekať pod litosférou ako klobúk hříba (obr. 35).



Obr. 35

Obrázok ukazuje model evolúcie magmatického chochola, ako je napríklad ten, ktorý vytvoril sibírske trapy pred 250 miliónmi rokov

Graf vľavo (a) ukazuje, ako magma stúpa cez rôzne vrstvy zemského plášťa. Hlavná časť obrázku (b-i) je akousi „časovou osou“ zobrazujúcou fázy vývoja chochola. Najprv sa vytvorí „stĺp“ horúcej magmy, ktorý stúpa od základne plášťa. Postupne sa tento stĺpec dostáva do horných vrstiev plášťa. V hornej časti sa rozširuje a vytvára „hříbovitý“

klobúk. V priebehu času sa chochol stáva tenším a začína sa rozpadáť na jednotlivé časti. Farby v diagrame označujú teplotu: červené a oranžové oblasti sú najhorúcejšie, modré sú chladnejšie.

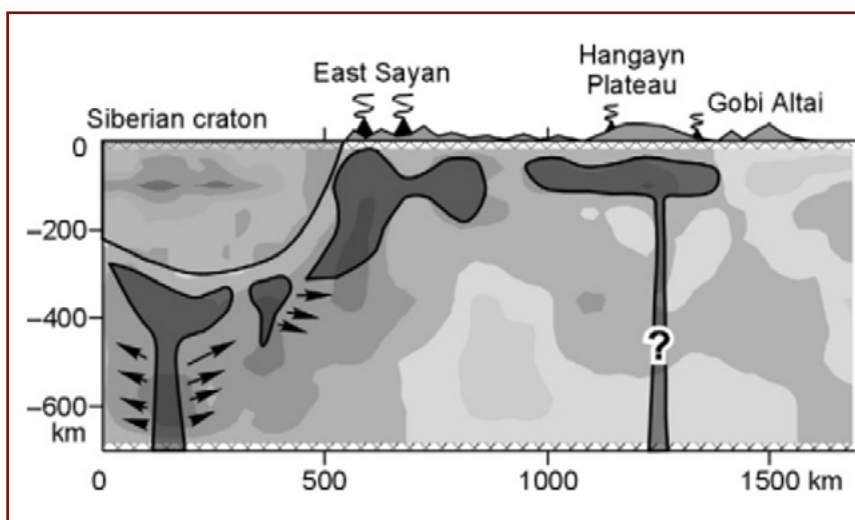
Zdroj: Dannberg, J., Sobolev, S. Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept. Nat Commun 6, 6960 (2015).
<https://doi.org/10.1038/ncomms7960>

Podľa dostupných vedeckých údajov, keď sa chochol približuje k litosfére, jeho polomer sa pri roztekaní zdvojnásobuje a jeho rýchlosť prudko klesá³⁹. Žeravý materiál, ktorý postupuje z „chvosta“, vyvíja tlak, prepaľuje litosféru a vytvára trhliny, a potom sa tam, kde sú zoslabené miesta, budú vytvárať sekundárne chocholy – horné magmatické komory, už vo vnútri zemskej kôry. Podobné komory majú napríklad Yellowstone, Campi Flegrei a ďalšie supervulkány. Práve toto je miesto, kde môže dôjsť k prerazeniu kôry a masívnej erupcii magmy na povrch.

Dôležité je poznamenať, že podľa existujúcich predstáv môže výstup chochola k povrchu trvať desiatky miliónov rokov. Tieto údaje sú však založené na teoretických odhadoch, zatiaľ čo praktické pozorovania súčasnej eskalácie geodynamických procesov naznačujú opak. Pozorovania procesov na Sibíri naznačujú, že k vzostupu chochola môže dôjsť v priebehu niekoľkých desaťročí.

Na základe odborných zdrojov⁴⁰ je známe, že podobný magmatický superchochol, ktorý spôsobil početné výlevy čadiča v Eurázii (na Sibíri) na rozhraní permu a triasu (pred 250 miliónmi rokov), mal tieto rozmery: 4 000 km zo západu na východ a 3 000 km zo severu na juh. Predpokladá sa, že hlava chochola mala priemer 1 000 až 2 000 km.

Je známe, že západosibírska platňa je mladšia a tenšia, s hrúbkou 35 – 40 km. Východosibírska platforma je naopak staršia, hrubšia a chladnejšia, s hrúbkou 40 – 45 km. Nazýva sa sibírsky kratón. Podľa údajov seizmickej tomografie vedci predpokladajú⁴¹, že pod južným koncom východosibírskej platformy sú v súčasnosti pozorované nevelké magmatické komory, ktoré sa šíria do strán pod sibírsym kratónom (obr. 36) kvôli tomu, že platňa je chladnejšia.



Obr. 36
Schematické znázornenie obtekania sibírskeho kratónu nevelkými magmatickými komorami (znázornené šípkami vľavo)

Zdroj: Кулаков И. Ю. Структура верхней мантии под Южной Сибирью и Монголией по данным региональной сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 3. С. 187-196.

<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012>

³⁹Ernst, R. E., & Buchan, K. L. (2002). Maximum size and distribution in time and space of mantle plumes: evidence from large igneous provinces. *Journal of Geodynamics*, 34, 309-342.

⁴⁰Lvova, E. V. (2010). Tectonics of mantle plumes: Evolution of basic concepts. *Moscow University Geology Bulletin*, 5, 21-29.

⁴¹Koulakov, I. Y. (2008). Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia from regional seismic tomography. *Russian Geology and Geophysics*, 49(3), 187-196.

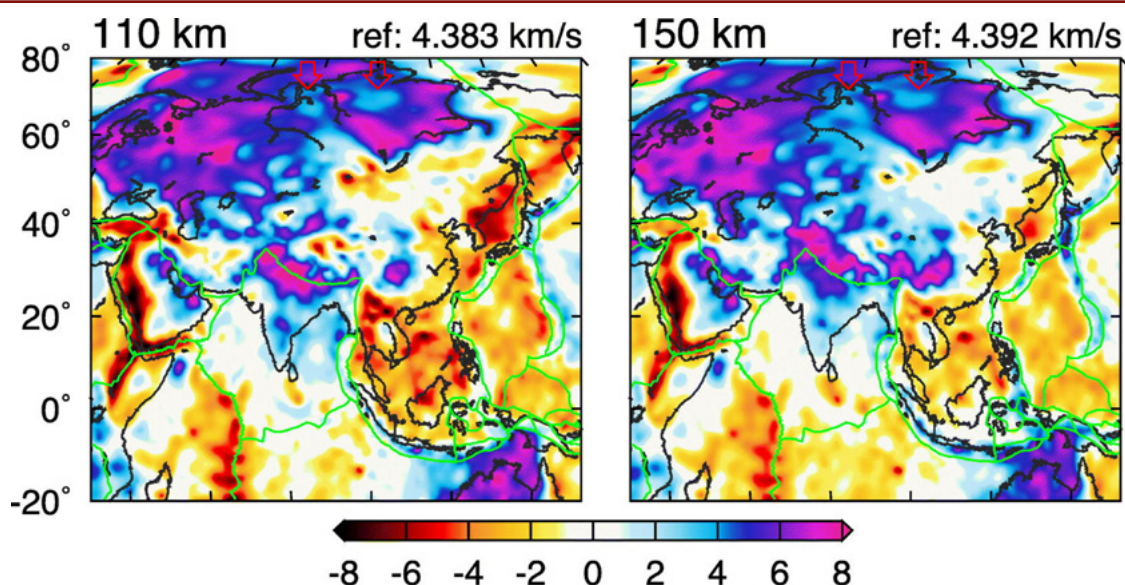
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012>

Podľa hypotézy sa terajší sibírsky chochol šíri pod základňou východosibírskej platformy a čiastočne pod západosibírskou platňou. K šíreniu môže dôjsť podľa publikovaných údajov v hĺbkach 50 – 60 km a „chvost“ chochola je údajne najjasnejšie pozorovaný v hĺbkach 100 km. K prenikaniu sekundárnych chocholov už pravdepodobne dochádza v hĺbkach 40 km.

Niektoré seizmotomografické modely vykazujú anomálie nízkych rýchlostí⁴² (indikujúce tekutejšie prostredie) v hĺbkach 110 – 150 km, čo zodpovedá tekutejšiemu prostrediu v útrobách južne od Gydskeho a

Tajmýrskeho polostrova (obr. 37). Vidno to na mapách rýchlostí podľa údajov článku publikovaného v auguste 2024. Tieto anomálie môžu pravdepodobne súvisieť s dvoma prílevmi magmatického materiálu, t. j. chvostmi chochola (obr. 38).

Ak je tento model správny, potom je priemer každého chvosta, ktorý stúpa pod východosibírskeho kratónom, asi 600 – 700 km.



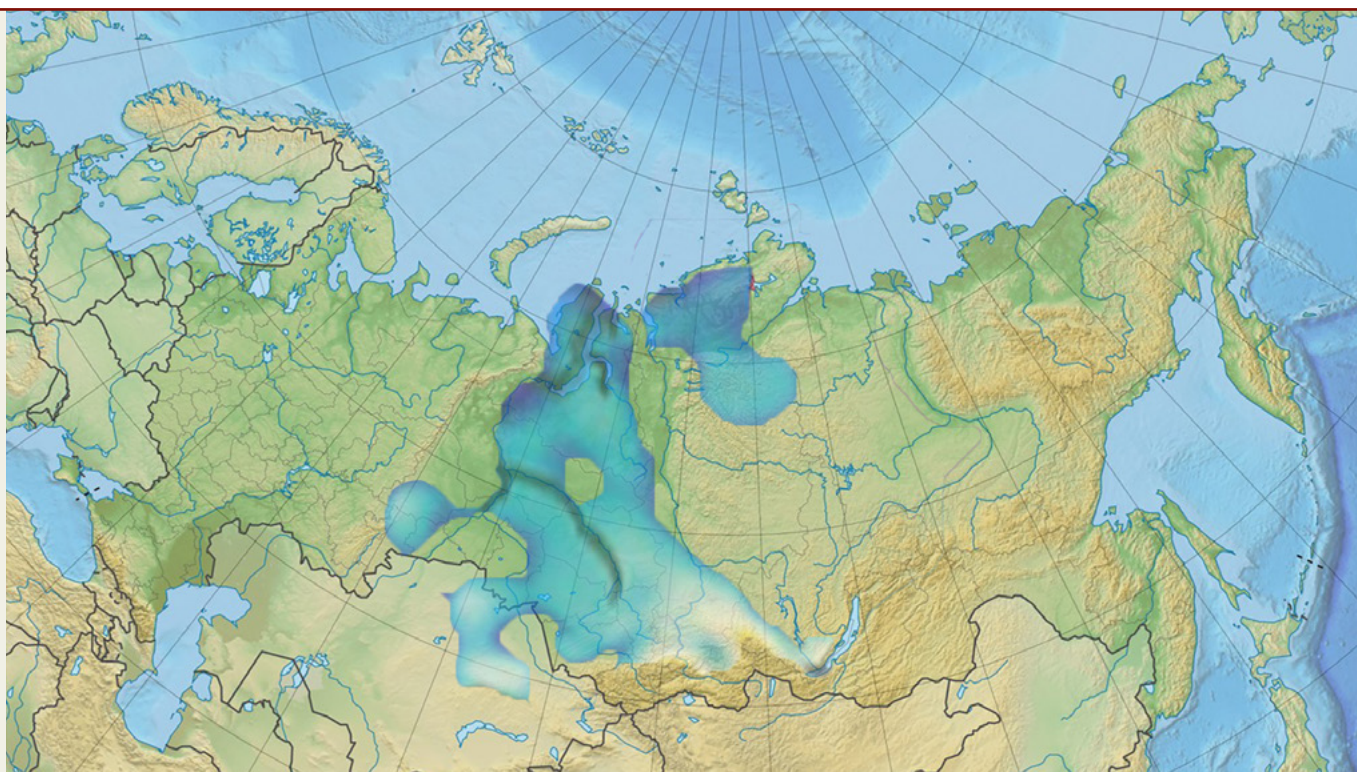
Obr. 37

Na mape sú fialovou farbou znázornené vysoké rýchlosti šírenia akustických vĺn (cez tvrdé horniny) a modrou farbou nižšie rýchlosti (tekutejšia, roztavená hmota). Anomálie nižších rýchlostí seizmických vĺn, ktoré zodpovedajú zónam s tekutejším materiálom plášťa, sú označené dvoma červenými šípkami.

Zdroj: Dou H., Xu Y., Lebedev S., Chagas de Melo B., van der Hilst R.D., Wang B., Wang W. The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism // Earth-Science Reviews. 2024. Vol. 255. P. 104841.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>

⁴²Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism. Earth-Science Reviews, 247, 104595. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>

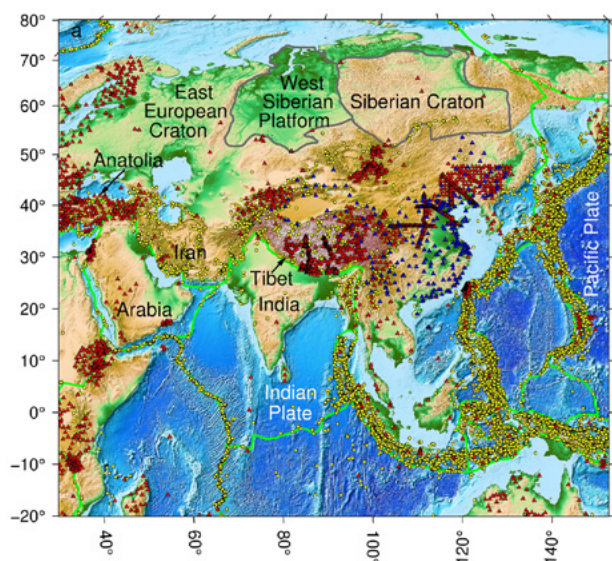


Obr. 38

Anomálie nižšej rýchlosti seizmických vln zakreslené a prispôsobené fyzickej mape Ruska, podľa Dou et al., 2024

Je však dôležité poznamenať, že seizmotomografická analýza územia Sibíri prezentovaná v článku (Dou et al., 2024) použila údaje z menej ako 10 seizmických senzorov (obr. 39), pričom všetky sú umiestnené pozdĺž hraníc platní a v západnej a východnej Sibíri prakticky

chýbajú. V analýze boli použité údaje zo všetkých verejne dostupných širokopásmových záznamov zemetrasení od roku 1994 do 4. septembra 2023. Pre porovnanie sú na mape červenými trojuholníkmi označené senzory použité v analýze pre Áziu a ich počet sa pohybuje v tisícoch.



Obr. 39

Umiestnenie senzorov (červené trojuholníky) používaných pri seizmotomografickej analýze

Zdroj: Dou H., Xu Y., Lebedev S., Chagas de Melo B., van der Hilst R.D., Wang B., Wang W. The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism // Earth-Science Reviews. 2024. Vol. 247. P. 104595.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>

Ďalšia štúdia uskutočnená čínskymi vedcami v roku 2023 potvrdzuje, že kôra pod Sibírou sa v súčasnosti vplyvom magmy taví a stenčuje⁴³ (obr. 40). Tento proces prebieha neustále a znižuje pevnosť platne. V práci autori prezentujú model elektrickej vodivosti plášťa pre severnú Áziu, skonštruovaný na základe geomagnetických údajov. Model ukazuje veľkú anomáliu s vysokou elektrickou vodivosťou, ktorá sa nachádzala v prechodovej zóne plášťa pod sibíorskymi trapmi v čase ich erupcie. Vedci to interpretovali ako tepelnú anomáliu so stopami taveniny v oblasti existujúcej permskej anomálie (obr. 41).

Seizmotomografické modely skúmajúce hĺbky od 40 do 110 km v regióne východosibírskeho kratónu celkovo vykazujú výsledky, ktoré sa

navzájom líšia. Zároveň je pre územie Sibíri pozorovaný jasný nedostatok seizmologických údajov na zostavenie presných modelov.

Moderné tomografické modely sú postavené na základe seizmických údajov zozbieraných za dlhé časové obdobie, približne 30 rokov. Z pohľadu klasických predstáv o vývoji plášťových chocholov, ktorý trvá milióny rokov, sa 30-ročné obdobie považuje za extrémne krátke. Dostupné údaje však naznačujú, že práve počas tohto obdobia nastali kľúčové zmeny v štruktúre sibírskeho chochola.

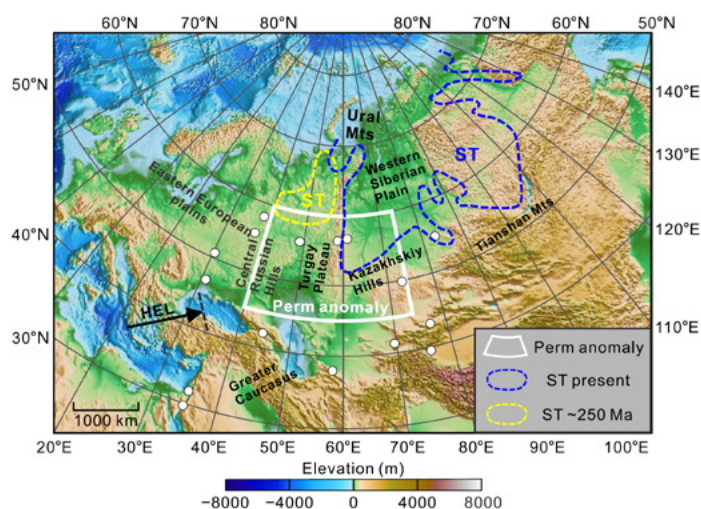
Tieto pozorovania vedú k pochopeniu potreby revidovať existujúce predstavy o rýchlosti vývoja plášťových chocholov a metódach ich skúmania.

Obr. 40

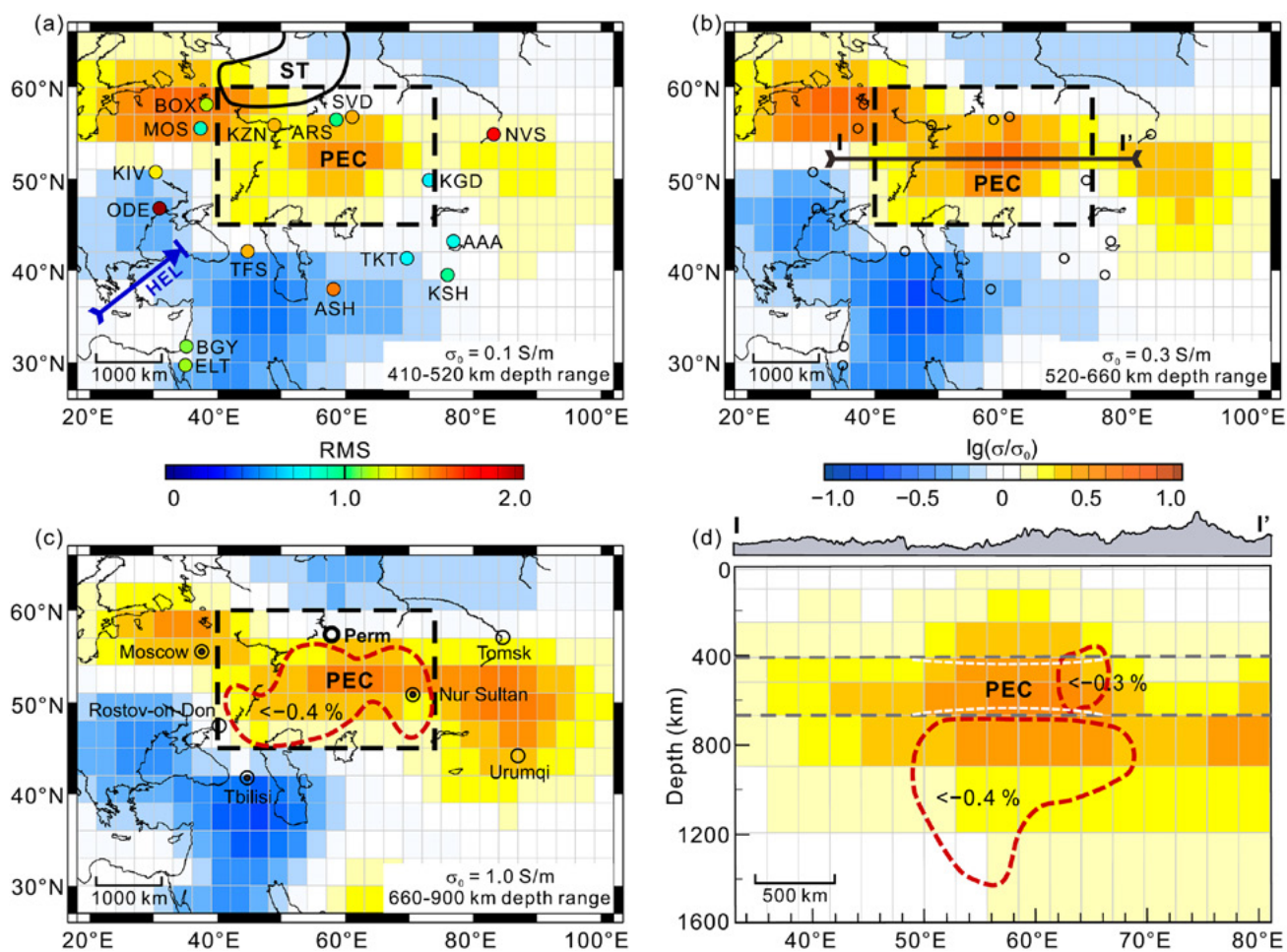
Biele bodky predstavujú stanice, ktorých C-odpovede sa používajú v tejto štúdii. Rozsah permskej anomálie je znázornený zónou ohraničenou bielymi čiarami. Súčasná (modrou) a minulé (žltou) poloha sibírskeho trapov sú označené bodkovanými čiarami

Zdroj: Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). Remnant of the late Permian superplume that generated the Siberian Traps inferred from geomagnetic data. *Nature Communications*, 14, 1311.

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-37053-3>



⁴³Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). Remnant of the late Permian superplume that generated the Siberian Traps inferred from geomagnetic data. *Nature Communications*, 14, 1311. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37053-3>



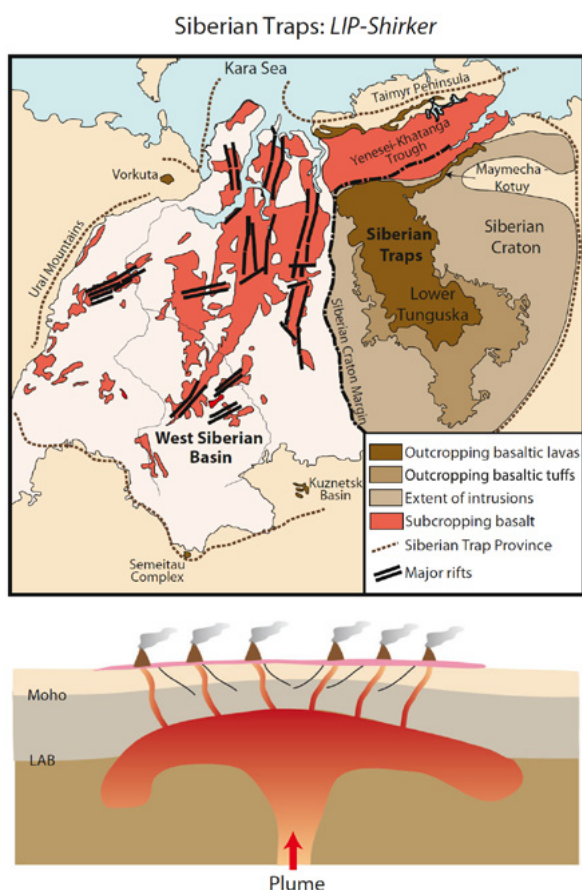
Obr. 41

Vedci z Jilin University (Ťilinská univerzita) a Shijiazhuang Tiedao University (STDU - Š'ťia-čuang Tchie-tao univerzita) použili údaje geomagnetického poľa zo 16 staníc v Severnej Ázii na výpočet elektrickej vodivosti plášťa v rôznych hĺbkach. Zistili výrazné zvýšenie vodivosti v porovnaní s globálnou priemernou vodivosťou v oblasti pod sibíorskymi trapmi (žlto-hnedé oblasti na obrázkoch). Vedci zistili, že tieto oblasti v hĺbkach 400 až 900 km sú v priemere o 250 °C teplejšie ako okolitý plášť. Tieto oblasti obsahujú časť roztaveného plášťa.

Zdroj: Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). Remnant of the late Permian superplume that generated the Siberian Traps inferred from geomagnetic data. Nature Communications, 14, 1311. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37053-3>

Stojí za zmienku, že predchádzajúce výlevy pred 250 miliónmi rokov (na prelome období permu a triasu) prebiehali v tej istej oblasti. Epicentrum sa nachádzalo pod

východosibírskeho kratónu (pod náhornou plošinou Putorana) a k výlevom dochádzalo na celej západnej a východnej Sibíri (obr. 42).



Obr. 42

Sibírske trapy ako príklad veľkej magmatickej provincie

Mapa zobrazuje erupcie na západnej Sibíri (červenou) a trapy vo východnej Sibíri (hnedom), ktoré vybúchli pred 250 miliónmi rokov. Horúci materiál plášťového chochola stúpa a rozteká sa pod hranicou litosféry a astenosféry a vytvára štruktúru v tvare hríbu. To viedlo k rozsiahlej magmatickej aktivite na ploche asi 5 miliónov km². V dôsledku pôsobenia chochola sa vytvoril západosibírsky riftový systém, ktorého aktivita zanikla približne o 10 miliónov rokov neskôr v strednom triase.

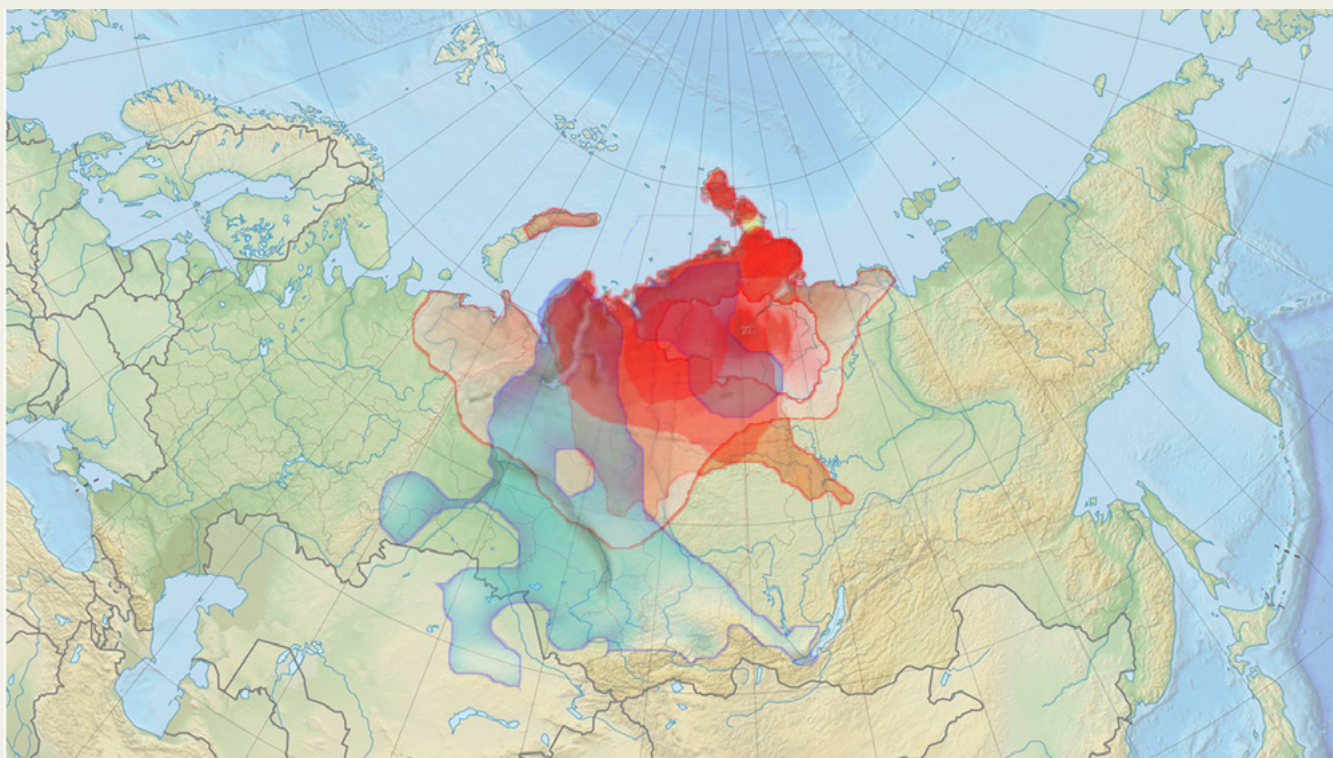
Zdroj: Koptev, A., Cloetingh, S. Role of Large Igneous Provinces in continental break-up varying from “Shirker” to “Producer”. *Commun Earth Environ* 5, 27 (2024).

<https://doi.org/10.1038/s43247-023-01191-9>

Lokalizácia magmatického chochola

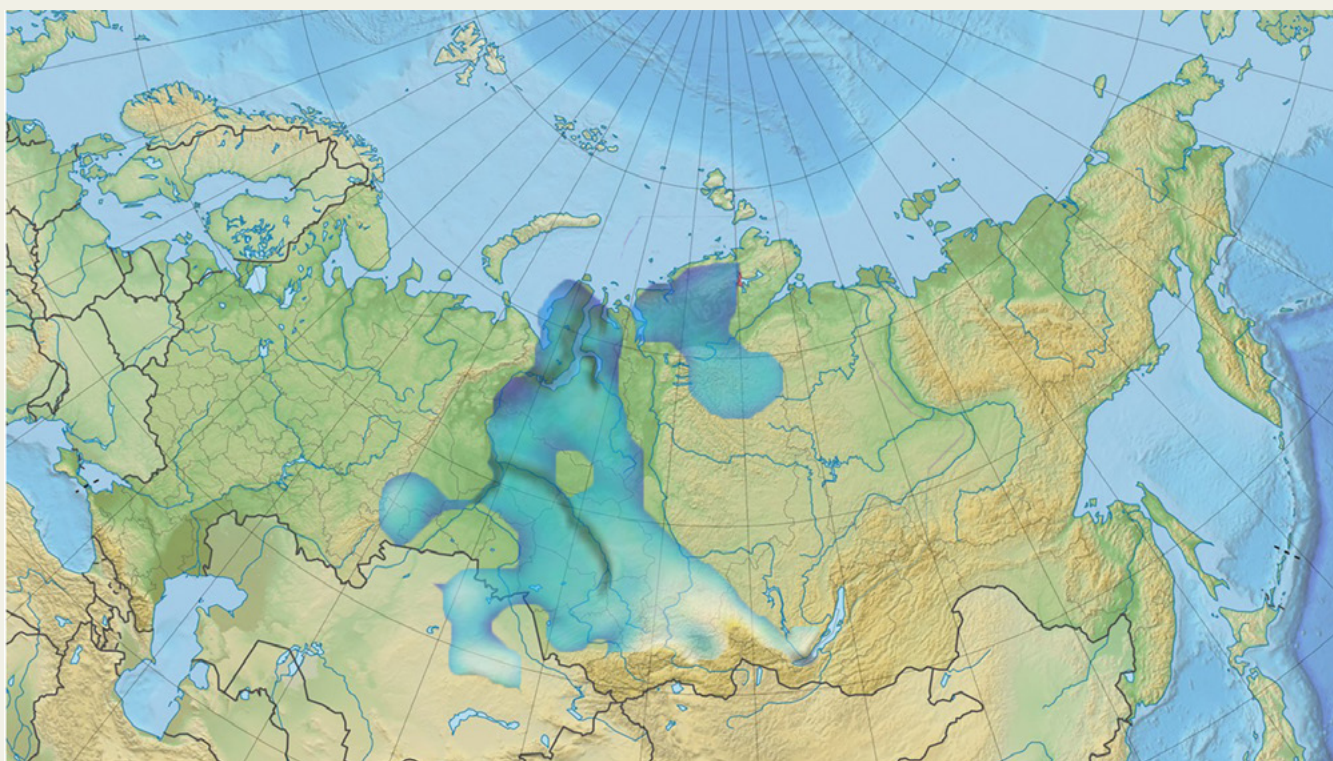
Ak zovšeobecníme vyššie uvedenú analýzu údajov o teplotných anomáliách pôdy, hĺbke rozmŕzania permafrostu, prízemných teplotách,

anomáliách nižších seizmických rýchlostí v plášti a magnetickej anomálii, umožní to určiť aktuálnu polohu a rozmery chochola (obr. 43).

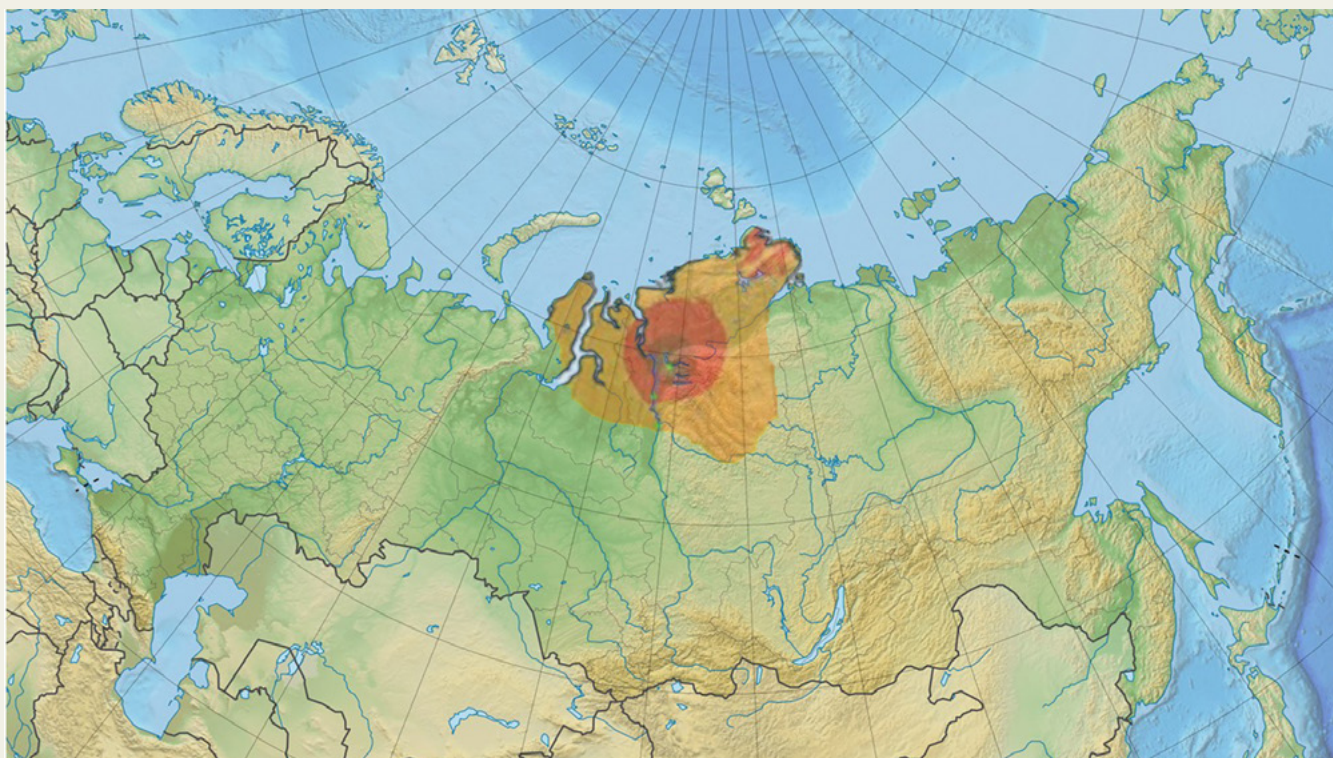


Obr. 43

A. Mapa s prekrytím hlavných anomálií podľa rôznych parametrov, ktoré sú uvedené nižšie:



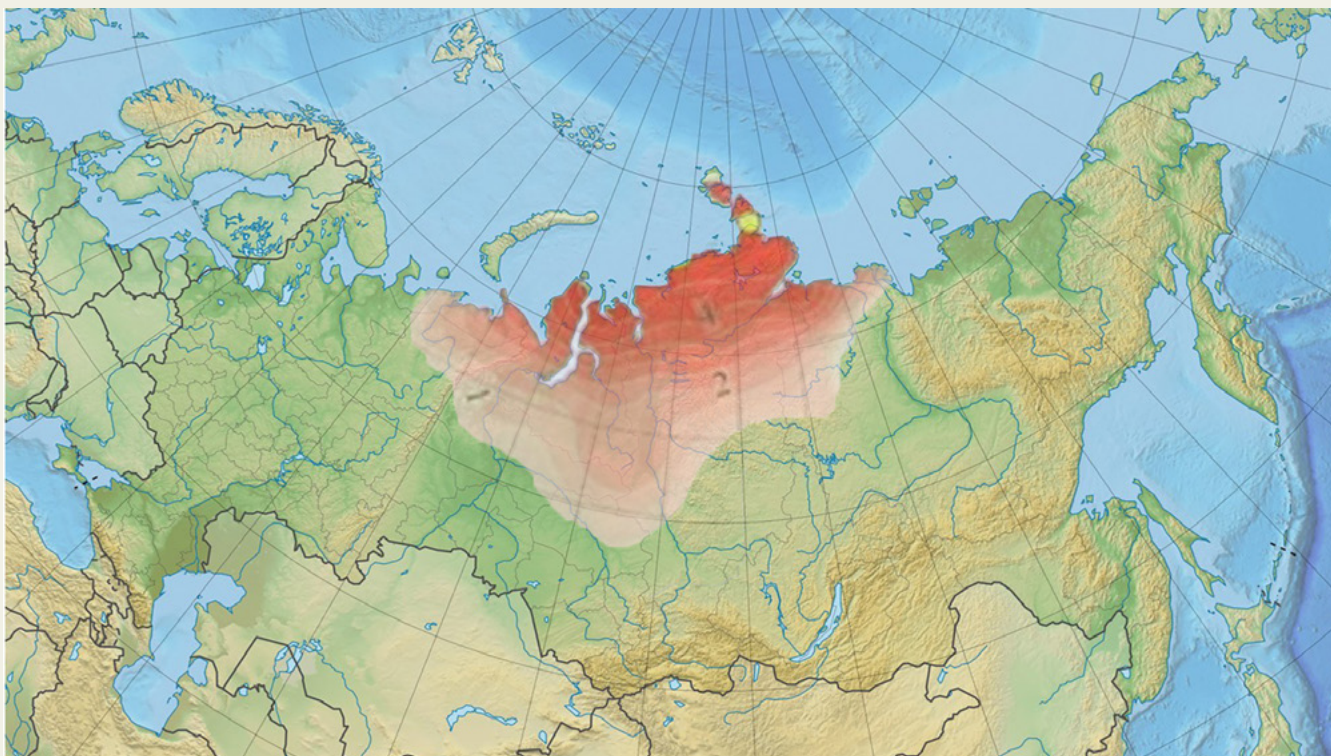
B. Mapa anomálií nižšej rýchlosti (tekutejšia hmota) v hĺbke 110 km podľa seizmotomografie od Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023)



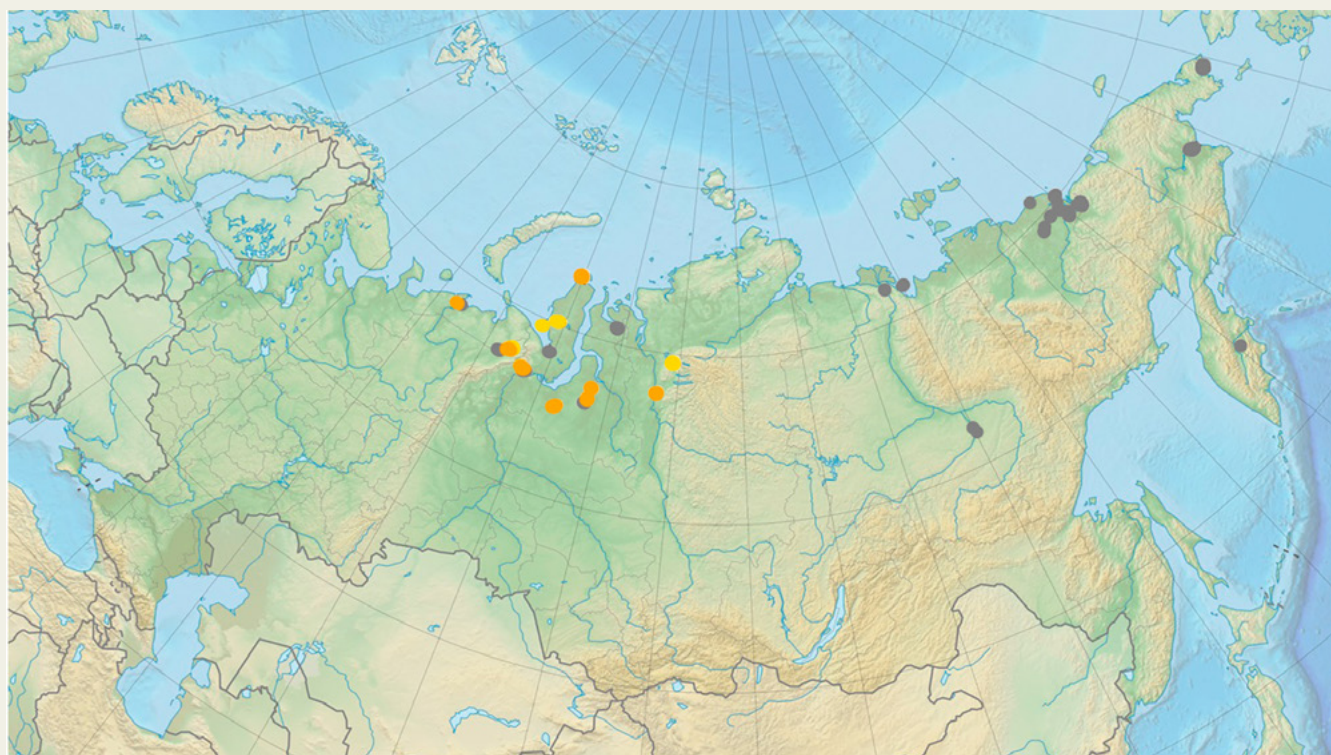
C. Nová anomália ohrevu pôdy pri porovnaní trendov za obdobie 1976 – 2021 a 1976 – 2023 podľa údajov spoločnosti Roshydromet (2021, 2023)



D. Trend priemernej mesačnej teploty vzduchu za január 2001 – 2021 podľa Šerstukova (2023)



E. Priemerná sezónna teplota od decembra 2023 do februára 2024, podľa údajov Roshydrometu (2024)



F. Miesta rastúcej hĺbky sezónneho rozmŕzania vrstvy permafrostu. Zdroj údajov: <https://permafrost.su/>

Podľa hypotézy sa vzostupná časť chochola nachádza južne od Gydskeho a Tajmýrskeho polostrova a má niekoľko vetiev. Priemer hlavy chochola sa odhaduje na 1 200 – 1 500 km a zóna roztekania magmatických prúdov môže dosiahnuť 2 500 – 3 000 km. Táto oblasť pokrýva tektonické štruktúry západosibírskej platne a východosibírskeho kratónu. V súčasnosti hlava chochola pôsobí na základňu východosibírskeho kratónu a rozširuje magmatické prúdy pod jeho územím. Tento proces pravdepodobne vplyva

na zvýšenie seizmickej aktivity v oblasti okrajových častí platne, napríklad v zóne Bajkalu a dokonca na Urale. Príčinou takýchto anomálií konkrétne v okrajových častiach platní je destabilizácia platní v dôsledku zmäknutia podložnej astenosféry a mierny vzostup centrálnej časti sibírskeho bloku zemskej kôry, teda tektonických štruktúr západosibírskej platne a východosibírskeho kratónu spolu s tektotonicou štruktúrou Verchojansko-čukotského vrásového systému.

Rast seizmickej aktivity ako indikátor destabilizácie platní v dôsledku aktivity sibírskeho magmatického chochola

Metodika analýzy seizmickej aktivity zahrnuje sťahovanie a špeciálne spracovanie údajov získaných z webovej stránky Medzinárodného seizmologického centra (International Seismological Centre – ISC). Keďže údaje obsahujú rôzne zdroje z rôznych krajín a výskumných ústavov, ako aj rôzne typy magnitúdy (M_w, M_s, M_b, M_L, M_D atď.), bol vykonaný určitý algoritmus spracovania údajov pre výber príslušného typu magnitúdy z rôznych zdrojov (pozri Prílohu 1). Základnou myšlienkou algoritmu spracovania bolo vybrať strednú hodnotu medzi najbežnejšími typmi magnitúd pre každú udalosť, pretože rôzne zdroje hlásili do databázy ISC rôzne typy a hodnoty magnitúd pre každú udalosť. Takéto spracovanie má obyčajne za následok malý pokles magnitúdy v porovnaní s maximálnou odovzdanou hodnotou, ale skúsenosti ukázali, že mediánový algoritmus poskytuje adekvátne správanie Gutenberg-Rich-

terovho zákona a iných zákonitostí a celkom dobre súhlasí s údajmi z iných seizmologických databáz, ako sú IRIS a USGS.

Údaje získané ako výsledok algoritmu boli filtrované podľa typov udalostí v databáze ISC (pozri Prílohu 1), aby sa vylúčili udalosti spôsobené ľudskou činnosťou počas ťažobných prác: výbuchy, možné výbuchy, zrútenie hornín atď. Keďže v Rusku je veľa banských podnikov, databáza ISC bola porovnaná aj s údajmi Jednotnej geofyzikálnej služby Ruskej akadémie vied⁴⁴ k januáru 2025, obsahujúcimi všetky známe výbuchy a zrútenia hornín na území Ruska. Tieto udalosti boli tiež vylúčené, aby sa zabezpečilo, že vo výsledných údajoch nezostanú žiadne udalosti zodpovedajúce výbuchom.

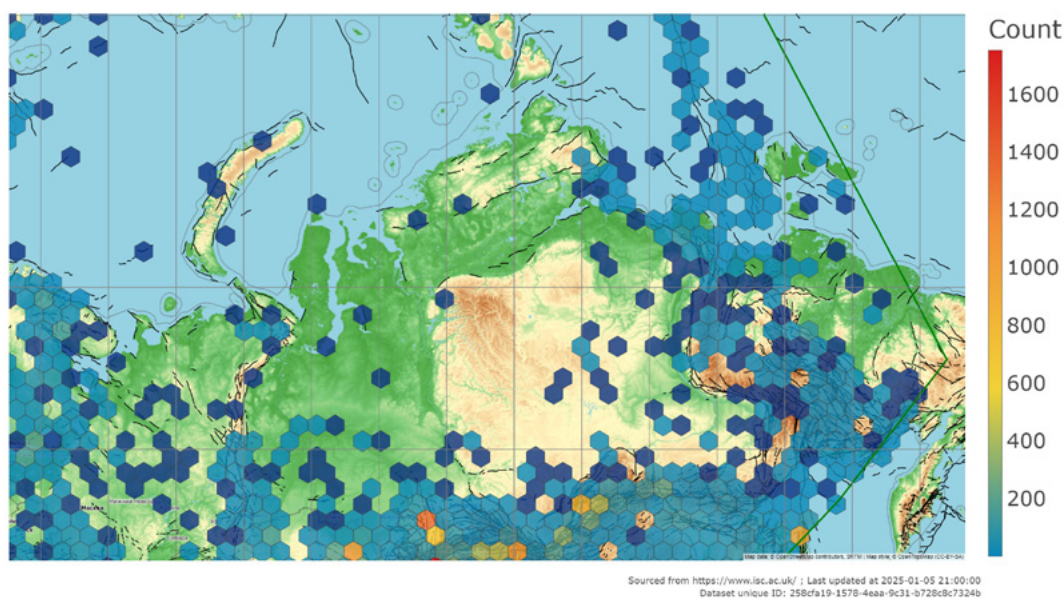
⁴⁴ Federal Research Center, Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences <http://www.ceme.gsr.ru/zr/contents.html>

Preskúmame výsledky analýzy údajov v oblasti vzostupu magmatického chochola a okrajových častí veľkých tektonických blokov, na ktoré má priamy vplyv. Keďže sibírsky kratón je považovaný za relatívne stabilnú aseizmickú platformu, výskyt aj malého počtu zemetrasení v rámci jeho hraníc sa bude javiť ako anomália.

Na obr. 44 je zobrazená hustota rozloženia zemetrasení v Rusku. V sibírskej oblasti je najväčšia koncentrácia zemetrasení prirodzene pozorovaná

v zvrásnených oblastiach: Verchojanský chrbát na východe, Gakkelov chrbát na severe, pohorie Ural na západe a Altajsko-sajanský región na juhu. Ojedinelé udalosti sú prítomné aj na samotnej Sibíri – niekoľko zemetrasení s magnitúdou okolo 4,0 bolo zaznamenaných južne od Tajmýrskeho polostrova. Pozrime sa podrobnejšie na dynamiku zemetrasení v lokalizovaných miestach v oblasti sibírskeho chochola a príľahlých regiónov.

M3+ Earthquakes Density on the Territory of Siberia



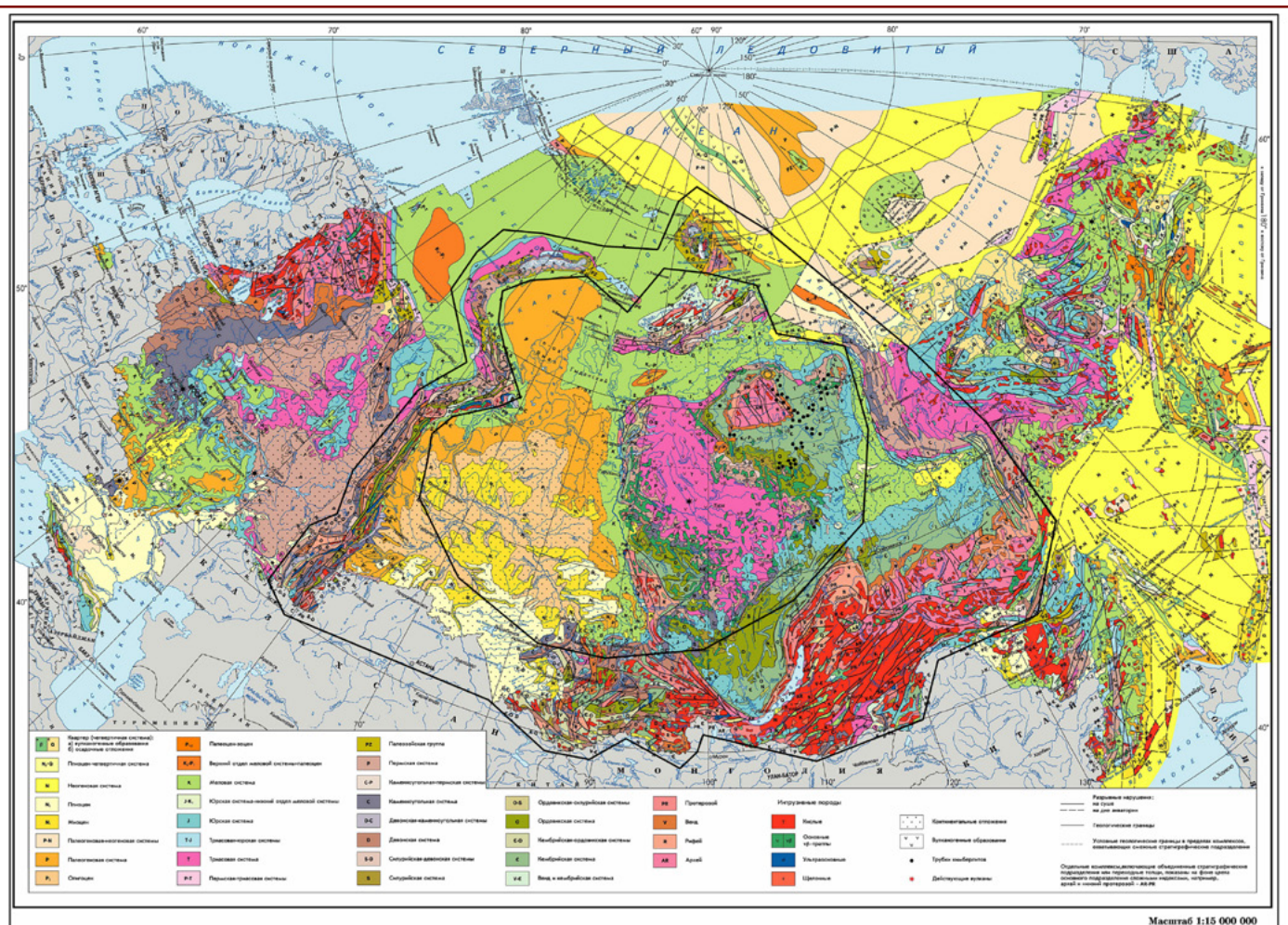
Obr. 44

Hustota zemetrasení s magnitúdou 3,0 a vyššou na Sibíri v rokoch 1990 až 2024

Zdroj: Databáza ISC

Na základe geologických štruktúr boli identifikované oblasti, kde môže mať plášťový chochol rôzny vplyv (obr. 45). Bola vybraná oblasť samotného chochola, kde môže byť vplyv spojený s prenikaním a tlakom magmy a fluidnej fázy

(magmatických plynov). V okrajových častiach východosibírskej platformy a západosibírskej platne je pravdepodobnejší vplyv chochola na seizmicitu v dôsledku destabilizácie pozície celistvých blokov zemskej kôry.



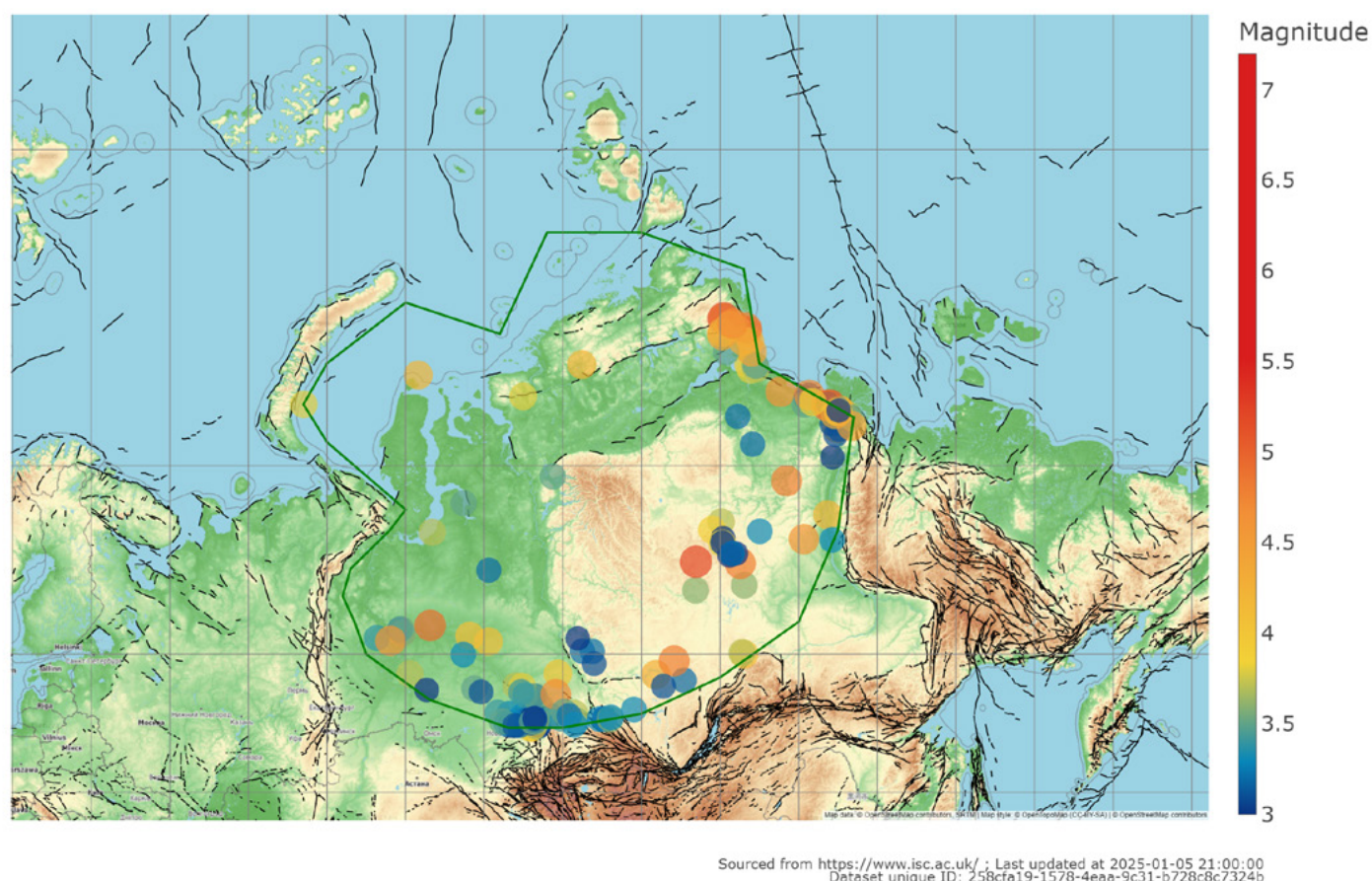
Obr. 45

Vymedzený polygón podľa geologických štruktúr v oblasti prieniku a šírenia sibírskeho chochola (vnútorný čierny mnohoúhelník) na analýzu seizmicity. Vonkajší čierny polygón zodpovedá oblasti okrajových efektov tlaku sibírskeho chochola na platne.

Pozrime sa teda na zemetrasenia v centrálnej oblasti sibírskeho chochola. Na obr. 46 je znázornená mapa lokalizácie zemetrasení s magnitúdou 3,0 a vyššou. Zemetrasenia sú registrované na juhu Tajmýrskeho polostrova. Zvlášť alarmujúce je, že nedávno, v auguste a septembri 2024, sa v tomto regióne vyskytli dve zemetrasenia s magnitúdou 3,5 a 3,8. Zemetrasenia s podobnou magnitúdou

boli zaznamenané v južnej časti Gydskeho polostrova (M3,5) a na polostrove Jamal (M3,7 a M4,2) v hĺbke 10 km. Tieto zemetrasenia boli zaznamenané v oblasti lokalizácie hlavy sibírskeho chochola, čo je alarmujúci trend, ktorý bude vysvetlený ďalej.

Zemetrasenia M3+, oblasť sibírskeho chochola



Obr. 46

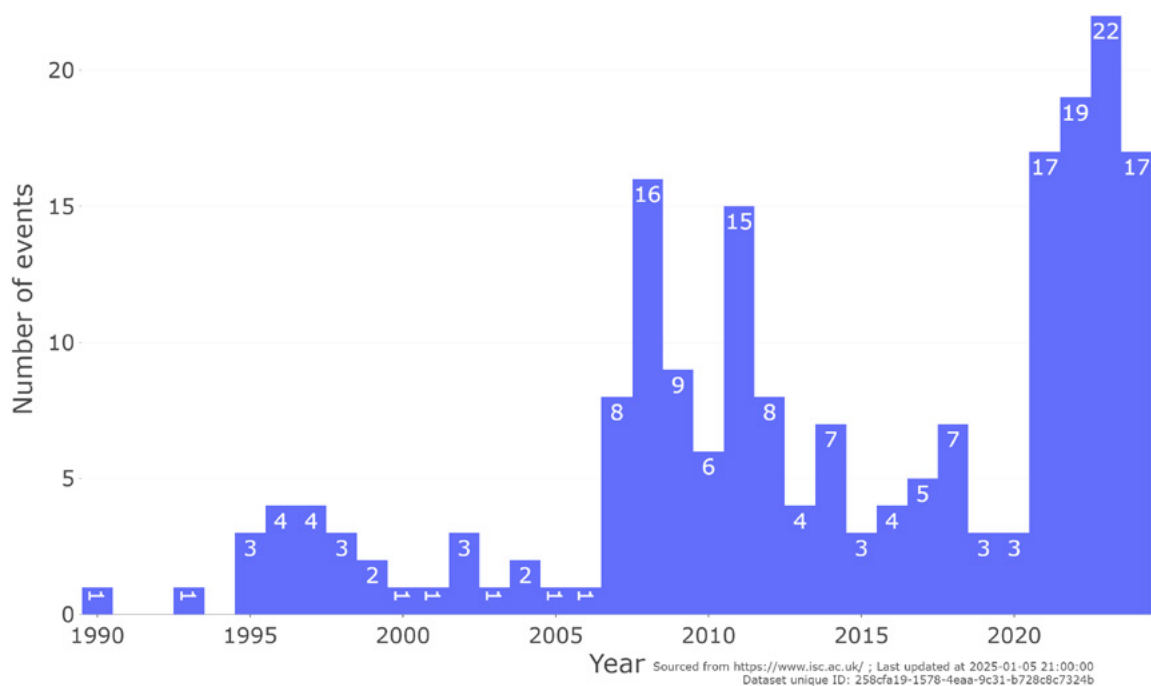
Mapa zemetrasení s magnitúdou 3,0 a vyššou v oblasti sibírskeho chochola od roku 1990 do roku 2024

Zdroj: Databáza ISC

Vo zvýraznenej oblasti sibírskeho chochola bolo od roku 1990 do roku 2024 zaznamenaných celkovo 205 zemetrasení s magnitúdou 3,0 a viac. V roku 1995 bol pozorovaný nárast počtu zemetrasení (obr. 47), čo je v súlade s celoplanetárnym trendom rastu seizmicity v roku 1995 spojeným s magmatickou aktiváciou. Od roku 2007 je pozorovaný výrazný nárast počtu zemetrasení s následným postupným

znižovaním seizmickej aktivity. Od roku 2021 počet zemetrasení opäť prudko stúpol a prekonal predchádzajúce ročné hodnoty. V oblasti sibírskeho chochola sa teda pozoruje vlnový nárast seizmickej aktivity. V posledných rokoch sa stabilne zaznamenáva výrazne viac udalostí, ako bolo predtým pre túto oblasť typické.

Zemetrasenia M3+, oblasť sibírskeho chochola



Obr. 47

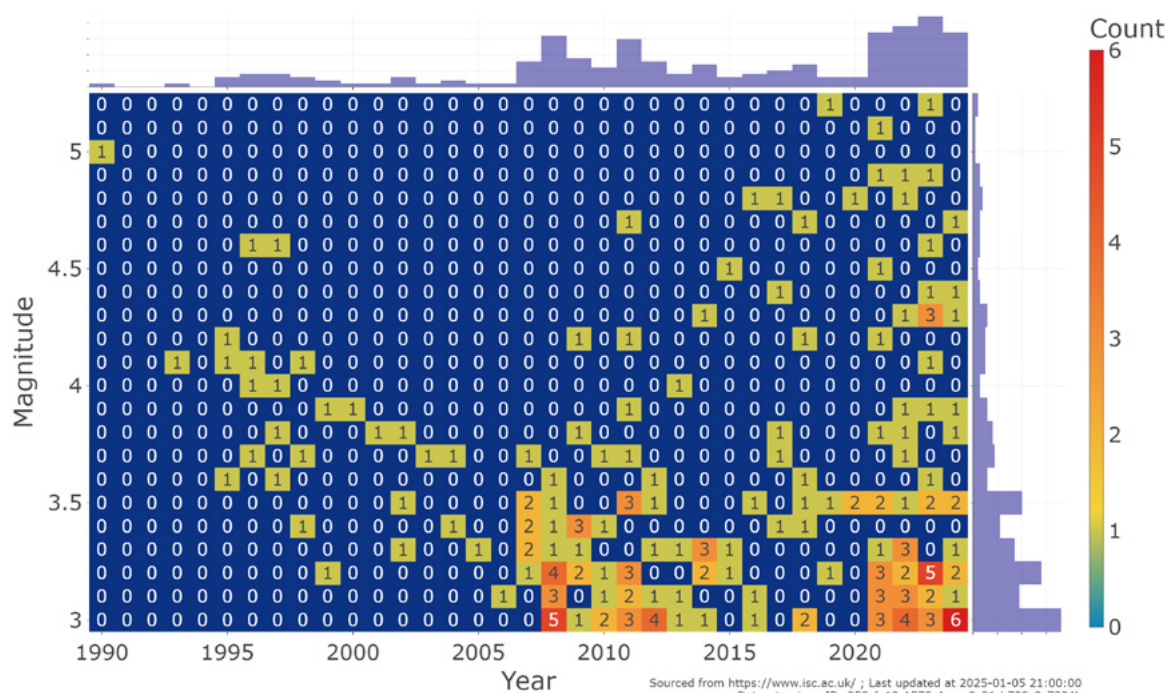
Počet zemetrasení s magnitúdou 3,0 a vyššou v oblasti sibírskeho chochola od roku 1990 do roku 2024

Zdroj: Databáza ISC

Po zemetrasení s magnitúdou 5,0 v roku 1990 bolo pozorované postupné znižovanie magnitúd a počtu zemetrasení (obr. 48). Od roku 1990 do roku 2007 boli zaznamenané len 3 zemetrasenia s magnitúdou väčšou ako 4,5. Od roku 2007 dochádza k postupnému zvyšovaniu magnitúdy zemetrasení. Prvýkrát

v zaznamenanej histórii sa od roku 2019 objavujú zemetrasenia s magnitúdou 5,1 a 5,2. Všetky zemetrasenia s magnitúdou od 4,5 sa nachádzajú v líniiach chochola (obr. 49), niektoré z nich sa nachádzajú v stabilných oblastiach, kde nie sú známe žiadne zlomy.

Zemetrasenia M3+, oblasť sibírskeho chochola

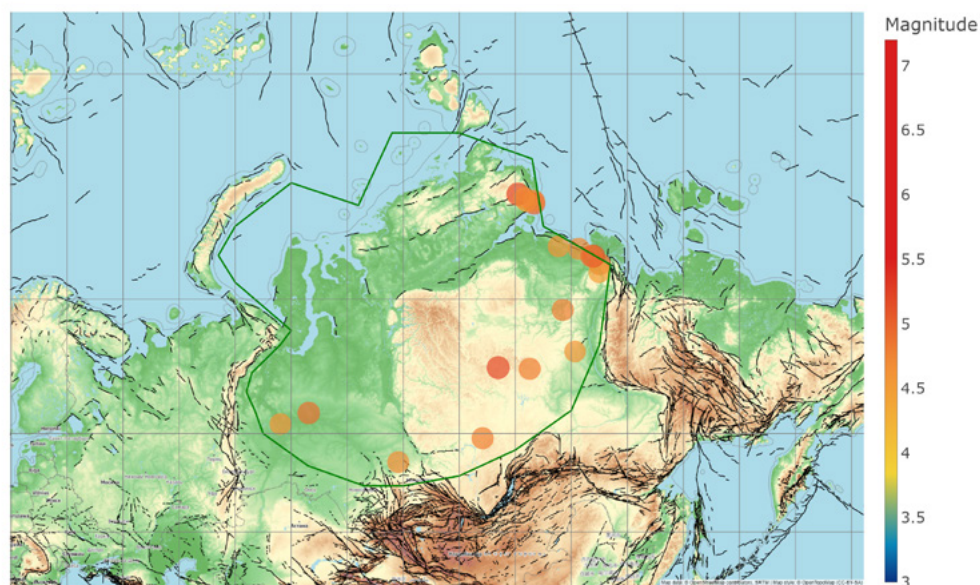


Obr. 48

Rozdelenie zemetrasení, ktoré sa vyskytli v oblasti sibírskeho chochola od roku 1990 do roku 2024 podľa magnitúdy

Zdroj: Databáza ISC

Zemetrasenia M4,5+, oblasť sibírskeho chochola



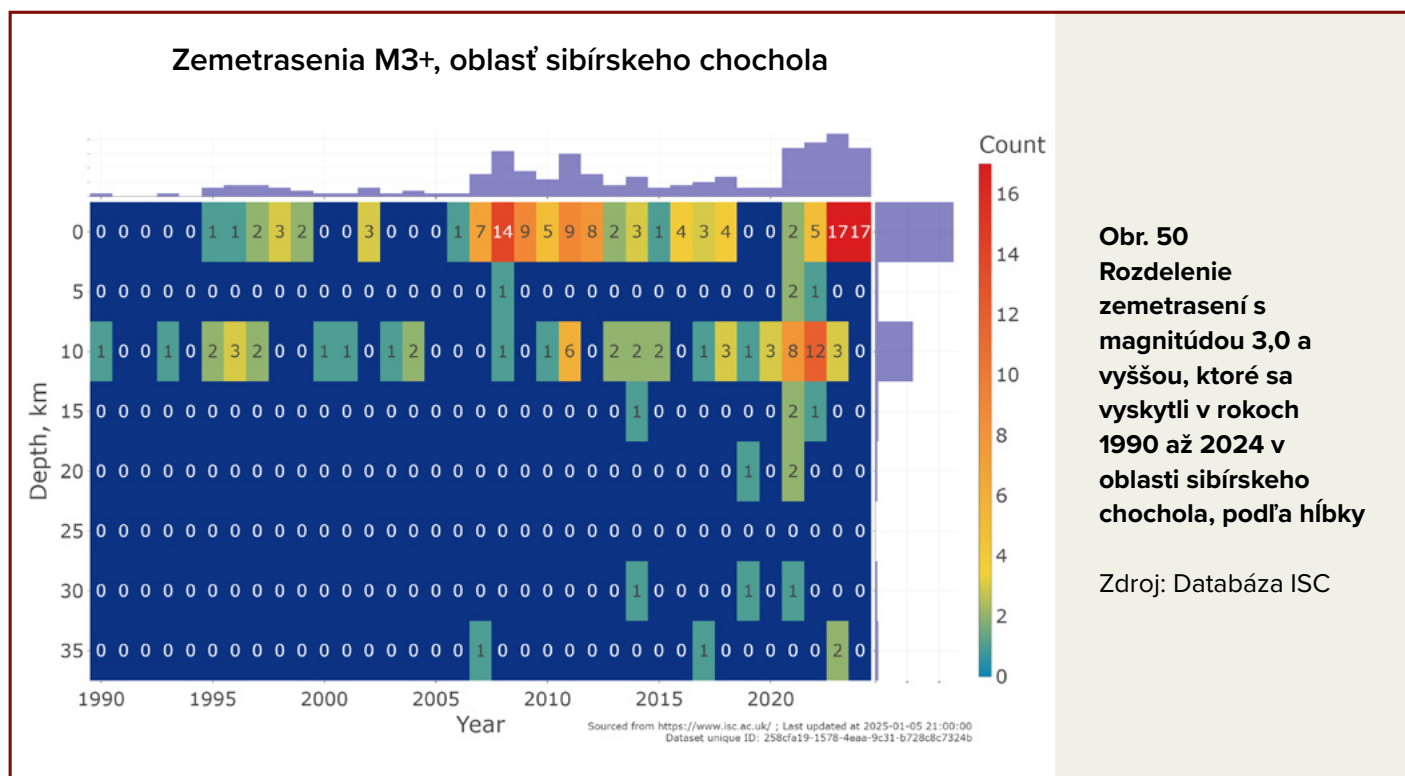
Obr. 49

Mapa zemetrasení s magnitúdou 4,5 a vyššou v oblasti sibírskeho chochola v rokoch 1990 až 2024

Zdroj: Databáza ISC

Taktiež v roku 2007 bolo prvýkrát zaznamenané zemetrasenie s magnitúdou 3,7 v hĺbke 33 km blízko rozhrania Mohorovičicovej diskontinuity – Moho (obr. 50). Po roku 2014 sa zemetrasenia v oblasti spodnej časti zemskej

kôry v hĺbke 30 – 35 km začali vyskytovať oveľa častejšie, pričom ich magnitúda dosahovala až 5,0. Všetky sa nachádzali pozdĺž periferie predpokladaného výskytu chochola.



Predložená analýza zemetrasení v oblasti predpokladanej lokality sibírskeho chochola ukazuje vlnový nárast seizmicity: rastie počet zemetrasení, ich magnitúdy sa zvyšujú a objavili sa zemetrasenia vo veľkých hĺbkach. To svedčí o procesoch deformácie platne pod vplyvom kolosálneho tlaku magmy zdola. Progresia týchto procesov nevyhnutne povedie v blízkej budúcnosti k erupcii sibírskeho chochola z nasledujúcich dôvodov.

Základňa východosibírskeho kratónu je stmelená magmatickými a metamorfovanými horninami, ktoré vytvárajú hutnú monolitickú kôru vytvorenú v dôsledku erupcií, ku ktorým

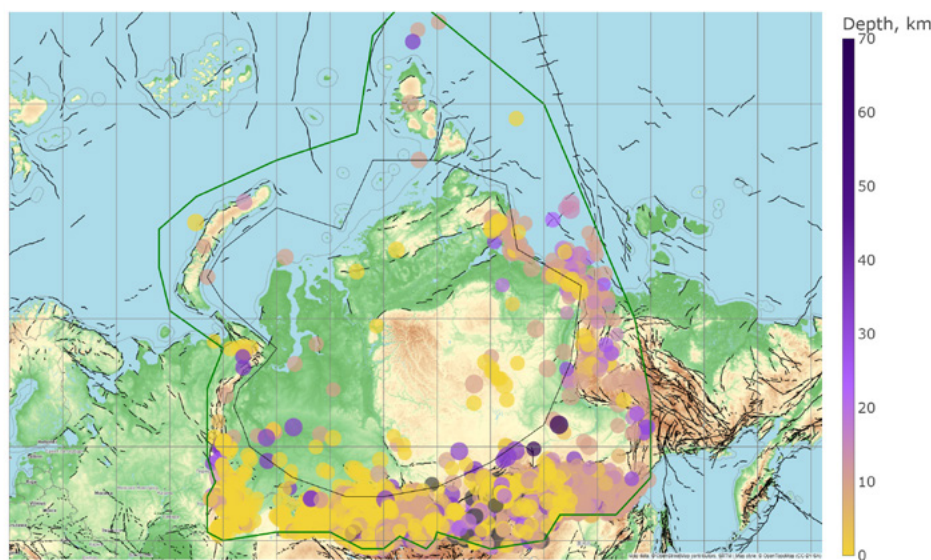
došlo pred 250 miliónmi rokov. Výskyt silných zemetrasení s magnitúdou 7,0 a vyššou v tejto oblasti bude znamenať, že v platformových štruktúrach sibírskeho kratónu dochádza k deformáciám, ktoré presahujú pevnostné limity hornín. Na pochopenie, ako môže monolitický sibírsky kratón prasknúť pôsobením tlaku chochola, sa dá uviesť príklad pukania skla tesne predtým, než sa rozbije na kúsky.

Preto by výskyt silných zemetrasení v tejto oblasti mohol signalizovať začiatok prerážania chochola na povrch doslova v priebehu jedného dňa.

V súčasnosti je pre pochopenie skutočnej situácie s postupovaním chochola a stavom odolnosti zemskej kôry v oblasti magmatického sibírskeho chochola mimoriadne potrebné inštalovať ďalšie seizmické senzory, prioritne do vrtov v hĺbke niekoľkých kilometrov. To umožní vykonať detailnú seismotomografickú analýzu zemskej kôry a plášťa a nepretržité monitorovanie polohy chochola a jeho aktivity (pozri časť „Scenár 3: Plánované kontrolované odplyňovanie (degazácia)“).

Pozornosť si zaslúži hĺbkové rozloženie zemetrasení v oblasti sibírskeho chochola a jeho okrajových zón (obr. 51). K zemetraseniam v hĺbkach blízko rozhrania Moho (viac ako 30 km) a v samotnom plášti dochádza hlavne v oblastiach vrásových systémov, pričom si možno všimnúť, že lemujú oblasť predpokladanej lokácie sibírskeho chochola.

Zemetrasenia M3,5+, oblasť sibírskeho chochola



Obr. 51

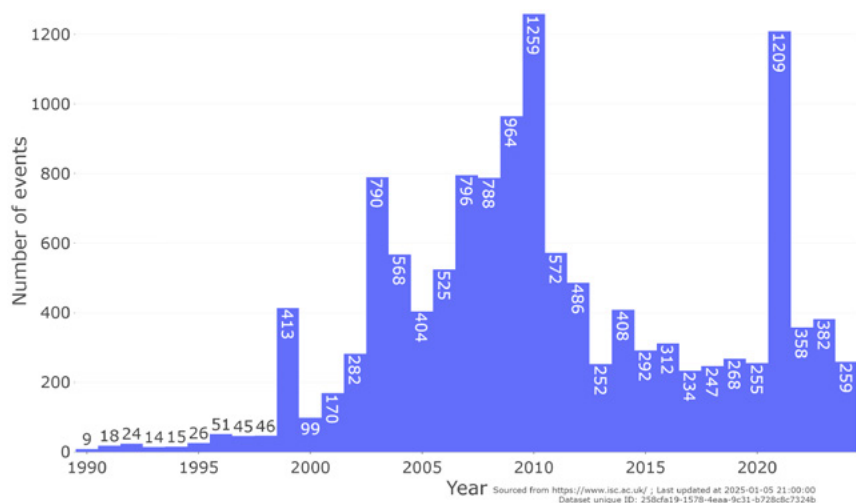
Mapa zemetrasení s magnitúdou 3,5 a vyššou v oblasti sibírskeho chochola v rokoch 1990 až 2024. Farebná škála zodpovedá hĺbke

Zdroj: Databáza ISC

Preskúmame seizmickú aktivitu iba v okrajových častiach sibírskeho chochola. Geologicky patria tieto oblasti do zvrásnených pásov, seizmicky aktívnych oblastí, ktorých seizmicita môže byť spôsobená tak tektonickými pohybmi, ako aj vplyvom magmatického chochola. Graf počtu zemetrasení ukazuje zmiešaný obraz prekrytia rôznych faktorov seizmicity (obr. 52). V niektorých rokoch sú viditeľné výrazné nárasty seizmickej aktivity. Pre presnejšie pochopenie podstaty týchto procesov je potrebné posúdiť každý región samostatne.

Pri pohľade na zónu Verchojanských vrásových štruktúr a zlomov na dne mora Laptevovcov (obr. 53) vidíme, že k výrazným nárastom zemetrasení s magnitúdou od 3,0 došlo v roku 2013 a v rokoch 2021 – 2022 (obr. 54). Takéto prudké nárasty sú charakteristické pre štádiá prenikania magmy, ktoré spôsobujú výrazné narušenie celistvosti zemskej kôry a výstup fluidnej fázy cez trhliny v horninách a blízke zlomy. Takéto prejavy sú sprevádzané aj nárastom počtu zemetrasení s nízkymi magnitúdami a vznikom zemetrasných rojov, niekedy aj sérií rojov.

Zemetrasenia M3+ v okrajových častiach sibírskeho chochola

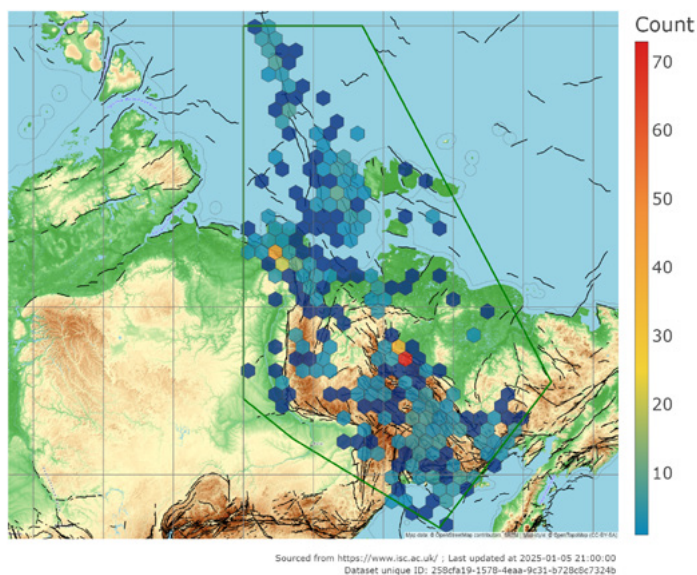


Obr. 52

Počet zemetrasení s magnitúdou 3,0 a vyššou v okrajových častiach sibírskeho chochola od roku 1990 do roku 2024. Vylúčené boli zemetrasenia vo vnútri polygónu (obr. 47)

Zdroj: Databáza ISC

Hustota zemetrasení M3+, severovýchodná časť

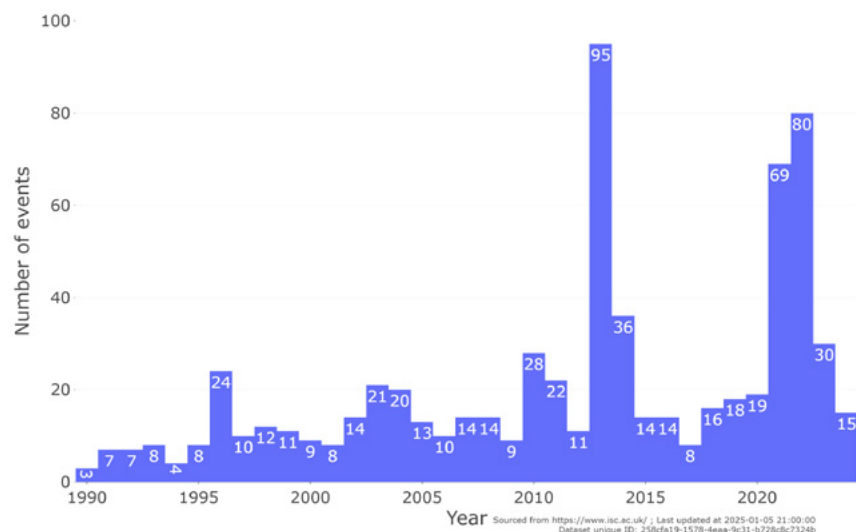


Obr. 53

Hustota zemetrasení s magnitúdou od 3,0 vo vybranej oblasti severovýchodného okraja sibírskeho bloku zemskej kôry v rokoch 1990 až 2024. Čiernou farbou sú znázornené zlomové línie

Zdroj: Databáza ISC

Hustota zemetrasení M3+, severovýchodná časť



Obr. 54

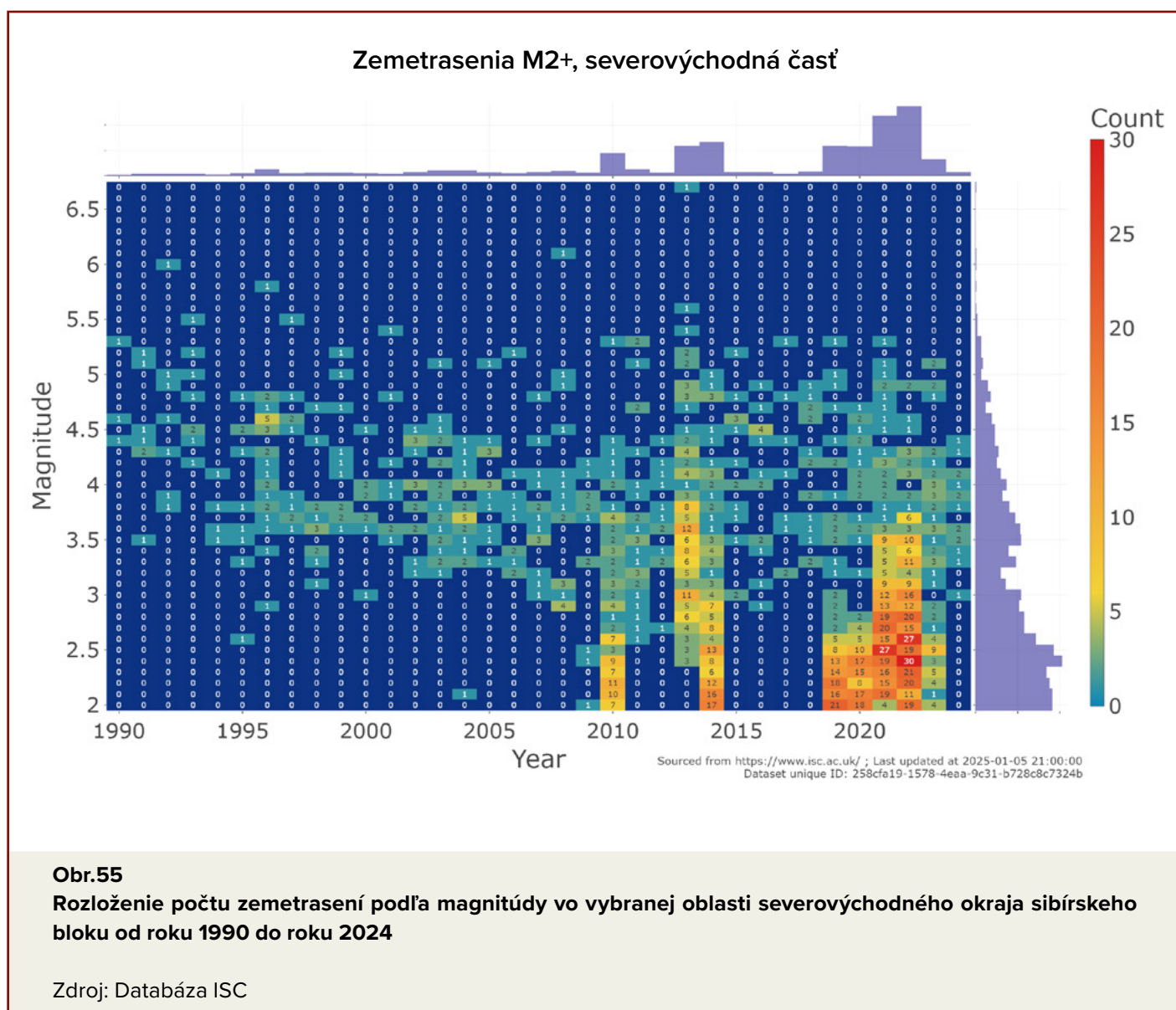
Graf počtu zemetrasení s magnitúdou 3,0 a vyššou vo vybranej oblasti severovýchodného okraja sibírskeho bloku v rokoch 1990 až 2024.

Zdroj: Databáza ISC

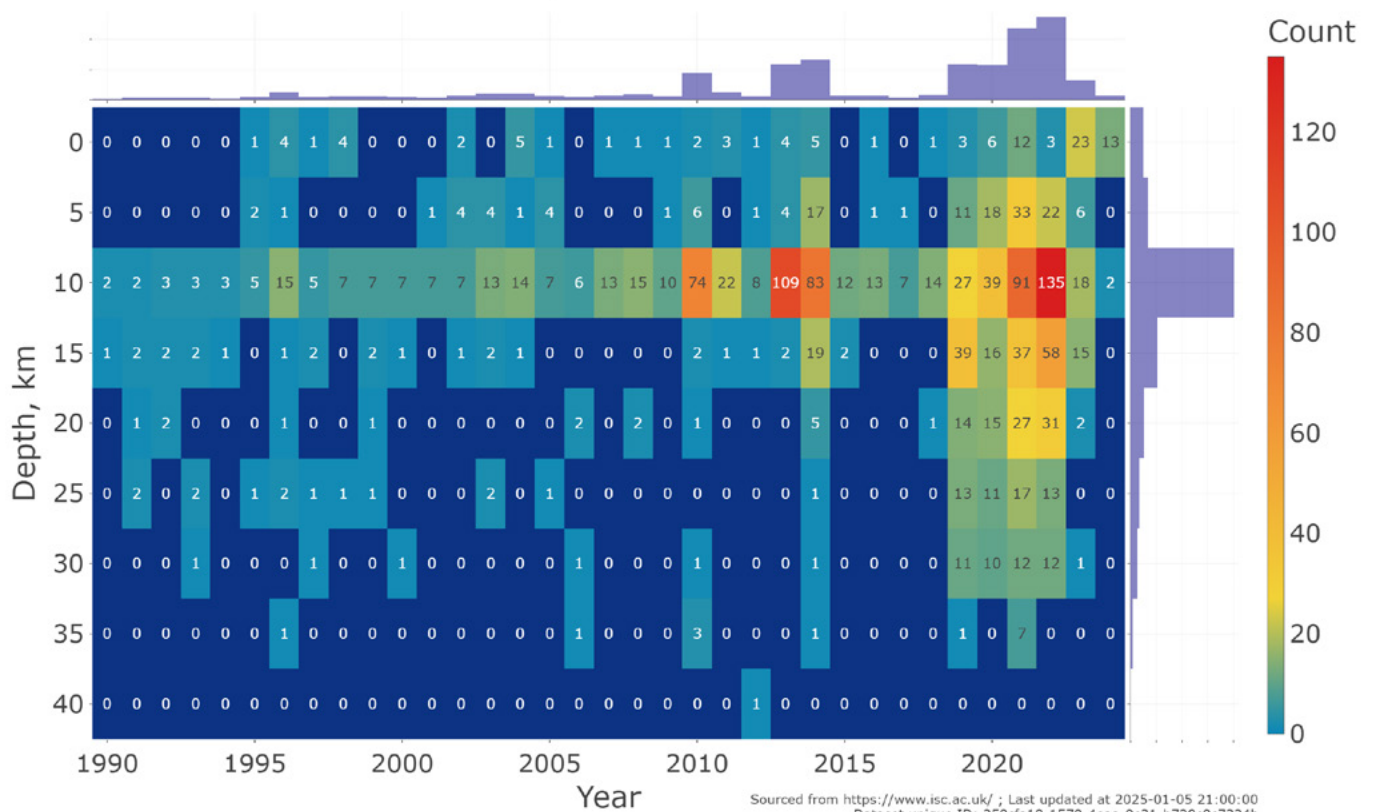
Štúdium magnítud zemetrasení v tejto oblasti ukazuje prudký nárast počtu zemetrasení s magnítudou 2,0 až 3,5 v rokoch 2010 a 2013 – 2014 a výrazný nárast ich počtu od roku 2019 (obr. 55). Od roku 2019 taktiež výrazne vzrástol počet zemetrasení, ktoré postihujú zemskú kôru takmer po základňu, do hĺbky 35 km (obr. 56). V roku 2013 došlo v regióne k prvému

zemetraseniu s magnítudou 6,7, čo jasne svedčí o dlhom období hromadenia tlaku alebo o uvoľňovaní nahromadených magmatických fluid.

Osobitne sa zamerajme na skupinu zemetrasení juhovýchodne od Tajmýrskeho polostrova (obr. 57).



Zemetrasenia M2+, severovýchodná časť

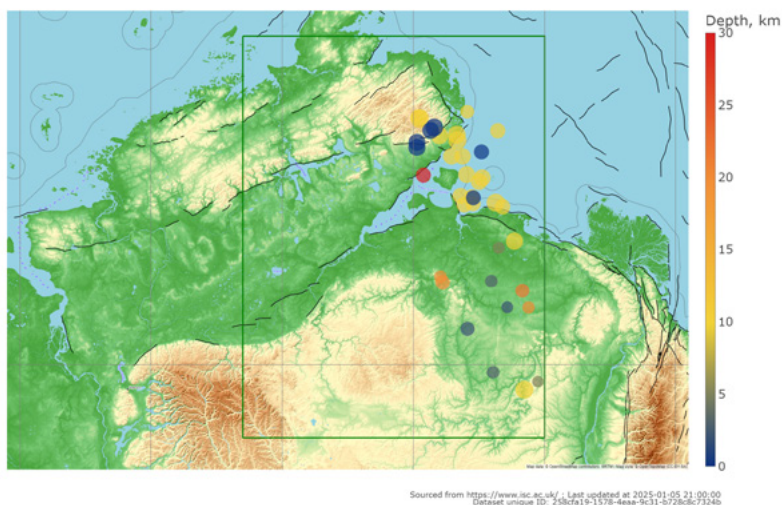


Obr. 56

Rozdelenie počtu zemetrasení s magnitúdou 2,0 a vyššou podľa hĺbky vo vybranej oblasti severovýchodného okraja sibírskeho bloku od roku 1990 do roku 2024

Zdroj: Databáza ISC

Zemetrasenia M2+, severovýchodne od polostrova Tajmýr



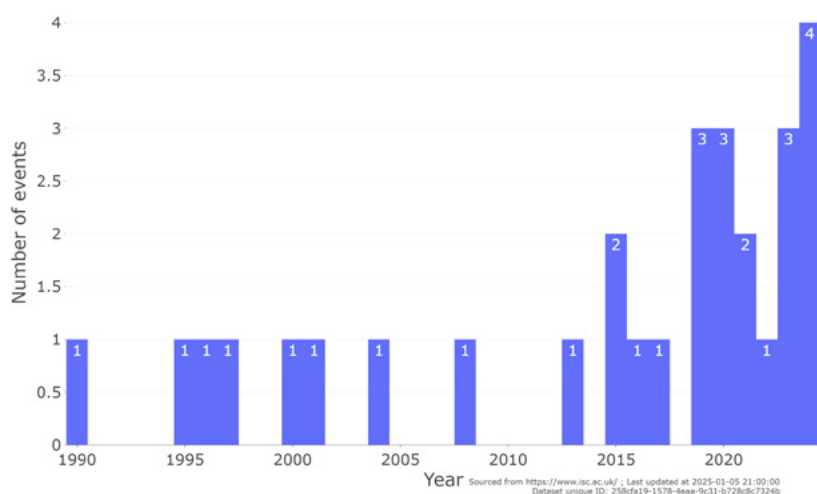
Obr. 57

Mapa rozloženia zemetrasení s magnitúdou od 2,0 vo vybranej oblasti severovýchodne od Tajmýrskeho polostrova v rokoch 1990 až 2024

Zdroj: Databáza ISC

V rokoch 2019 – 2020 tu takisto došlo k prudkému nárastu seizmickej aktivity malých a stredných magnitúd (obr. 58, 59).

Zemetrasenia M3+, severovýchodne od polostrova Tajmýr

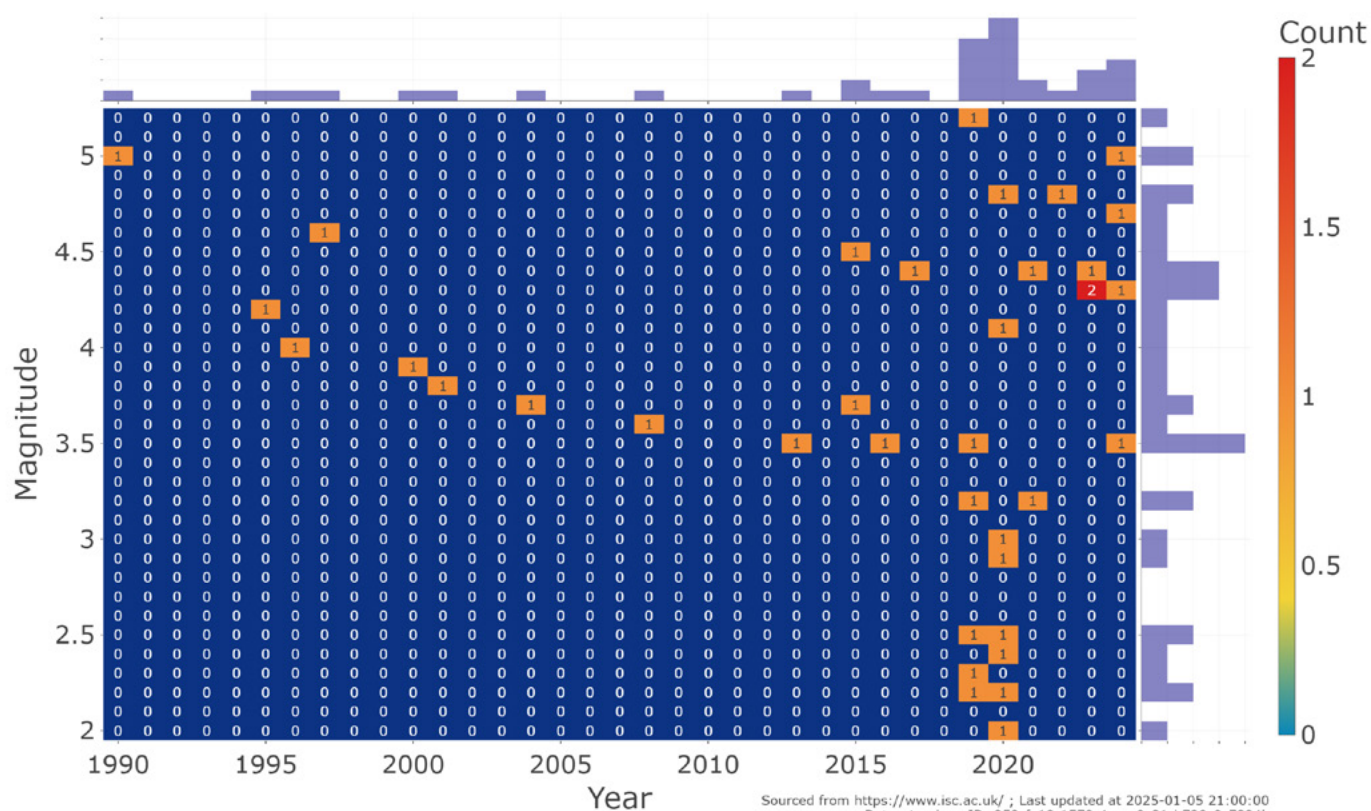


Obr. 58

Graf počtu zemetrasení s magnitúdou 3,0 a vyššou vo vybranej oblasti severovýchodne od Tajmýrskeho polostrova

Zdroj: Databáza ISC

Zemetrasenia M2+, severovýchodne od polostrova Tajmýr



Obr. 59

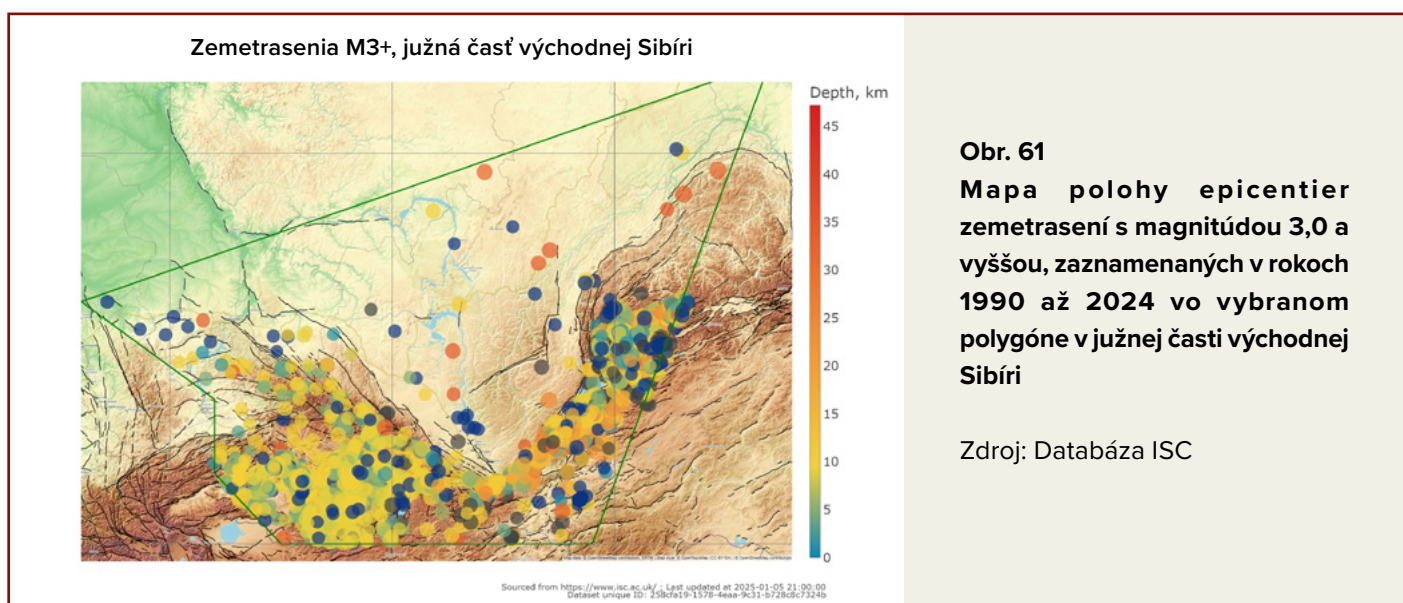
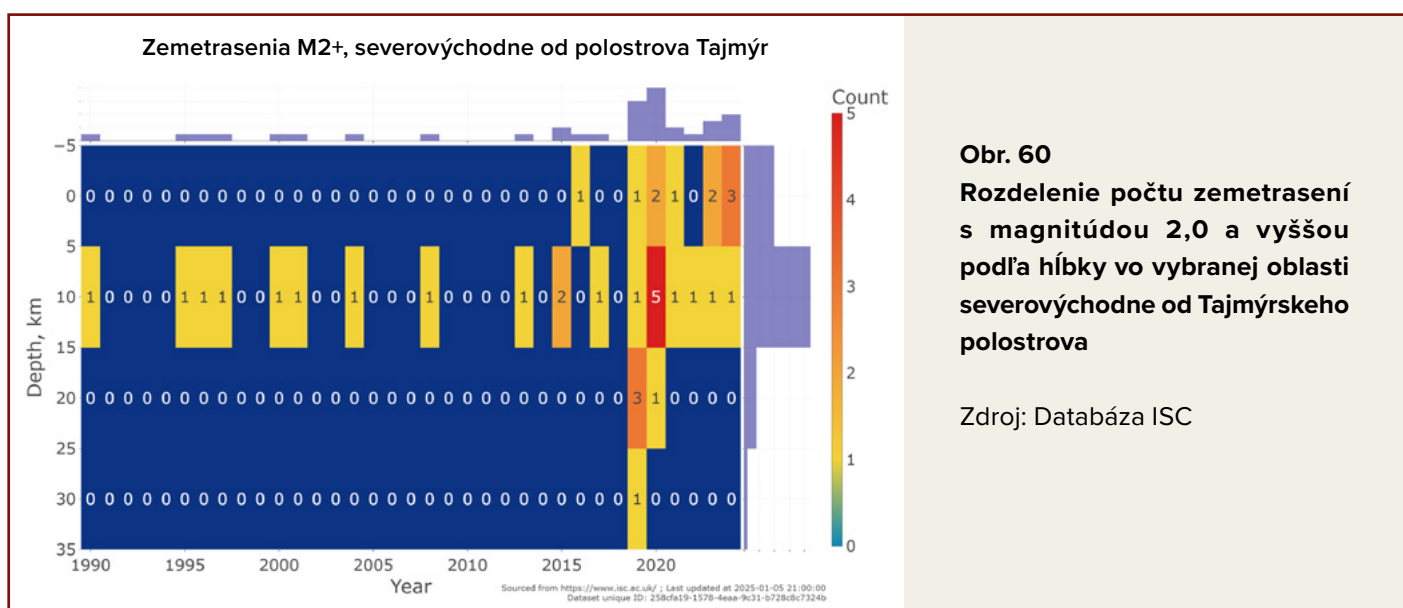
Rozdelenie počtu zemetrasení podľa magnitúdy vo vybranej oblasti severovýchodne od Tajmýrskeho polostrova od roku 1990 do roku 2024

Zdroj: Databáza ISC

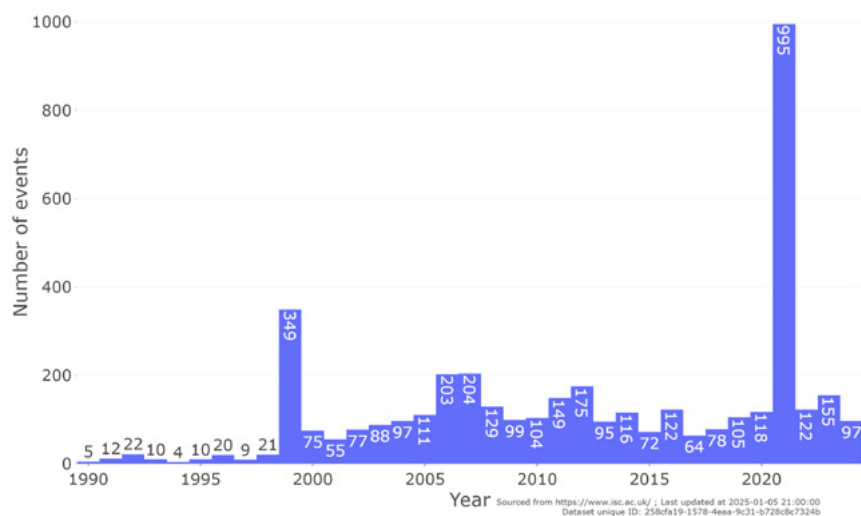
V rokoch 2019 – 2020 je tiež pozorovaný nárast hĺbky výskytu zemetrasení až po základňu zemskej kôry v rovnakých časových úsekoch ako v oblasti Verchojanskej vrásovej štruktúry (obr. 60).

Je potrebné zdôrazniť, že táto zóna sa nachádza v oblasti vplyvu hlavy sibírskeho chochola, a napriek malému počtu zemetrasení vykazuje podobný trend zväčšovania hĺbky a počtu zemetrasení ako aj vo Verchojanských vrásových štruktúrach, ale iba od roku 2019.

Južná časť skúmaného územia zahŕňa Altajsko-Sajanské vrásové pásmo a oblasť Bajkalu (obr. 61). Ide o tektonicky nestálu a seizmicky aktívnu oblasť. V rokoch 1999 a 2021 tu došlo k prudkému nárastu zemetrasení (obr. 62). Magnitúda zemetrasení začína od roku 2007 rásť, v roku 2021 dokonca dosiahla 6,8 (obr. 63).



Zemetrasenia M3+, južná časť východnej Sibíri

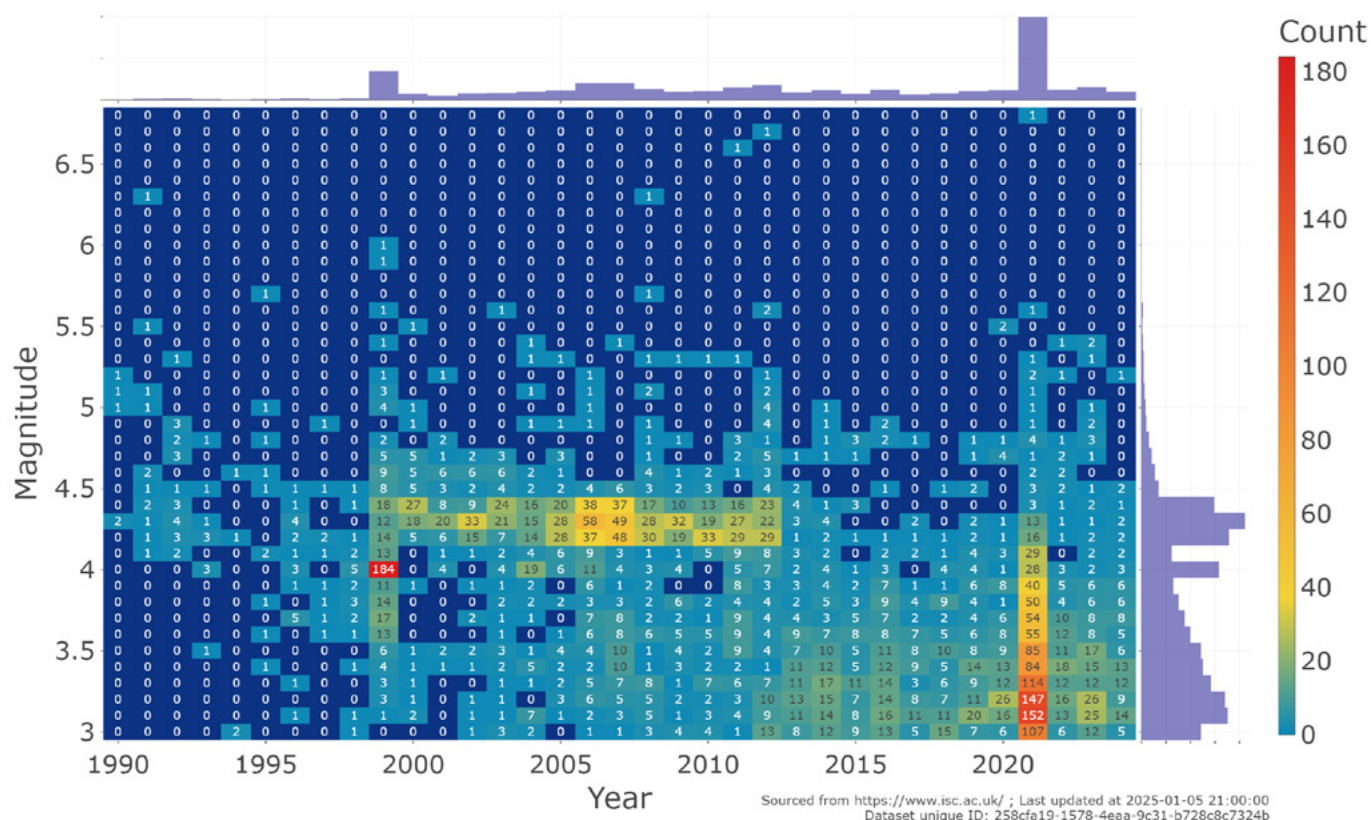


Obr. 62

Počet zemetrasení s magnitúdou 3,0 a vyššou na teritóriu južnej časti východnej Sibíri

Zdroj: Databáza ISC

Zemetrasenia M3+, južná časť východnej Sibíri



Obr. 63

Rozloženie zemetrasení vo vybranom polygóne v južnej časti východnej Sibíri v rokoch 1990 až 2024 podľa magnitúdy

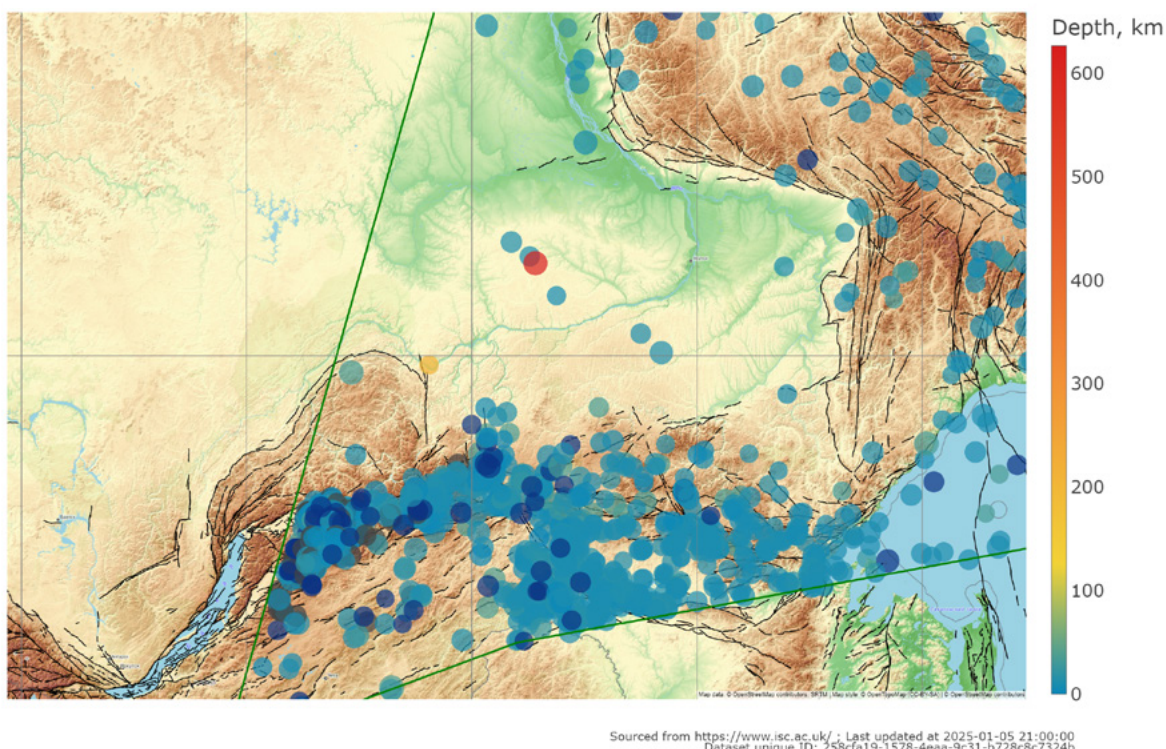
Zdroj: Databáza ISC

Dôležité je zmieniť sa o výskyte plášťových zemetrasení pod sibírsym kratónom. V roku 1998 bolo v oblasti Viljujskej syneklízy zaznamenané zemetrasenie s magnitúdou 3,3 v hĺbke 211 km. Bol to prekvapivý fakt, ale oveľa unikátnejšou udalosťou bolo zemetrasenie s magnitúdou 5,1 v hĺbke až 627 km v roku 2023 v tej istej oblasti (obr. 64).

Prejav seizmicity s hlbokým ohniskom pod platformovým stabilným blokom zemskej kôry je sám o sebe unikátnou udalosťou. Tradične sa predpokladá, že k takýmto vnútroplášťovým zemetraseniam dochádza pozdĺž takzvaných subdukčných zón, ale najbližšia takáto zóna sa nachádza odtiaľto tisíce kilometrov ďaleko a nemôže mať žiadny vplyv.

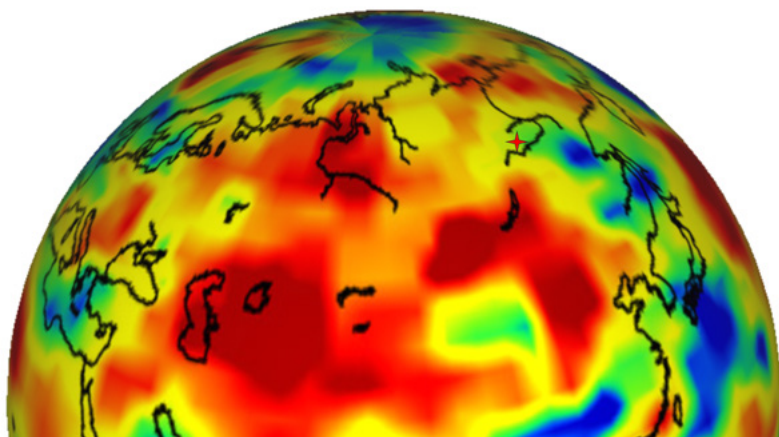
Autori správy sa domnievajú, že príčinami zemetrasení s hlbokým ohniskom sú obrovské vnútroplášťové výbuchy, ku ktorým dochádza, keď sa relatívne horúcejšie prúdy magmy dostanú do kontaktu s relatívne chladnejšími prúdmi. Podľa seizmotomografického modelu sú v mieste výskytu oboch zemetrasení s hlbokým ohniskom pozorované anomálie rýchlostí seizmických vĺn zodpovedajúce relatívne viskóznnejším a tekutejším prúdom, čo pravdepodobne odráža ich teplotné rozdiely. K týmto dvom plášťovým zemetraseniam teda došlo v miestach kontaktu relatívne studených a relatívne horúcich plášťových prúdov (obr. 65), čo spôsobilo uvoľnenie veľkého množstva energie, ktoré generovalo akustické vlny zaznamenané seizmickými senzormi ako zemetrasenia. To jasne poukazuje na výraznú aktivitu plášťových prúdov v tejto oblasti.

Poloha zemetrasení s hlbokým ohniskom na Sibíri



Obr. 64

Mapa zobrazuje epicentrum zemetrasenia s hlbokým ohniskom s magnitúdou 5,1 v hĺbke 627 km (červená značka) pod sibírskou platformou v roku 2023 a zemetrasenia M3,3 v hĺbke 211 km v roku 1998 (žltá značka)



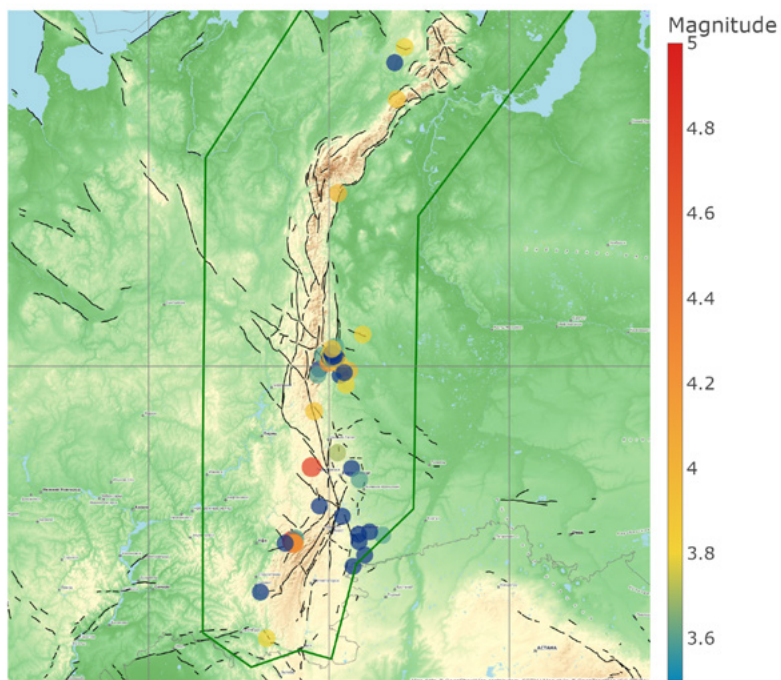
Obr. 65

Zóny nižších rýchlostí prechodu seizmických vln v plášti v hĺbke okolo 600 km. Hypocentrum zemetrasenia s magnitúdou 5,1 v roku 2023 spadá do zóny kontaktu relatívne horúcich a relatívne chladných oblastí plášťa

Zdroj: <https://members.elsi.jp/~hiroki.ichikawa/gst/gallery/gallery.html>

Rozkmitávanie okrajových častí sibírskeho bloku vyvoláva rast seizmickej aktivity v oblasti Uralu. Údaje pre analýzu boli odfiltrované so zohľadnením otrasov spôsobených banskou činnosťou. Taktiež bola zvolená magnitúda

od 3,5, aby boli spoľahlivo vylúčené udalosti spojené s ľudskou činnosťou (obr. 66, 67). Pozorovaný vlnovitý nárast seizmicity preto odráža prirodzené procesy.

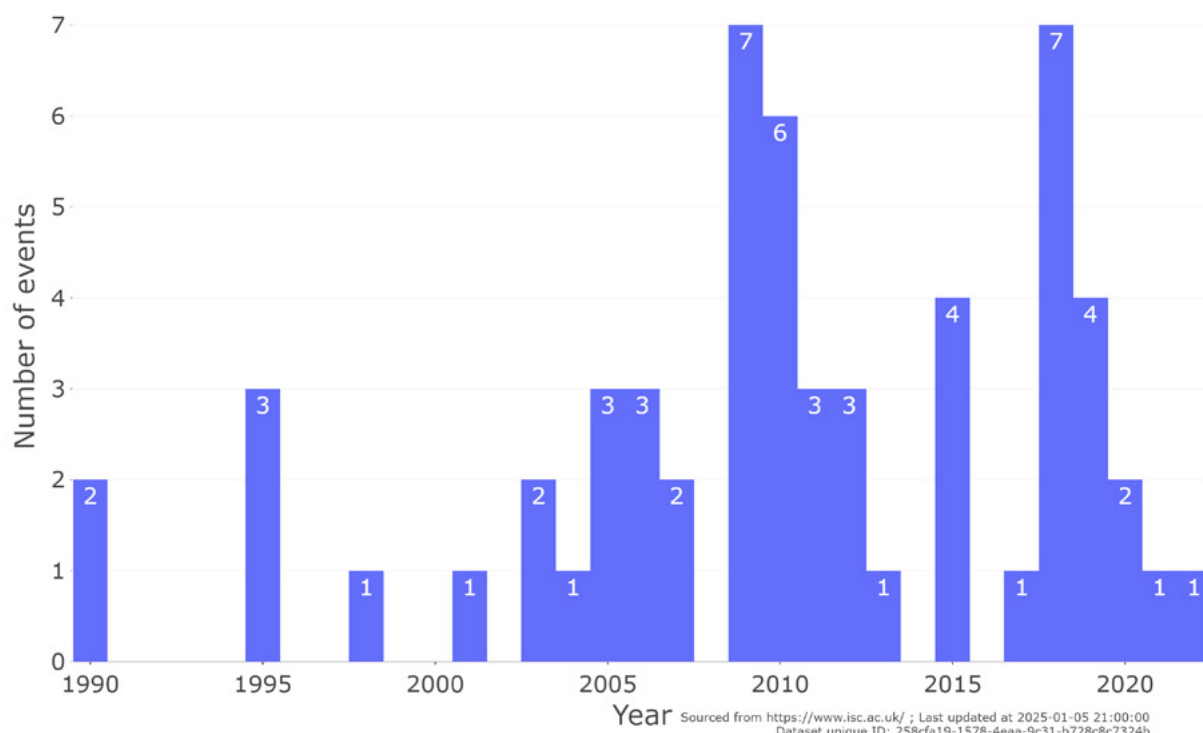


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> : Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

Obr. 66

Mapa rozmiestnenia epicentier zemetrasení s magnitúdou 3,5 a vyššou, zaznamenaných v oblasti Uralu v rokoch 1990 až 2022

Zemetrasenia M3,5+ na Urale



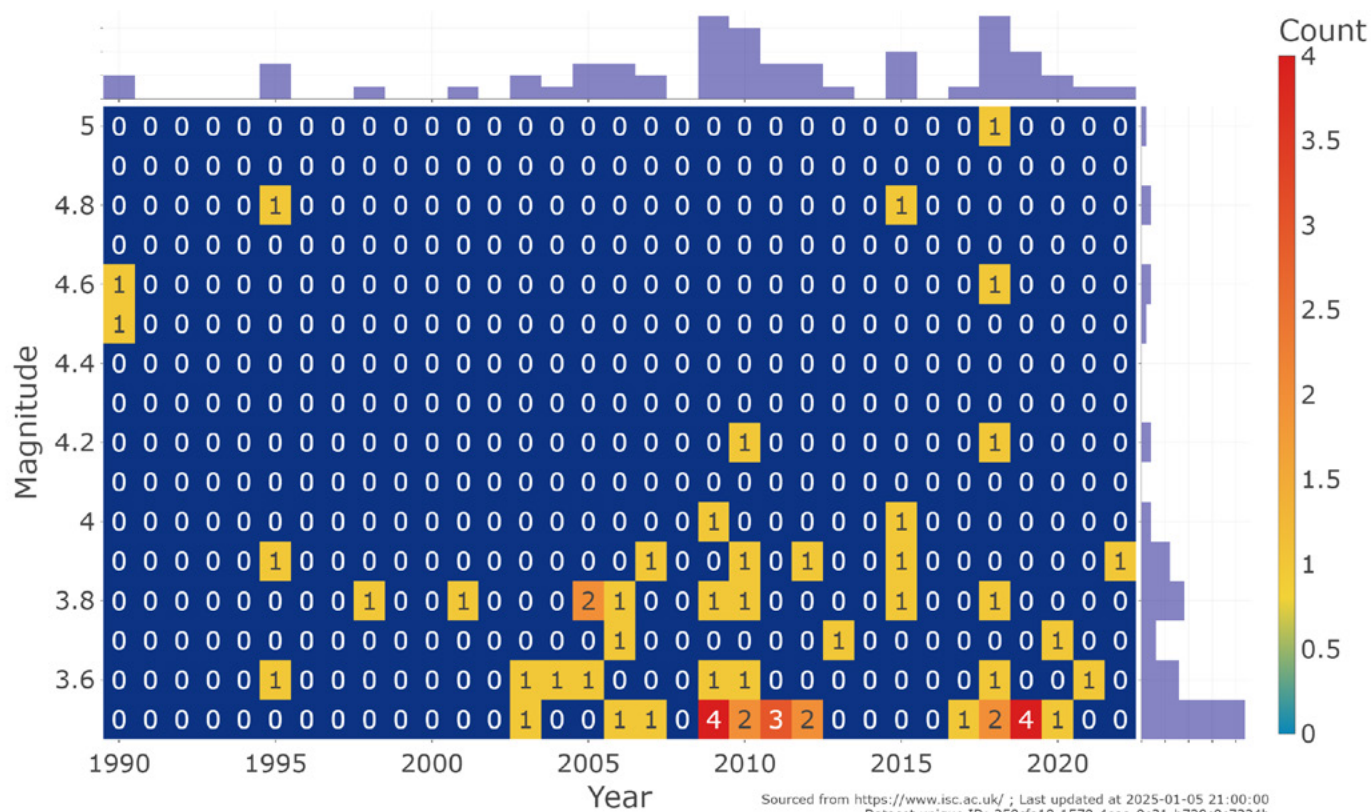
Obr. 67

Počet zemetrasení s magnítudou 3,5 a vyššou zaznamenaných v oblasti Uralu od roku 1990 do roku 2022

Okrem toho tu došlo k zemetraseniam s magnítudou od 4,0 do 5,0, čo je tiež indikátorom prirodzeného nárastu zemetrasení (obr. 68).

Nárast seizmicity v oblasti Uralu neprebieha systematicky, ale vo vlnách, čo je prirodzenou zákonitosťou.

Zemetrasenia M3,5+ na Urale



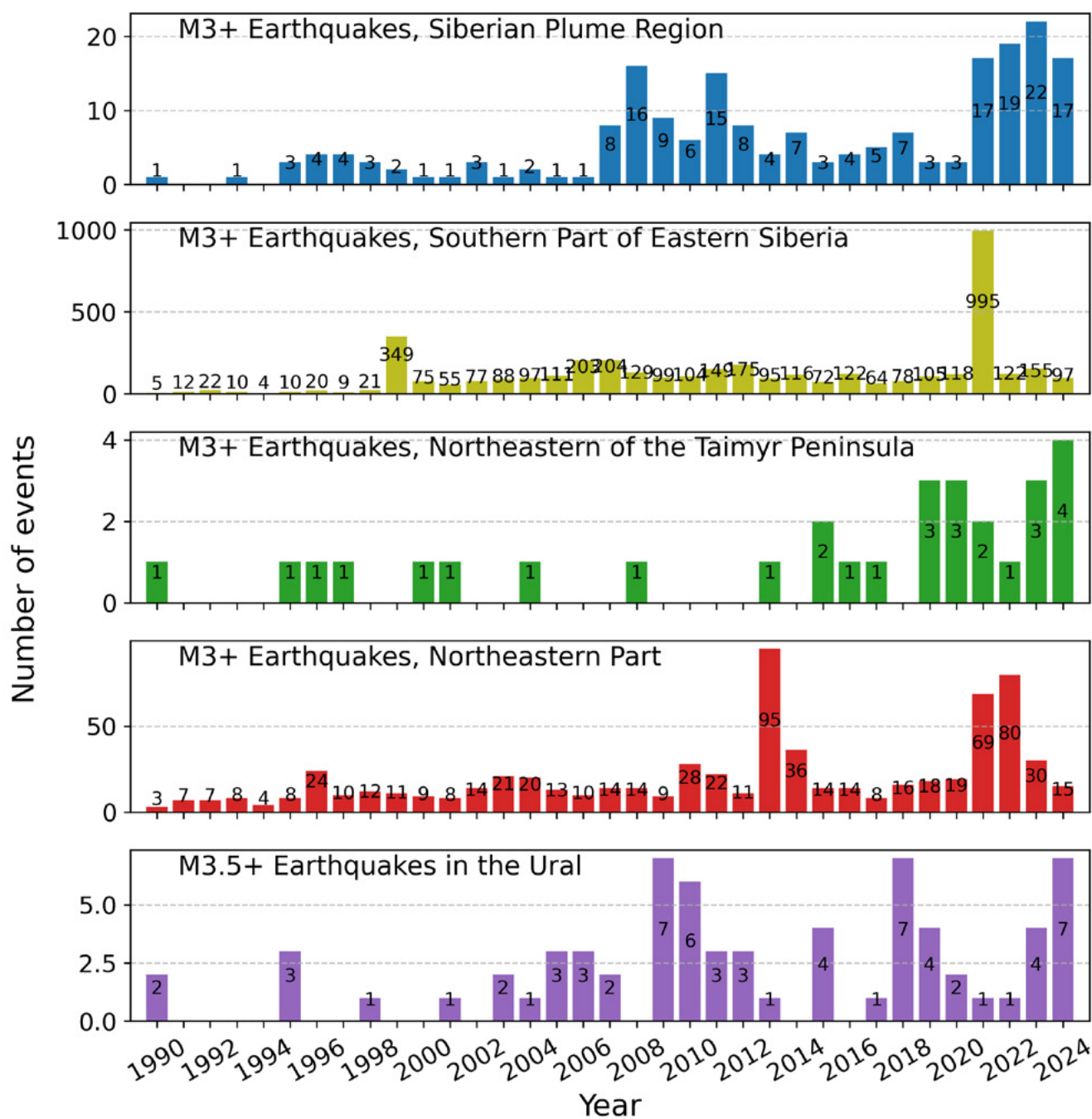
Obr. 68

Rozdelenie zemetrasení zaregistrovaných v oblasti Uralu od roku 1990 do roku 2022 podľa magnitúdy

Zdroj: Databáza ISC

Porovnanie časových vrcholov seizmickej aktivity v rôznych častiach oblasti sibírskeho chochola a okolo neho je znázornené na grafe na obr. 69. V roku 2021 dochádza k rastu seizmickej aktivity vo všetkých pozorovaných regiónoch okrem Uralu. Na grafe vidieť, že vo všetkých regiónoch dochádza k seizmickej aktivite, a v posledných rokoch sa zvyšuje. Rast neprebieha súčasne, ale vo vlnách a pulzujúcich vzplanutiach na rôznych miestach. Pozoruje sa pritom určitá zákonitosť, pripomínajúca postupné rozkmitávanie platne v smere zo západu na východ a zo severu na juh.

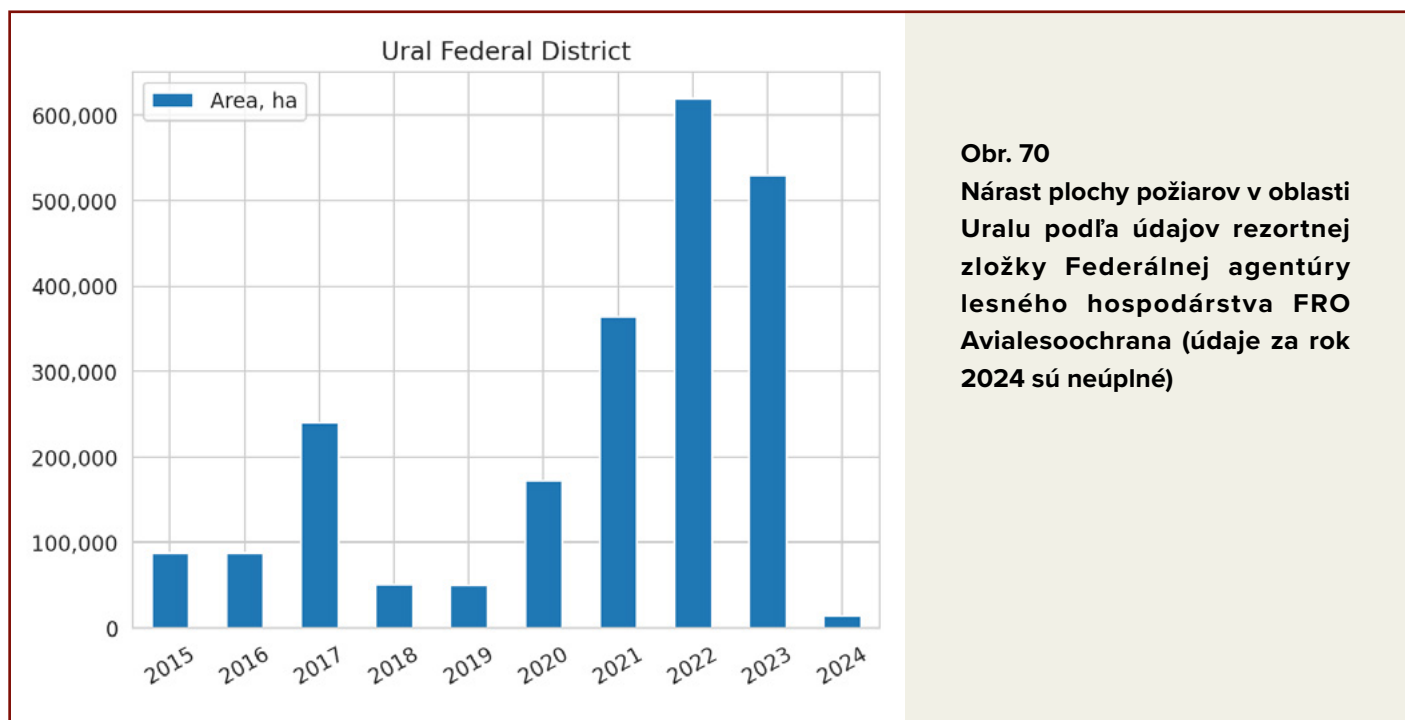
Pozrime sa na prejavy lesných požiarov v niektorých regiónoch. Zväčšovanie plochy požiarov indikuje rast aktivity útrob, pretože požiare často vznikajú na miestach zlomov, kde dochádza k únikom horľavých plynov. Takéto požiare sa ťažko hasia a extrémne rýchlo sa šíria na veľké plochy. V oblasti Uralu je pozorovaný prudký nárast plochy prírodných požiarov od roku 2020 (obr. 70). Graf je vypracovaný na základe údajov Federálnej rozpočtovej organizácie Avialesoochraňa, patriacej pod Federálnu agentúru lesného hospodárstva Rosleschoz.



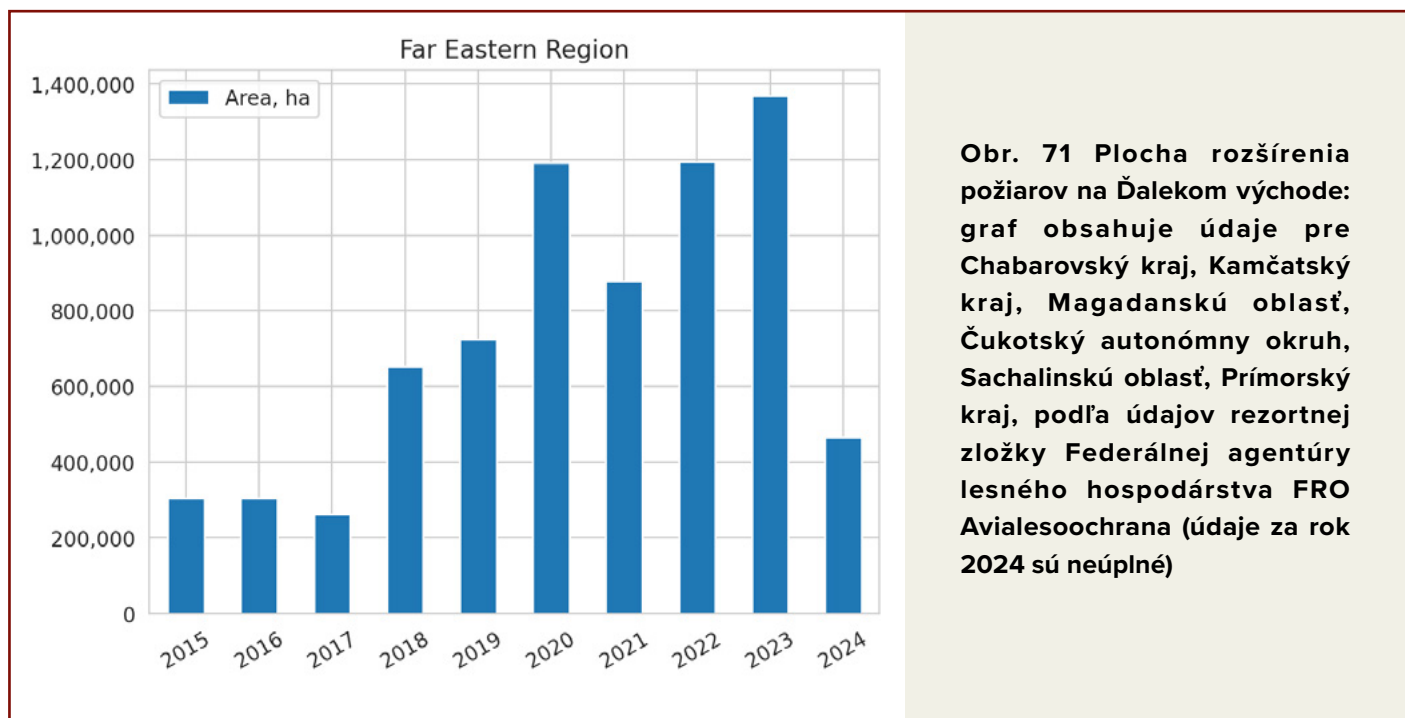
Obr. 69

Rozloženie vrcholov seizmickej aktivity vo Verchojanskej oblasti (východne od Sibírskej platformy), v južnej časti východnej Sibíri, na Urale (západne od východnej Sibíri) a v centrálnej časti Sibíri (vrátane západosibírskej platne a východosibírskej platformy) podľa rokov. Zemetrasenia s magnitúdou 3,0 a vyššou

Zdroj: Databáza ISC



Plocha zasiahnutá požiarom v regióne Ďalekého východu tiež exponenciálne rastie, čo jasne ukazuje graf na obr. 71.

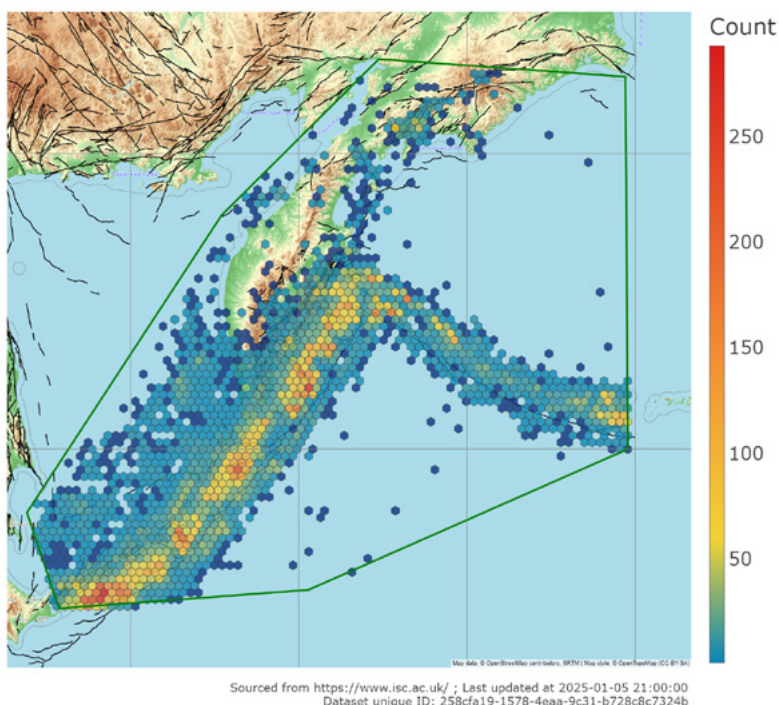


K podobným procesom nárastu požiarov takto dochádza aj na druhej strane sibírskeho a ďalekovýchodného bloku zemskej kôry, na hranici s Tichooceánskou platňou.

Predpokladá sa, že prenikanie sibírskeho chochola ovplyvňuje aj Kurilsko-Kamčatský región ako koncovú oblasť bloku kontinentálnej kôry, vystavenú tlaku chochola. Analýza súboru seizmických údajov v oblasti Kamčatky a

Kurilských ostrovov ukazuje citeľný nárast počtu zemetrasení s magnitúdou 4,0 a vyššou (obr. 72, 73). Región je súčasťou Tichooceánskeho ohnivého kruhu (obr. 74), a preto vykazuje trend zvyšovania seizmicity v súlade s tendenciami tejto tektonickej štruktúry. Väčšina prudkých nárastov seizmicity má však nezávislý charakter. To môže naznačovať, že sibírsky chochol má svoj vlastný vplyv na región Kamčatky a Kurilských ostrovov.

**Hustota zemetrasení M4+
v regióne polostrova Kamčatka a Kurilských ostrovov**

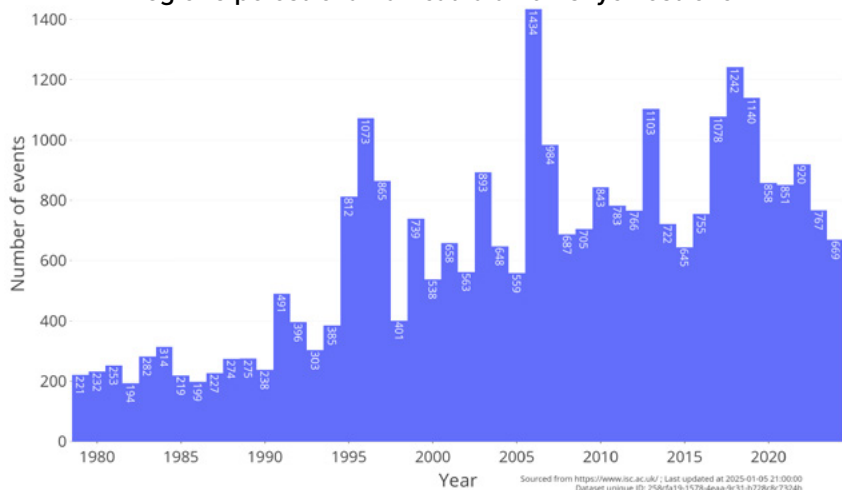


Obr. 72

Hustota zemetrasení s magnitúdou 4,0 a vyššou v regióne polostrova Kamčatka a Kurilských ostrovov za roky 1979 – 2024

Zdroj: Databáza ISC

**Hustota zemetrasení M4+
v regióne polostrova Kamčatka a Kurilských ostrovov**

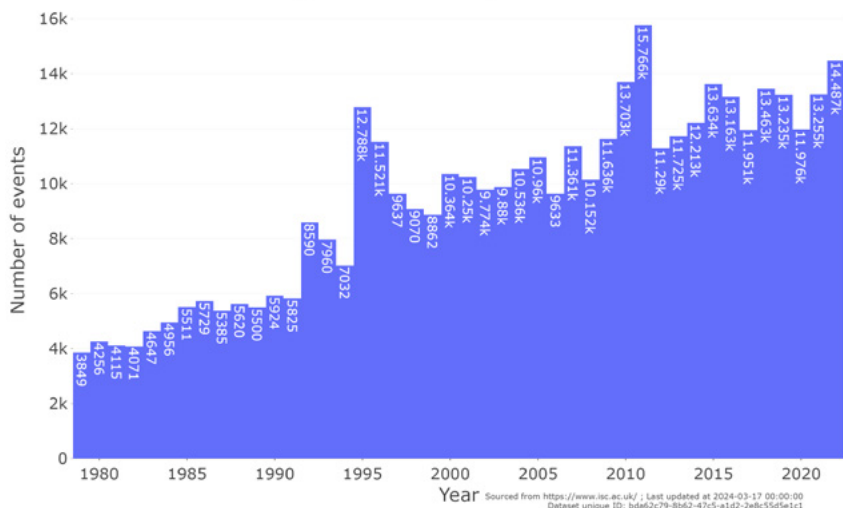


Obr. 73

Narastanie počtu zemetrasení s magnitúdou 4,0 a vyššou v regióne polostrova Kamčatka a Kurilských ostrovov za roky 1979 – 2024

Zdroj: Databáza ISC

Zemetrasenia M4+ v Ohnivom kruhu 1979 – 2022



Obr. 74

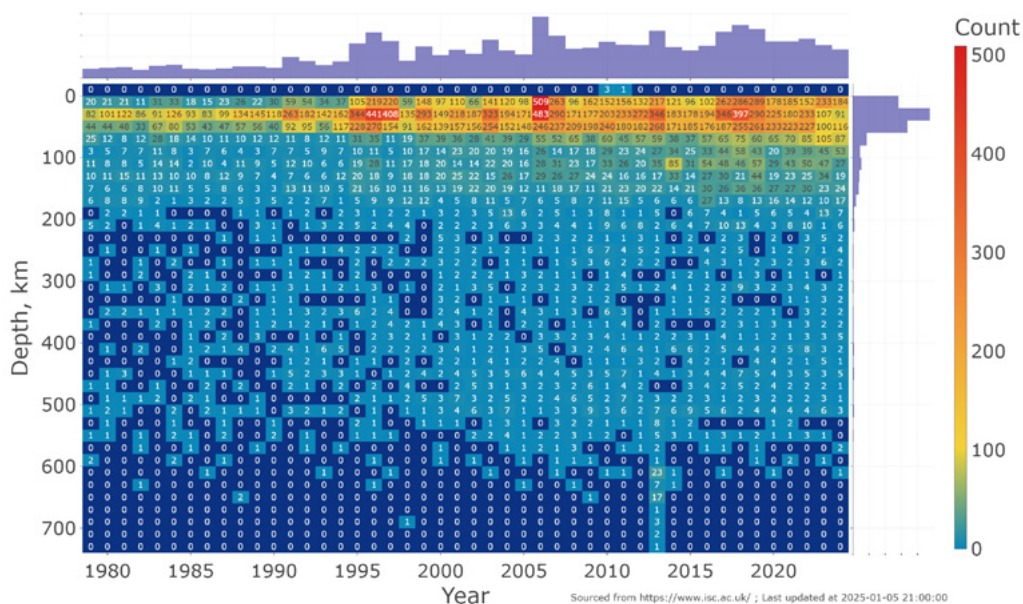
Narastanie počtu zemetrasení s magnitúdou 4,0 a vyššou v oblasti Ohnivého kruhu v rokoch 1979 – 2022

Zdroj: Databáza ISC

Stojí za zmienku, že v Kurilsko-Kamčatskom regióne je pozorovaný aj nárast hĺbky zemetrasení (obr. 75). To naznačuje, že styk litosférických platní sa stáva nestabilnejším kvôli pôsobeniu sibírskeho magmatického chochola. Očakáva sa zvýšenie aktivity sopiek v Kurilsko-Kamčatskom regióne, ako aj výskyt anomálií rýchleho výstupu

hlbinnej magmy a rýchla zmena jej zloženia počas sopečných erupcií na hlbšie zdroje mafické magmy. Podobnú zmenu zloženia na hlbšie preukázala sopka Bezymiannyj počas erupcie v roku 2017⁴⁵.

Zemetrasenia M4+ na polostrove Kamčatka a Kurilských ostrovoch



Obr. 75

Rozloženie zemetrasení s magnitúdou 4,0 a vyššou zaznamenaných vo vybranom polygóne v oblasti polostrova Kamčatka a Kurilských ostrovov od roku 1979 do roku 2024 podľa hĺbky

Zdroj: Databáza ISC

⁴⁵V.O. Davydova, V.D. Shcherbakov, P.Yu. Plechov, I.Yu. Koulakov, Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezymianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 421, 2022, 107422, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107422>

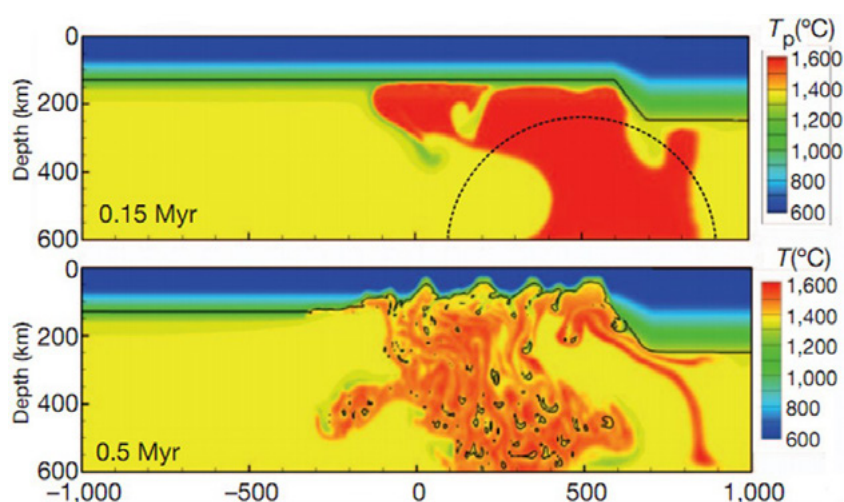
Nárasty seizmicity, požiarov a anomálií sopečnej aktivity sú konkrétnymi okrajovými efektmi vzostupu sibírskeho bloku zemskej kôry, vystaveného tlaku prenikania sibírskeho chochola.

Narastanie seizmickej aktivity nielen na Sibíri, ale hlavne na okrajoch západosibírskej platne a východosibírskeho kratónu poukazuje na to, že stúpanie platne v dôsledku tlaku na ňu zdola magmatickým chocholom sa už začalo. To naznačuje rozsiahly a významný vplyv magmatického chochola na platňu.

Tradičné modely predpokladali, že plášťové chocholy pri vzostupe a zahrievaní spôsobia pred okamihom prerazenia magmy výrazné

zdvihnutie povrchu až do výšky 2 km. O takom dramatickom zdvihu v oblasti sibírskeho trapov, ktoré sa vytvorili v dôsledku prieniku magmatického chochola pred 250 miliónmi rokov, geologické dôkazy neexistujú.

Vedci z ústavov v Rusku, Nemecku a Francúzsku na základe štúdie vyvretých hornín sibírskeho trapov určili⁴⁶, že namiesto nadvihnutia vo forme bubliny chochol postupne erodoval litosféru zdola (obr. 76). Keď erózia v kontaktnej zóne medzi roztaveným materiálom chochola a horninami vrchného plášťa dosiahla hĺbku 50 km, začali sa rozsiahle výlevy a erupcie lávy na povrch.



Obr. 76

Rekonštrukcia počiatočných štádií formovania sibírskeho trapov.

Na zvislej osi je hĺbka (km). Teplota hornín je znázornená rôznymi farbami. Počiatočná poloha vrcholu plášťového chochola je znázornená bodkovaným polkruhom. Chochol sa približuje k spodnej hranici litosféry (plná čierna čiara) a „rozteká sa“ pod ňou. Dole si vrchol chochola v dôsledku erózie (vidno úlomky litosféry klesajúce do hĺbín) prerazil cestu cez vrchný plášť k zemskej kôre. To zodpovedá začiatku hlavnej fázy trapového magmatizmu.

Zdroj: Stephan V. Sobolev, Alexander V. Sobolev, Dmitry V. Kuzmin, Nadezhda A. Krivolutsкая, Alexey G. Petrunin, Nicholas T. Arndt, Viktor A. Radko, Yuri R. Vasiliev. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes // Nature. 2011. V. 477. P. 312–316.

⁴⁶ Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutsкая, N. A., Petrunin, A. G., Arndt, N. T., Radko, V. A., & Vasiliev, Y. R. (2011). Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. Nature, 477, 312-316. DOI: 10.1038/nature10385

Súčasná aktivita chochola sleduje pravdepodobne rovnaký mechanizmus. Preto sa neočakáva výrazné zdvihutie povrchu len na jednom mieste pri prieniku hlavy chochola, tento mechanizmus ale nevylučuje rozsiahle regionálne zdvihnutie celej východosibírskej platformy o nejakú nevel'kú hodnotu. Podľa tektonofyzikálneho modelovania však aj tento zdvih bude stačiť na prerazenie magmy a vypudenie taveniny na povrch pod vysokým tlakom, čo povedie k obrovskej katastrofe.

Miestom predpokladanej lokácie centra hlavy chochola je oblasť severne od náhornej plošiny Putorana, asi 225 km severovýchodne od Noriľska. Prielomy takisto zasiahnu celú tenkú západosibírsku platňu, kde sa roztvoria staré švy – rifty a hlboké zlomy v zemskej kôre.



Zdôvodnenie neodvratnosti prerazenia sibírskeho chochola

Dôvody, prečo je prerazenie magmy terajšieho sibírskeho chochola v súčasnosti vysoko rizikové, súvisia s nasledujúcimi podmienkami:

V posledných 30 rokoch na Zemi postupne pribúdajú geofyzikálne anomálie, ktoré sú priamym dôsledkom vonkajšieho pôsobenia, zvyšujúceho tepelnú energiu v oblasti jadra planéty. Súčasná situácia je však radikálne odlišná od predchádzajúceho obdobia – **koncom roka 2024 planéta vstúpila do fázy zvýšeného energetického vplyvu na jej jadro. A podľa výpočtov sa v roku 2030 priblíži k maximálnej fáze.**

Kritickým faktorom zhoršujúcim situáciu je globálne znečistenie oceánov v dôsledku antropogénneho faktora, vrátane uhlíkovodíkov, mikro- a nanoplastov. Tento antropogénny faktor výrazne zmenil vlastnosti tepelnej vodivosti oceánskej vody, čím narušil jej schopnosť efektívne odvádzať teplo z útrob Zeme. Oceán, ktorý historicky slúžil ako hlavný termoregulátor planéty, stratil významnú časť svojej teplovodivej funkcie. V dôsledku toho dochádza k anomálnej akumulácii tepelnej energie v plášti, čo vedie k jeho intenzívnemu taveniu, väčšiemu ako kedykoľvek predtým v histórii Zeme.

Geofyzikálne výskumy ukazujú bezprecedentný nárast počtu zemetrasení s hlbokým ohniskom, ktoré sú priamym indikátorom aktívneho tavenia plášťa. Roztavená magma, ktorá zväčšuje svoj objem, vytvára kolosálny tlak na zemskú kôru. Tento proces možno prirovnať k postupnému

nafukovaniu balónu – v určitom bode tlak prekročí hranicu pevnosti obalu, čo povedie k prasknutiu.

Sibírsky región je obzvlášť zraniteľný voči týmto procesom kvôli svojej špecifickej geologickej štruktúre. Práve tu stúpa veľký magmatický chochol – vzostupný prúd roztaveného materiálu plášťa, vyvolaný posunom jadra týmto smerom v rokoch 1997 – 1998. Pribúdanie teplotných anomálií na Sibíri ukazuje, že objem magmy pod sibírskeho kratónom stále exponenciálne rastie. Na základe geologických údajov a nedávnych pozorovaní možno s vysokou mierou istoty konštatovať, že sibírsky chochol sa nachádza v kritickej fáze pripravenosti na erupciu.

Zvlášť znepokojujúca je skutočnosť, že súčasne so sibírskeho chocholom sa kritická situácia vyvíja aj v oblasti Mariánskej priekopy. Je to najhlbší bod oceánskeho dna, kde je kôra najtenšia a najzraniteľnejšia. Aj tu dochádza k stúpaniu rozžeravenej magmy a v dôsledku toho aj k výraznému zvýšeniu seizmickej aktivity. Existuje reálna hrozba pretrhnutia oceánskeho dna v tomto mieste a scenára záhuby planéty.

Existujú dva možné scenáre vývoja udalostí. Prvým je prerazenie sibírskeho chochola, ku ktorému môže dôjsť kedykoľvek v dôsledku rastúceho tlaku magmy. Druhým je pretrhnutie zemskej kôry v Mariánskej priekope, ktoré môže predchádzať sibírskej katastrofe. Sibírsky chochol nevybuchne iba vtedy, ak ako prvá exploduje Mariánska priekopa.

Geologická história Marsu nám ukazuje možné dôsledky takéhoto scenára – Údolie Marinera (Valles Marineris) zostáva nemým svedkom takejto katastrofy, keď prerazenie chochola pod oceánom viedlo ku globálnym následkom pre celú planétu.

Podľa výpočtov zohľadňujúcich súčasné trendy rastu geofyzikálnej aktivity môže byť kritický bod prielomu Mariánskej priekopy dosiahnutý do roku 2036. Je však dôležité pochopiť, že tento termín je relatívny. Zemská kôra na Sibíri nemusí vydržať rastúci tlak oveľa skôr. Pri súčasnom vývoji udalostí sa prerazenie sibírskeho chochola alebo pretrhnutie zemskej kôry v Mariánskej priekope zdá byť neodvratným dôsledkom procesov prebiehajúcich v útrobách Zeme. Jediná nejasnosť spočíva v presnom čase a mieste katastrofy, ale nie v samotnom fakte jej priblíženia.

Scenár 1.

Náhle prerazenie sibírskeho chochola

Na odhad predpokladaných škôd z náhlej erupcie sibírskeho chochola možno použiť porovnávaciu metódu s príkladmi z geologickej histórie. Treba však vziať do úvahy, že podobné podmienky, aké v súčasnosti existujú na Zemi, a to konvergencia najsilnejšieho 24 000-ročného cyklu a antropogénne znečistenie „hlavného chladiaceho systému planéty“ – oceánu, nikdy predtým neexistovali. Práve z tohto dôvodu sa náhle prerazenie sibírskeho chochola považuje za najpravdepodobnejšiu udalosť, ak ľudstvo nepodnikne žiadne kroky na zníženie rizika tohto prerazenia.

Ďalej zvážime tri možné scenáre vývoja udalostí so sibírskeho chochola.

Prvým scenárom je náhla erupcia sibírskeho chochola. Dôjde k náhlemu, jednorazovému prerazeniu sibírskeho chochola.

Druhým scenárom je postupná erupcia sibírskeho chochola. Na Sibíri dôjde k pomalým a postupným výlevom lávy, podobne ako pri vzniku sibírskych trapov.

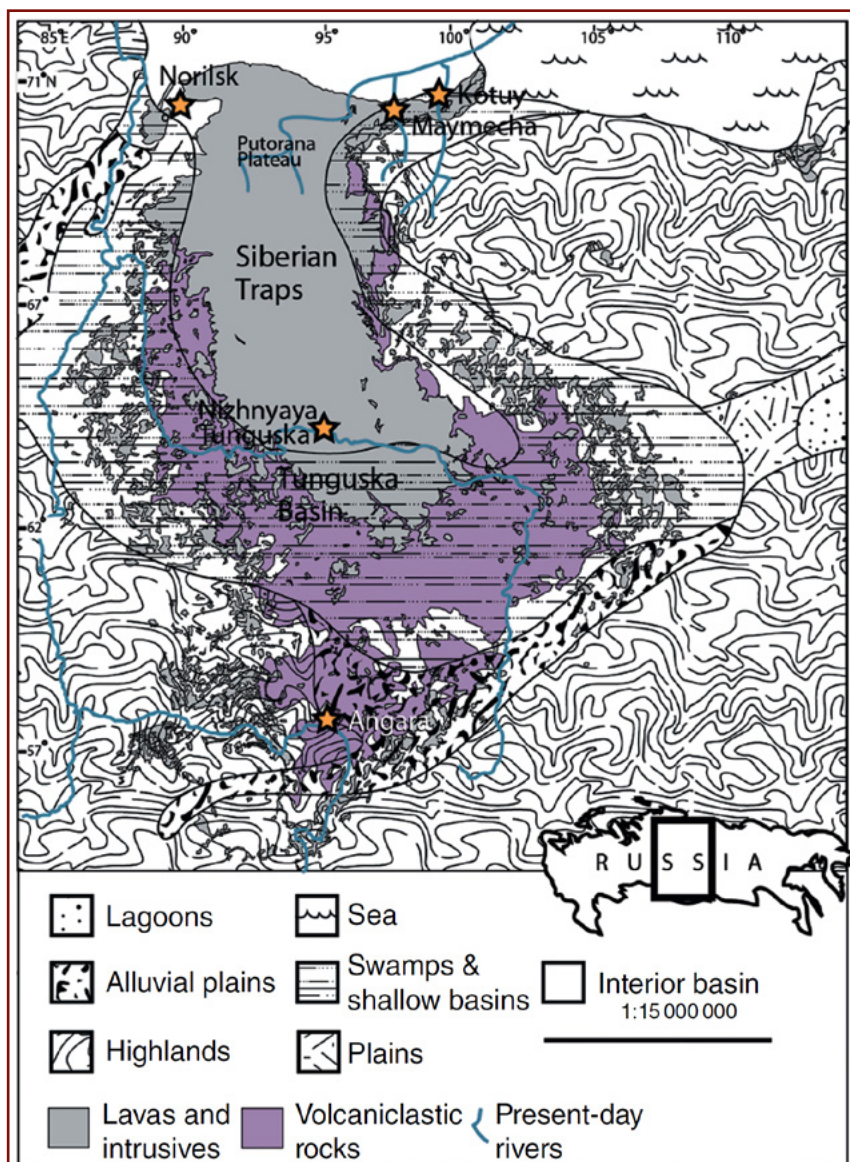
Tretím scenárom je plánovaná kontrolovaná degazácia. Je možná v prípade, ak ľudstvo prijme potrebné opatrenia na odplynenie sekundárnych magmatických komôr sibírskeho chochola v zemskej kôre.

Na odhad sily sopečných erupcií sa používa objem vyvrhnutého materiálu. Napríklad počas jednej z najsilnejších erupcií supervulkánu Yellowstone pred 2,1 miliónmi rokov bol objem vyvrhutej magmy 2 500 km³, čo bolo zistené štúdiom tufových sedimentov v Severnej Amerike⁴⁷. Popol a plyny vyvrhnuté počas tejto erupcie vystúpili do výšky 50 km a dosiahli hornú hranicu stratosféry. Erupcia bola rozsahom porovnateľná s erupciou supervulkánu Toba na ostrove Sumatra, ku ktorej došlo asi pred 72 000 – 74 000 rokmi, a ktorá bola najsilnejšou erupciou za posledných 25 miliónov rokov.

⁴⁷ Swallow, E. J., Wilson, C. J. N., Charlier, B. L. A., & Gamble, J. A. (2019). The Huckleberry Ridge Tuff, Yellowstone: evacuation of multiple magmatic systems in a complex episodic eruption. *Journal of Petrology*, 60, 1371-1426. <https://doi.org/10.1093/petrology/egz034>

Pri erupciách sibírskych trapov pred asi 250 miliónmi rokov objem vyvrhnutého materiálu dosahoval podľa rôznych odhadov 3 až 4 milióny km³ lávy a tufov⁴⁸ (obr. 77). To znamená, že erupcia sibírskych trapov bola objemom vyvrhnutého materiálu 1000-krát väčšia, ako najsilnejšia erupcia kaldery Yellowstone alebo supervulkánu Toba.

Vzhľadom na náhly charakter potenciálnej erupcie sibírskeho chochola môže jeho aktivácia viesť k erupcii, ktorej mohutnosť 1000-násobne prevýši známe historické udalosti, akými boli erupcie kaldery Yellowstone alebo supervulkánu Toba.



Obr. 77

Mapa paleogeografie sibírskych trapov, zobrazujúca rozsah a oblasti hlavných vulkanoklastických vyvrhlín. Vychádza z údajov Maliča et al. (1974), Polozova et al. (2010) a Blacka et al. (2015), pričom zjednodušená paleogeografia neskorého permu je upravená podľa Czamanskeho et al. (1998).

Zdroj: Black, B., Mittal, T., Lingo, F., Walowski, K. & Hernandez, A. Assessing the Environmental Consequences of the Generation and Alteration of Mafic Volcaniclastic Deposits During Large Igneous Province Emplacement. in Geophysical Monograph Series (eds. Ernst, R. E., Dickson, A. J. & Bekker, A.) 117–131 (Wiley, 2021).

<https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch5>

⁴⁸Black, B., Mittal, T., Lingo, F., Walowski, K., & Hernandez, A. (2021). Assessing the Environmental Consequences of the Generation and Alteration of Mafic Volcaniclastic Deposits During Large Igneous Province Emplacement. In R. E. Ernst, A. J. Dickson, & A. Bekker (Eds.), Geophysical Monograph Series (pp. 117-131). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch5>

Predpokladá sa, že ak dôjde k náhlemu prerazeniu sibírskeho chochola, erupcia bude mať explozívny charakter a vytvorí jedinú kalderu. Podľa hypotézy sa očakáva, že kaldera vytvorená prerazením sibírskeho chochola bude mať rozlohu 75 000 km², pričom plocha tejto oblasti bude mať polomer cca 150 km (alebo napríklad 380 km x 250 km). Pri erupcii sibírskych trapov pred 250 miliónmi rokov bola plocha územia zaliateho lávou podľa publikovaných údajov⁴⁹ od 4 do 7 miliónov km²⁵⁰. Podobný rozsah územia môže byť zasiahnutý erupciami aj tentoraz.

Názor, že lávové prúdy predstavujú najväčšiu hrozbu spomedzi sopečných javov, je mylný. V skutočnosti je často hlavnou príčinou smrteľných následkov popol. U supervulkánov, ktoré sa vyznačujú vysokou výbušnosťou, sa značná časť magmy nestihne premeniť na lávu. Namiesto toho sa pri výbuchu rozpadne a vytvorí obrovské množstvo drobných čiastočiek sopečného popola – žeravých ostrých a zubkovitých úlomkov hornín, ktoré sa rozptýlia v atmosfére. Pri vdýchnutí tento popol vytvára v pľúcach človeka zmes podobnú cementu, čo vedie k nevyhnutnej smrti.

Predpokladá sa, že počas erupcie sibírskeho chochola bude rádius rozptylu takéhoto žeravého popola približne 9 000 km, teda pokryje oblasť asi 255 miliónov km². Keďže plocha celého povrchu Zeme je niečo vyše 510 miliónov km², zóna zasiahnutá popolom, kde bude nemožné dýchať, bude zahŕňať asi 50%, čiže polovicu planéty.

Pri náhlom prerazení sibírskeho chochola sa teda očakávajú tri smrteľné zóny dosahu.

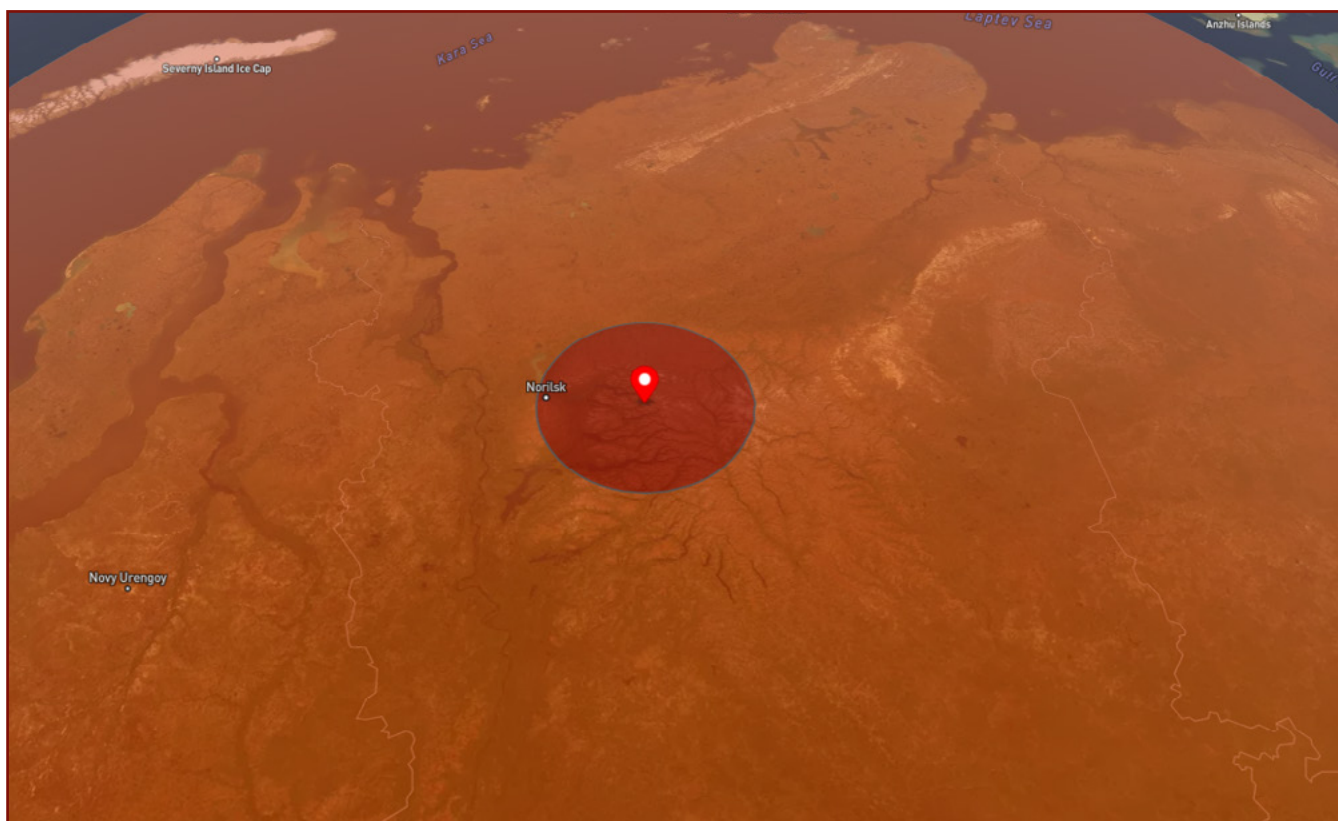
Prvou (centrálnou) zónou dosahu je oblasť s rádiusom asi 150 km so stredom v severozápadnej časti náhornej plošiny Putorana, kde sa predpokladá vznik kaldery (obr. 78). Táto zóna zahŕňa mestá Noril'sk, Dudinka a Talnach v Krasnojarskom kraji. Pri aktivácii chochola dôjde v tejto zóne k okamžitej deštrukcii všetkých objektov v dôsledku pôsobenia rázovej vlny a žeravých pyroklastických prúdov v počiatočnej fáze erupcie.

Druhou zónou dosahu (s rádiusom 1 500 km) je oblasť rozliatia lávy a rozmetania ťažkých sopečných materiálov (obr. 79). Bude pokrývať rozsiahle územia severnej Sibíri, vrátane území Jamalskoneneckého autonómneho okruhu, Tajmýrskeho polostrova, časti Chantyjsko-mansijského autonómneho okruhu, severu Krasnojarského kraja, západnej časti Jakutska a severovýchodu európskej časti Ruska. Tento okruh zahŕňa také veľké mestá ako Igarka, Nový Urengoj, Nadym, Salechard, Vorkuta, Narjan-Mar, Mirnyj, Kogalym, Lesosibirsk, Surgut, Krasnojarsk, Chanty-Mansijsk, Tomsk, Nižnevartovsk.

Počas prvých hodín erupcie bude táto oblasť vystavená pôsobeniu rýchlo sa pohybujúcich (až 700 km/h) prúdov žeravého plynu, popola a lávy. Tieto prúdy zničia všetko živé, pokryjú územie hrubou vrstvou sopečných materiálov a pochovajú pod sebou mestá a prírodné zdroje.

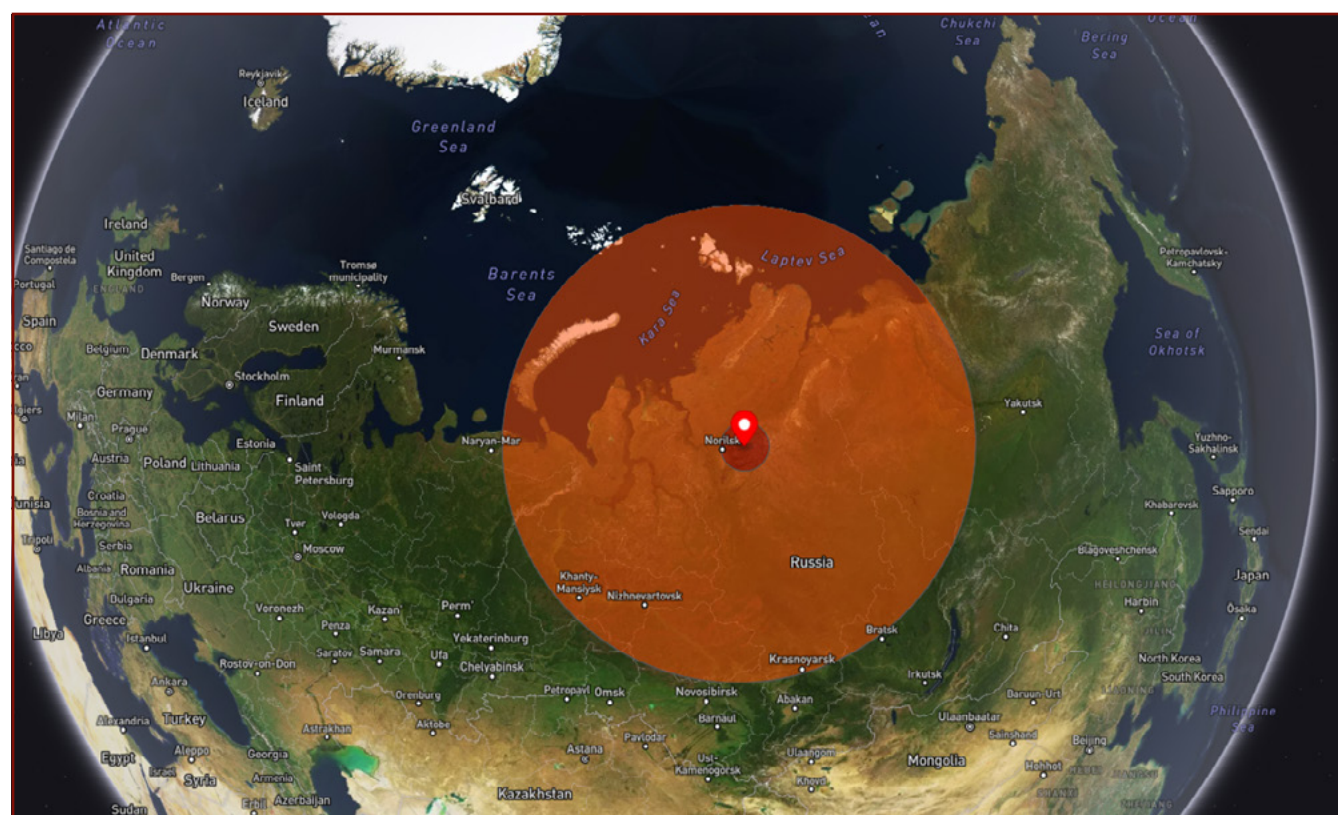
⁴⁹ Fedorenko, V. A., Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., Czamanske, G. K., Hawkesworth, C. J., Wooden, J. L., & Ebel, D. S. (1996). Petrogenesis of the Flood-Basalt Sequence at Noril'sk, North Central Siberia. *International Geology Review*, 38(2), 99-135. <https://doi.org/10.1080/00206819709465327>

⁵⁰ Ivanov, A.V., He, H., Yan, L., Ryabov, V.V., Shevko, A.Y., Palesskii, S.V., Nikolaeva, I.V., 2013. Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism. *Earth-Science Reviews*, 122, pp.58–76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>



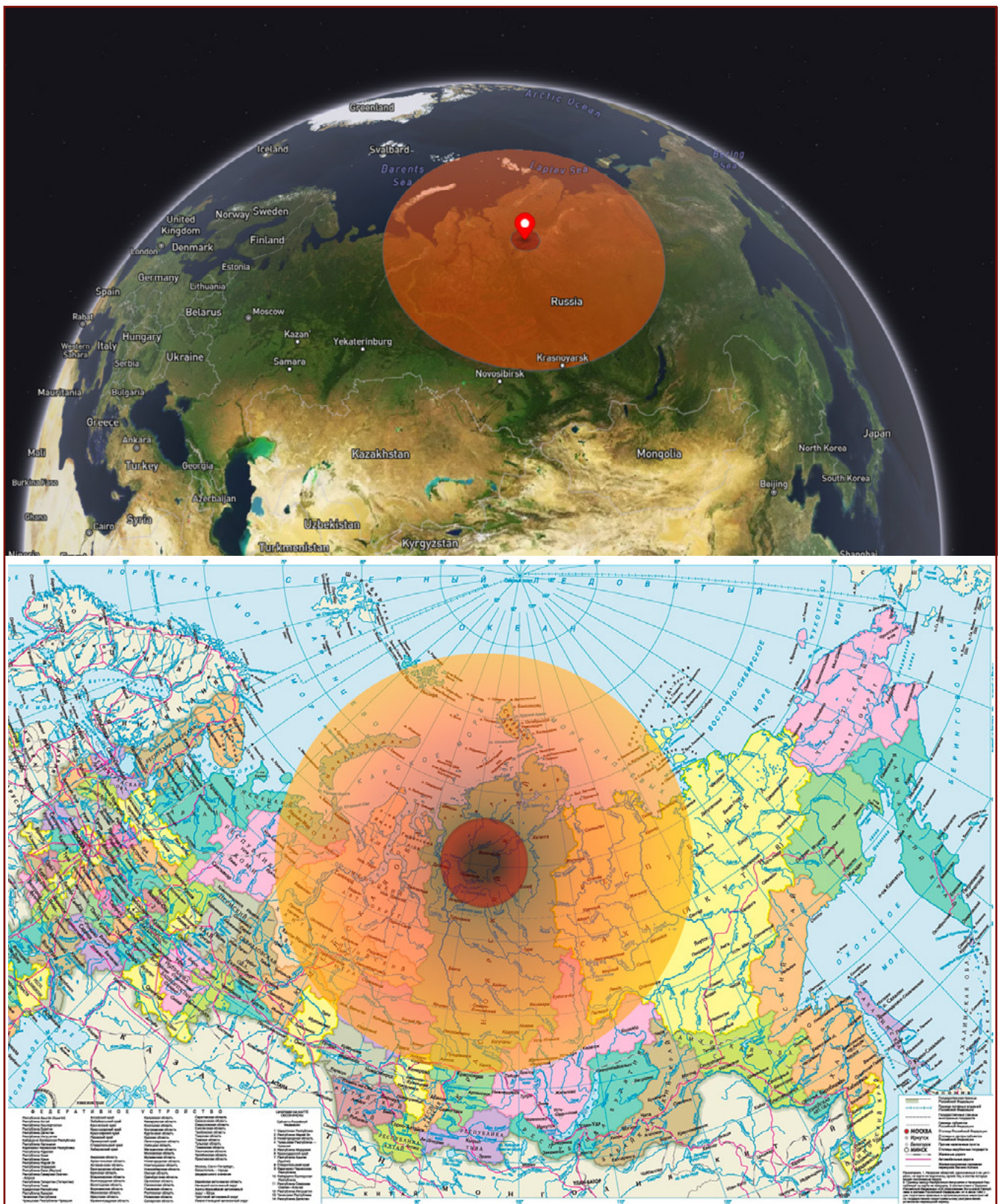
Obr. 78

Červenou farbou je znázornená zóna vzniku kaldery s približným polomerom asi 150 km



Obr. 79

Oranžovou farbou je znázornená zóna rozliatia lávy a vyvrhnutia ťažkých pyroklastických frakcií – rádius je približne 1 500 km



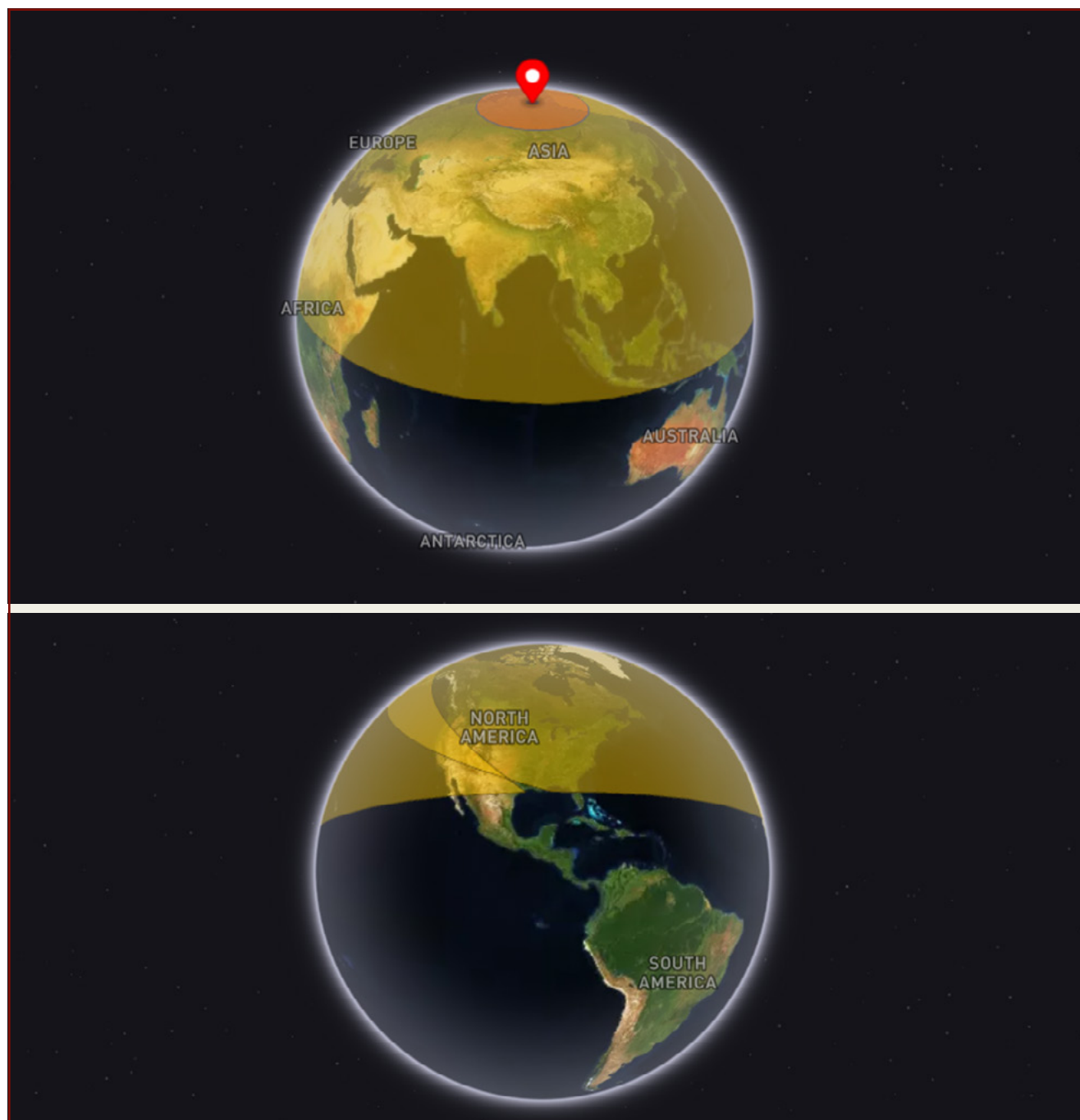
Obr. 79

Oranžovou farbou je znázornená zóna rozliatia lávy a vyvrhnutia ťažkých pyroklastických frakcií – rádius je približne 1 500 km

Tretou zónou dosahu (s rádiom asi 9 000 km) je oblasť rozptylu jemne disperzných pyroklastických materiálov a sopečného popola, pokrývajúca približne 50 % plochy zemského povrchu (obr. 80).

V počiatočnom štádiu (prvý deň po erupcii) budú vystavené maximálnemu vplyvu vyvrhnutého

popola územia Ruskej federácie, kontinentálnej Ázie, Európy, Arabského polostrova, severnej časti afrického kontinentu a Severnej Ameriky. Podľa prognózy sa v priebehu nasledujúcich 7–10 dní masu popola rozšíria na teritórium austrálskeho kontinentu, Južnej Ameriky a Antarktídy.



Obr. 80

Žltou farbou je znázornená oblasť rozptylu jemného sopečného popola – rádius je približne 9 000 km



Obr. 80

Žltou farbou je znázornená oblasť rozptylu jemného sopečného popola – rádius je približne 9 000 km

Výskum geologických procesov ukazuje, že aktivácia sibírskeho chochola spôsobí celý rad sprievodných katastrofických javov. Očakáva sa výskyt mohutnej rázovej vlny, vznik zemetrasení výnimočnej sily (s magnitúdou okolo 10), vznik ničivých cunami a pravdepodobné prebudenie ďalších veľkých sopečných systémov na Zemi. Energia uvoľnená počas erupcie môže spustiť reťazovú reakciu, ktorá podnieti aktiváciu

supervulkánov a veľkých sopečných oblastí na celej planéte. Tieto závery vychádzajú z matematických výpočtov energetických procesov a ich vplyvu na zemskú kôru.

Ďalej preskúmame ďalšie rizikové faktory, ktoré hrozia ľudstvu v dôsledku náhleho prerazenia sibírskeho chochola.

Rázová vlna

Podľa verejne dostupných zdrojov by erupcia supervulkánu Yellowstone mohla uvoľniť energiu okolo 900 000 megaton a spôsobiť zemetrasenie s magnitúdou 11,2. Keďže stupnica magnitúd je logaritmická (každý nárast o jednu jednotku znamená 32-násobný nárast energie), erupcia sibírskeho chochola, 1000-krát silnejšia ako Yellowstone, by mohla spôsobiť zemetrasenie s magnitúdou 13,2. Bolo by 350 000-krát silnejšie ako najsilnejšie zaznamenané zemetrasenie – Veľké čilské zemetrasenie (rok 1960, magnitúda 9,5) – a porovnateľné s pádom veľkého asteroidu.

Uvoľnená energia asi 10^{24} joulov vytvorí mohutnú rázovú vlnu celosvetového rozsahu. V centre erupcie bude tlak taký vysoký, že sa horniny okamžite vyparia a budú vyvrhnuté do horných vrstiev atmosféry. Nadzvuková rázová vlna spôsobí v priebehu niekoľkých minút devastáciu do vzdialenosti tisícok kilometrov, podobne ako pád tunguzského meteoritu, ale oveľa silnejšiu.

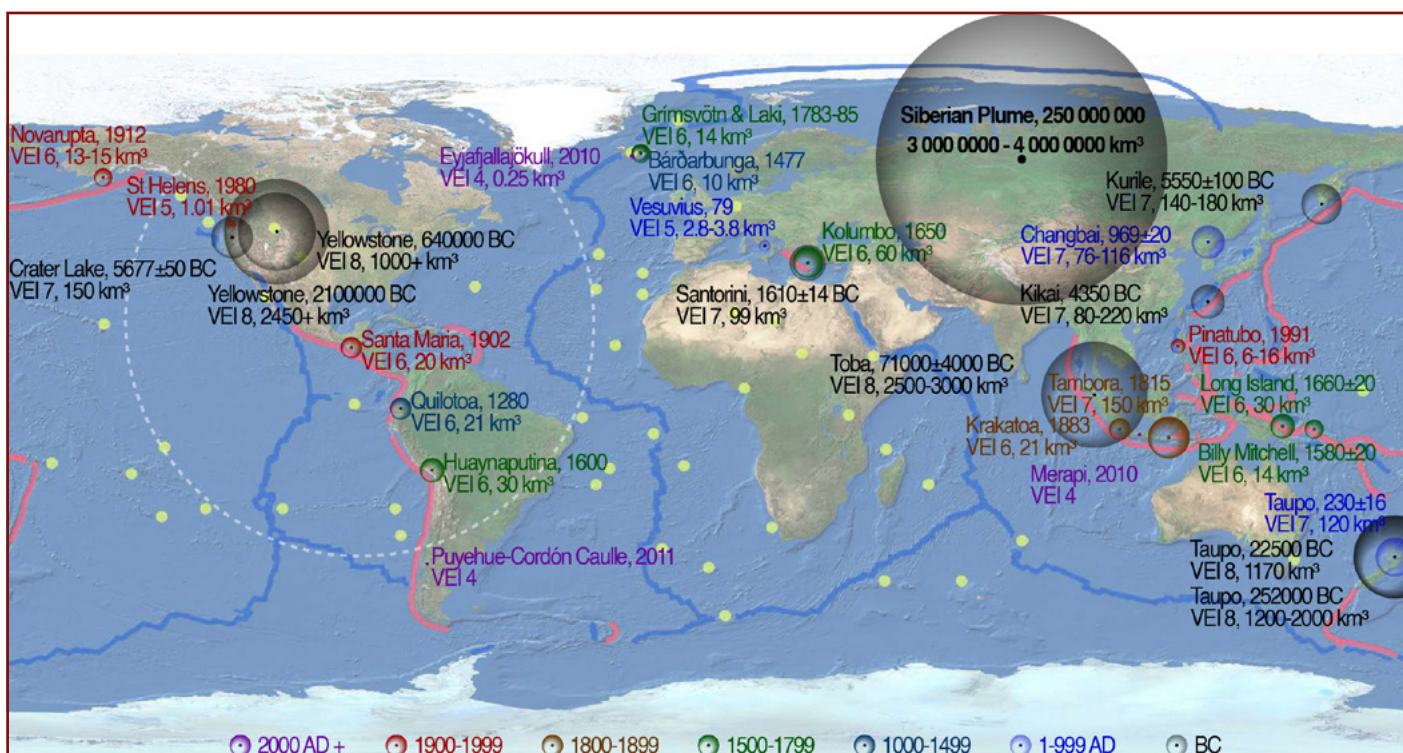
V sibírskej tajge vypuknú rozsiahle požiare a obrovské územia pokryje hrubá vrstva sopečného popola. Dôjde k rýchlemu topeniu permafrostu do vzdialenosti tisícok kilometrov, sprevádzanému uvoľňovaním skleníkových plynov. Krajina bude vystavená rozsiahlej deštrukcii s aktiváciou zlomov v zemskej kôre. Seizmické vlny sa preženu celou planétou a spôsobia nové zemetrasenia s magnitúdou nad 10.

V Severnom ľadovom oceáne vzniknú gigantické cunami vysoké stovky metrov, ktoré ohrozia pobrežia Ruska, Kanady, Grónska a Škandinávie. Sekundárne cunami zasiahnu brehy Indonézie, Japonska, Austrálie, Severnej a Južnej Ameriky. Globálne atmosférické poruchy povedú k vzniku supersilných hurikánov a búrok.

Aktivácia supervulkánov a sopečných systémov

Seizmické vlny od erupcie sa budú šíriť nielen vzduchom a zemským povrchom, ale aj hlboko do plášťa. Keďže všetky supervulkány sú navzájom prepojené cez roztavené vrstvy plášťa, seizmické vlny takejto sily od erupcie sibírskeho chochola pravdepodobne už počas prvého dňa vyvolajú reťazovú reakciu erupcií iných

supervulkánov (obr. 81). Očakáva sa aktivácia najväčších sopečných systémov vrátane kaldery Yellowstone a Long Valley (Severná Amerika), Campi Flegrei (Apeninský polostrov), Toba (Veľké Sundry), Aira (Japonské ostrovy) a vulkanický komplex Taupo (Nový Zéland).



Obr. 81

Na mape sveta sú znázornené najväčšie sopečné erupcie, klasifikované podľa časových období, od prekambria po súčasnosť

Veľkosť symbolov je úmerná objemu vyvrhnutého materiálu (v km³). Mapa ukazuje časový sled erupcií s VEI ≥ 4, pričom najvýznamnejšími udalosťami sú Toba (71 000 ± 4 000 pr. n. l., 2 500 – 3 000 km³), Yellowstone (640 000 pr. n. l., > 1 000 km³) a Tambora (1815, 150 km³). Podobné erupcie sa očakávajú aj v prípade výbuchu sibírskeho chochola, čo bude najväčšou udalosťou (3 – 4 milióny km³). Červené čiary označujú hranice tektonických platní, demonštrujúce priestorovú koreláciu s lokalizáciou veľkých erupcií.

Okrem erupcií supervulkánov je pravdepodobné, že sa začnú erupcie mnohých sopiek pozdĺž Tichooceánskeho ohnivého kruhu a v ďalších seizmicky aktívnych zónach. Vysoká je pravdepodobnosť obnovenia sopečnej činnosti sopiek ako sú Fudžisan (Japonsko), Krakatoa a Merapi (Indonézia), Vezuv a Etna (Taliansko), Popocatépetl (Mexiko), sopečné skupiny Kamčatky, andské a aljašské sopečné pásy, a tiež subglaciálne

sopečné systémy západnej Antarktídy. Predpokladá sa reaktivácia dlho neaktívnych sopečných štruktúr vrátane stratovulkánu Ararat (Anatólska náhorná plošina), sopečného masívu Elbrus (oblasť Kaukazu), sopky Laacher See (stredná Európa), stratovulkánov Kilimandžáro a Nyiragongo (východoafrická priekopová prepadlina) a sopečných systémov Arabského polostrova.

Kyslé dažde

Katastrofálne emisie sopečného popola a oxidu siričitého z erupcie spôsobia, že zrážky na celej planéte nadobudnú formu kyslých dažďov. Na ilustráciu rozsahu emisií si predstavte erupciu supervulkánu Yellowstone pred 630 000 rokmi, pri ktorej sa do atmosféry uvoľnilo asi 500 megaton oxidu siričitého. Po prepočítaní týchto údajov na silu hypotetickej erupcie sibírskeho chochola je možné odhadnúť objem emisií oxidu siričitého na rádovo 1 500 000 megaton (alebo $1,5 \times 10^{12}$ ton), čo je asi miliónkrát viac ako emisie z Tambory v roku 1815 (tzv. „rok bez leta“). Je potrebné zdôrazniť, že tento výpočet nezohľadňuje emisie z iných sopiek, ktoré môžu byť aktivované v rámci reťazovej reakcie.

Takáto koncentrácia emisií oxidu siričitého zapríčiní globálnu tvorbu aerosólových častíc v stratosfére, ktoré sa budú v priebehu desaťročí postupne vyplavovať z atmosféry ako kyslé dažde. Podľa prognóz bude hlavné obdobie kyslých zrážok trvať od 3 do 10 rokov v závislosti od klimatických procesov a atmosférickej cirkulácie. Regióny nachádzajúce sa bližšie k epicentru takýchto emisií, ako napríklad dnešná Sibír, budú vystavené zrážkam s pH nižším ako 1,5, čo je analogické zriedenej kyseline sírovej.

Tým sa zničí vegetácia vrátane koreňov, listov i konárov, a tiež sa z pôdy vyplavia minerály, čím sa stane nevhodnou pre podporu života. Vodné ekosystémy sa tiež stanú vysoko kyslými, pričom sa vodojemy premenia na kyslé jazerá s pH 2 – 3, čím sa stanú toxickými pre väčšinu foriem života.

Okrem toho, kyselina vstupujúca do vodovodného systému spôsobí, že pitná voda nebude vhodná na spotrebu bez zložitej filtrácie. Infraštruktúra, vrátane budov z cementu, mramoru a kovov, bude vystavená zrýchlenej korózii síranmi.

Maximálna koncentrácia kyslých dažďov však potrvá len prvé mesiace po erupcii, potom sa zrážky postupne lokalizujú v určitých regiónoch. S nástupom sopečnej zimy sa väčšina zrážok zmení na sneh, čím sa zníži kyslé zaťaženie ekosystémov, ale v tom čase už bude globálna devastácia flóry a fauny spôsobená kyslými zrážkami nezvratná.

Poškodenie ekosystémov bude mať citeľný vplyv na prírodné a antropogénne procesy dlho pred začiatkom globálneho ochladzovania.

Sopečná zima

Kumulatívny vplyv erupcie sibírskeho chochola, posilnený súbežnou aktiváciou viacerých sopiek, bude mať kolosálny katastrofický efekt, vyjadrený v zmene globálnych klimatických a ekologických podmienok. Rozsiahle emisie sopečného popola, plynov (najmä oxidu siričitého, SO_2) a aerosólov do atmosféry vytvoria neprekonateľnú bariéru pre slnečné žiarenie na desaťročia.

Vysoká koncentrácia sulfátových aerosólov v stratosfére bude odrážať väčšinu slnečného žiarenia, čo spôsobí narušenie energetickej rovnováhy planéty. Očakáva sa prudké zníženie prílevu tepla, čo povedie k extrémnemu ochladzovaniu klímy – stavu, ktorý je možné označiť ako „hypervulkanická zima“. V dôsledku týchto procesov sa Zem zmení na „ľadovú guľu“, kde sa podmienky vhodné pre život zachovávajú len v obmedzených oblastiach, najmä v rovníkovej zóne.

Odhady potenciálneho dopadu sú založené na historických údajoch o významných erupciách. Napríklad počas najsilnejšej erupcie Yellowstonu pred 2,1 miliónmi rokov klesla teplota na planéte v priemere o 3 – 5 °C. Podľa výpočtov pri erupcii sibírskeho chochola, ktorého rozsah mnohonásobne prevyšuje spomínanú udalosť, klesne priemerná teplota na Zemi o ~ 24 – 31 °C.

V polárnych zónach sa očakáva pokles teplôt o 28 – 36 °C a viac, čo povedie k úplnému zamrznutiu kľúčových vodných plôch vrátane

severného Atlantiku a rozsiahlych oblastí Tichého oceánu. V stredných zemepisných šírkach dôjde k poklesu teploty o 24 – 31 °C, čo zničí všetku vegetáciu a zapríčiní hromadný úhyn organizmov.

Oceánske ekosystémy budú náhle zdevastované. Zamrznutie začne od povrchu a od pobrežných oblastí oceánov, čo zapríčiní zánik morskej bioty na globálnej úrovni. V rovníkových oblastiach teploty klesnú o 20 – 27 °C, kvôli čomu budú dokonca aj tropické oblasti príliš chladné na udržanie života.

V dôsledku globálneho chladu, tmy a zastavenia fotosyntézy sa prakticky celý zemský povrch stane neúrodný. Potravné reťazce budú zničené, čo povedie ku kolapsu poľnohospodárstva a masovému vymieraniu flóry a fauny, ako aj významnej časti ľudstva. Životaschopnosť si zachovávajú iba jednotlivé mikrobiálne ekosystémy prispôsobené na extrémne podmienky.

Sulfátové aerosóly dlhodobo zotrúvajúce v stratosfére budú predlžovať blokovanie slnečného svetla počas celých desaťročí. Následky „hypervulkanickej zimy“ sa však budú prejavovať oveľa dlhšie. Aj po usadení popola a aerosólov budú potrebné stovky alebo dokonca tisíce rokov, kým planéta obnoví svoju prirodzenú klimatickú a ekologickú rovnováhu, vzhľadom na zamrznuté oceány, vytvorené ľadovce a radikálne zmeny v biosfére.

Závery pre scenár 1: Náhle prerazenie sibírskeho chochola

Náhla erupcia sibírskeho chochola sa stane katastrofickou geologickou a klimatickou udalosťou, ktorá zapríčiní globálne zmeny v atmosfére, hydrosfére a biosfére. Silný výbuch na náhornej plošine Putorana okamžite zničí všetko v okruhu 150 km, vytvorí gigantickú kalderu a pyroklastické prúdy a láva pokryjú územie s rádiusom 1 500 km, čím sa Sibír zmení na spálenú pustinu. Polovica povrchu planéty sa pokryje vrstvou popola.

Zemetrasenie s magnitúdou až 13,2, spôsobené výbuchom chochola, vyvolá ničivé seizmické vlny, ktoré sa rozšíria po celej planéte a aktivujú zlomové línie, sekundárne zemetrasenia a megacunami vysoké stovky metrov, zaplavujúce pobrežné zóny kontinentov.

Emisie 1,5 milióna megaton SO_2 zapríčinia kyslé dažde s pH pod 1,5, čo zničí pôdy, vegetáciu aj vodné ekosystémy. Vodojemy sa stanú nevhodnými pre život a zem rýchlo stratí svoju úrodnosť. Kolaps fotosyntézy a potravných reťazcov povedie k hromadnému vymieraniu flóry, fauny a teda aj ľudskej civilizácie.

Hromadná aktivácia supervulkánov vrátane Yellowstone, Campi Flegrei a Toba zhorší globálne zmeny klímy zvýšením emisií sopečného popola, oxidu siričitého (SO_2) a aerosólov. Ich akumulácia v stratosfére bude blokovať slnečné svetlo, čo spôsobí ochladenie planéty („hypervulkanickú zimu“) a pokles teploty o desiatky stupňov. V polárnych oblastiach klesnú teploty o 28 – 36 °C, v miernych oblastiach o 24 – 31 °C a v trópoch o 20 – 27 °C, čo spôsobí zamrznutie oceánov, zastavenie oceánskej cirkulácie, kolaps ekosystémov a vznik obrovských ľadovcov na súši.

Efekt „hypervulkanickej zimy“ urobí Zem prakticky neobývateľnou a obnova prírodných podmienok si vyžiada tisíce až milióny rokov. Táto udalosť sa stane najväčším vymieraním v geologickej histórii planéty.

Scenár 2:

Postupné prerážanie sibírskeho chochola

Druhý scenár erupcie sibírskeho chochola nepredpokladá jednorazový výbuch, ale postupnú sériu erupcií plynov a lávových prúdov cez zlomy a oslabené zóny zemskej kôry. Tento proces možno porovnať s formovaním sibírskych trapov, prebiehajúcim na konci permského obdobia pred 250 miliónmi rokov v tom istom regióne.

Vytvorenie sibírskych trapových provincií sa stalo najväčším prejavom zemskeho vulkanizmu. V tom čase Zem zažila najväčšiu ekologickú

katastrofu vo svojej histórii – veľké permské vymieranie, počas ktorého vymizlo až 90 % morských a 70 % suchozemských druhov (obr. 82, 83).

Geologické údaje⁵¹ naznačujú, že sibírske erupcie na teritóriu východosibírskeho kratónu mohli byť nezvyčajne explozívne (Campbell et al., 1992), a hrúbka pyroklastických nánosov dosahovala 800 m (Khain, 1985). Sila výbuchu bola taká veľká, že niekedy vymršťovala sedimentárne horniny z hĺbky 10 km.



Obr. 82
Umelecké zobrazenie erupcií na Sibíri v období veľkého permského vymierania

Ilustrácia: Tigran Nshanyan

Obr. 83
Umelecké stvárnenie. Lystrosaury, ktoré prežili masové vymieranie, dominujú v zdevastovanej krajine a ilustrujú zmenu ekosystému po permsko-triasovej kríze

Ilustrácia: Julio Lacerda



⁵¹Beerling, D.J., Harfoot, M., Lomax, B. & Pyle, J.A., 2007. The stability of the stratospheric ozone layer during the end-Permian eruption of the Siberian Traps. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 365, pp.1843–1866. Available at: <http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2046>

Sopečná činnosť v regióne prebiehala v niekoľkých etapách, ktoré radikálne zmenili geologickú krajinu. Spočiatku magma prenikala do stĺpca sedimentárnych vrstiev a vytvárala rôzne intruzívne telesá, ako sú prahy (silly). Charakter erupcií sa potom zmenil na explozívny, čo viedlo k vyvrhnutiu obrovského množstva pyroklastického materiálu a vytvoreniu mohutných sopečných usadenín. Vyvrcholením tohto procesu bolo vyliatie obrovských objemov čadičovej lávy, rátaných v státisícoch km³. Celkový objem vulkanických hornín vrátane intrúzií, pyroklastických nánosov a lávových prúdov sa odhaduje na približne 3 milióny km³. Je dôležité poznamenať, že tento údaj odráža iba horniny, ktoré sa zachovali dodnes, a možno s istotou povedať, že počiatočný objem vyvrhnutých materiálov bol oveľa väčší, ale neskôr podľahol erózii.

Formovanie sibírskych trapov zapríčinilo gigantické emisie oxidu uhličitého (CO₂), oxidu siričitého (SO₂), chlorovodíka (HCl) a iných prchavých látok. Tieto plyny dramaticky zosilnili skleníkový efekt a spôsobili rýchle oteplenie po sopečnej zime. Koncentrácia CO₂ v atmosfére dosiahla 8 000 ppm, čo 20-násobne prevyšuje súčasné hladiny. V dôsledku toho teplota tropických morí stúpala z 22 – 25 °C na 30 °C a oceány sa začali okysľovať, čo zabíjalo organizmy s karbonátovými skeletmi.

Celkové emisie síry boli do 7 800 gigaton, chlóru do 8 700 gigaton a fluóru do 13 600 gigaton⁵².

Sopečný popol a aerosóly blokovali slnečné svetlo, narušili fotosyntézu, zapríčinili masívny úbytok lesov a rozpad potravných reťazcov, čo prispelo k vymieraniu rastlinných aj živočíšnych druhov.

Ekologická kríza tých čias slúži ako dôkaz rozsahu možných dôsledkov aj pri postupnej erupcii sibírskeho chochola.

Podľa výskumov bolo obdobie erupcií, ktoré začalo pred 250 miliónmi rokov, spôsobené vzostupom plášťového chochola – silného prúdu magmy stúpajúceho z hĺbín Zeme v oblasti dnešnej náhornej plošiny Putorana. Opakovanie tohto scenára dnes povedie k vytvoreniu rozsiahlych lávových plošín, jedných z najväčších geologických útvarov na planéte, ktoré zničia takmer všetok život v okruhu niekoľkých tisícok kilometrov zasiahnutím územia Sibíri a susedných oblastí. Z geologických záznamov vyplýva, že podobné katastrofy sprevádzané vyliatím enormných čadičových polí⁵³ sa odohrávali neraz a zakaždým spôsobili rozsiahle masové vymierania (obr. 84).

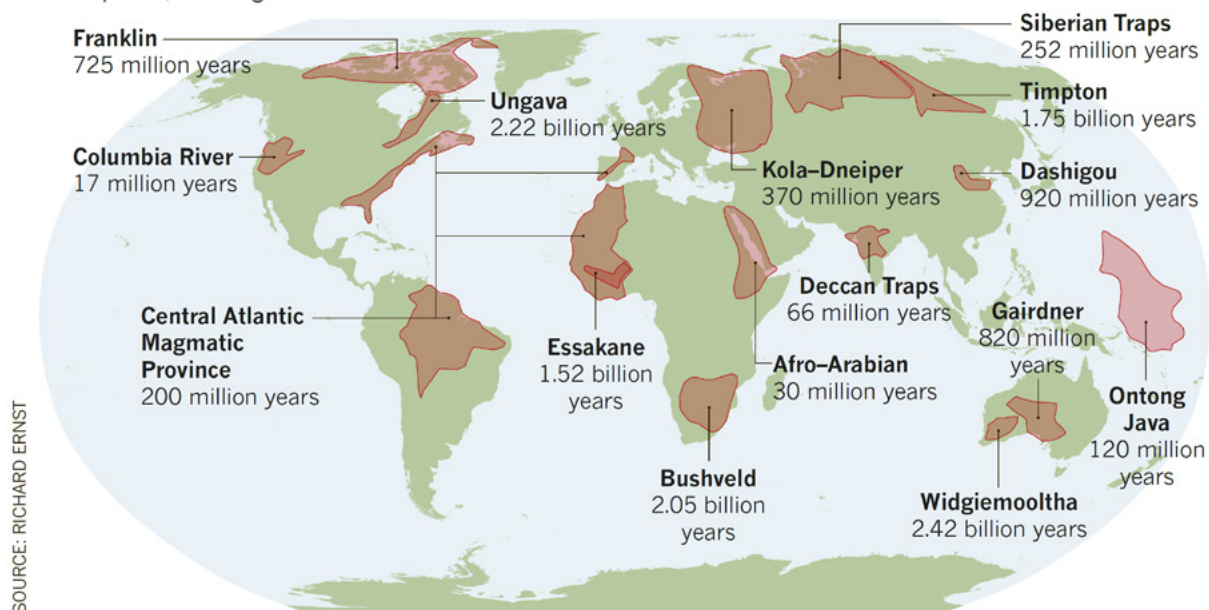
⁵²Benjamin A. Black, Linda T. Elkins-Tanton, Michael C. Rowe, Ingrid Ukstins Peate, Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps, *Earth and Planetary Science Letters*, Volumes 317–318, 2012, Pages 363–373, ISSN 0012-821X, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001>

⁵³Witze, A. (2017). Earth's lost history of planet-altering eruptions revealed. *Nature*, 543, 295–296. <https://doi.org/10.1038/543295a>

EARTH'S BIGGEST ERUPTIONS

Scientists have extended the geological record of massive volcanic eruptions, uncovering evidence for world-changing events that occurred more than 2 billion years ago.

■ Eruptions, showing extent of lava flow



Obr. 84

Obrázok ukazuje mapu najväčších sopečných erupcií v histórii Zeme so znázornením geografických polôh a veku lávových plošín, ktoré vznikli v dôsledku týchto udalostí.

Ilustrácia: Richard Ernst

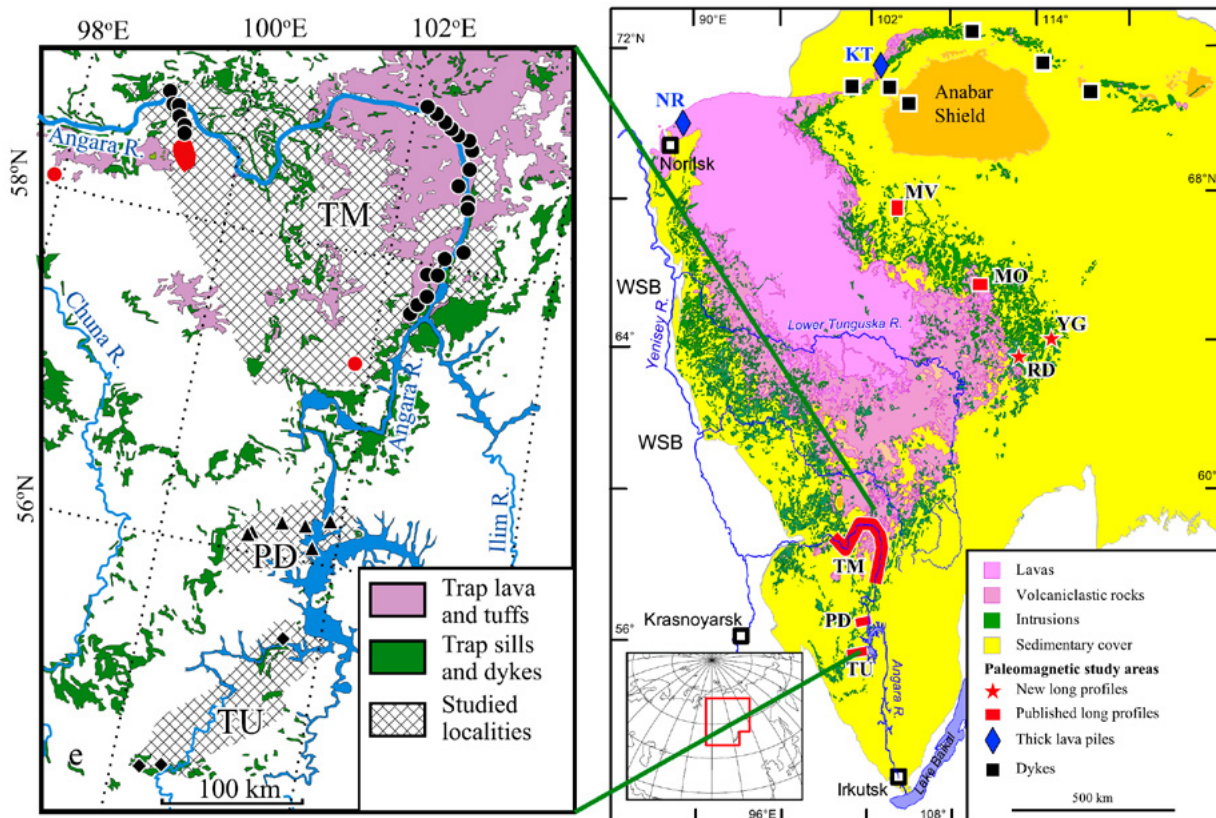
Zdroj: Witze, A. Earth's lost history of planet-altering eruptions revealed. Nature 543, 295–296 (2017).

<https://doi.org/10.1038/543295a>

Rovnako ako v predchádzajúcich geologických obdobiach bude magma stúpať z plášťa, prenikať cez trhliny v zemskej kôre, podobne ako mäkká hmota presakuje cez hustý filter. Tento proces povedie k prehriatiu povrchu, vytvoreniu početných vnútrokôrových magmatických intrúzií a taveniu litosféry.

Obrázok 85 ukazuje rozloženie efuzívnych hornín na Sibíri. Lávové prúdy sú znázornené fialovou farbou a magmatické telesá stuhnuté

v zemskej kôre sú znázornené zelenou farbou. Zelené oblasti na mape ukazujú, kde magma pri erodovaní zemskej kôry vytvárala trhliny a prenikala pozdĺž týchto oslabených zón. Takýto zvýšený tlak magmy môže opäť spustiť podobný proces.



Obr. 85

Vpravo: Prehľadná mapa sibírskej trapovej provincie (zjednodušená a upravená podľa Svensen et al., 2009). Na prehľadnej mape sú rôznymi farbami znázornené hlavné geologické štruktúry: lávové prúdy sú znázornené ružovou, intruzívne telesá zelenou farbou a sedimentárny pokryv žltou. Vľavo: Podrobná mapa na ľavej strane obrázku ukazuje rozloženie trapového magmatizmu: lávy a tufy sú zobrazené fialovou farbou, prahy a hrádze (silly a dajky) zelenou farbou.

Zdroj: Konstantinov, K. M., Bazhenov, M. L., Fetisova, A. M., & Khutorskoy, M. D. (2014). Paleomagnetism of trap intrusions, East Siberia: Implications to flood basalt emplacement and the Permo–Triassic crisis of biosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 242–253.

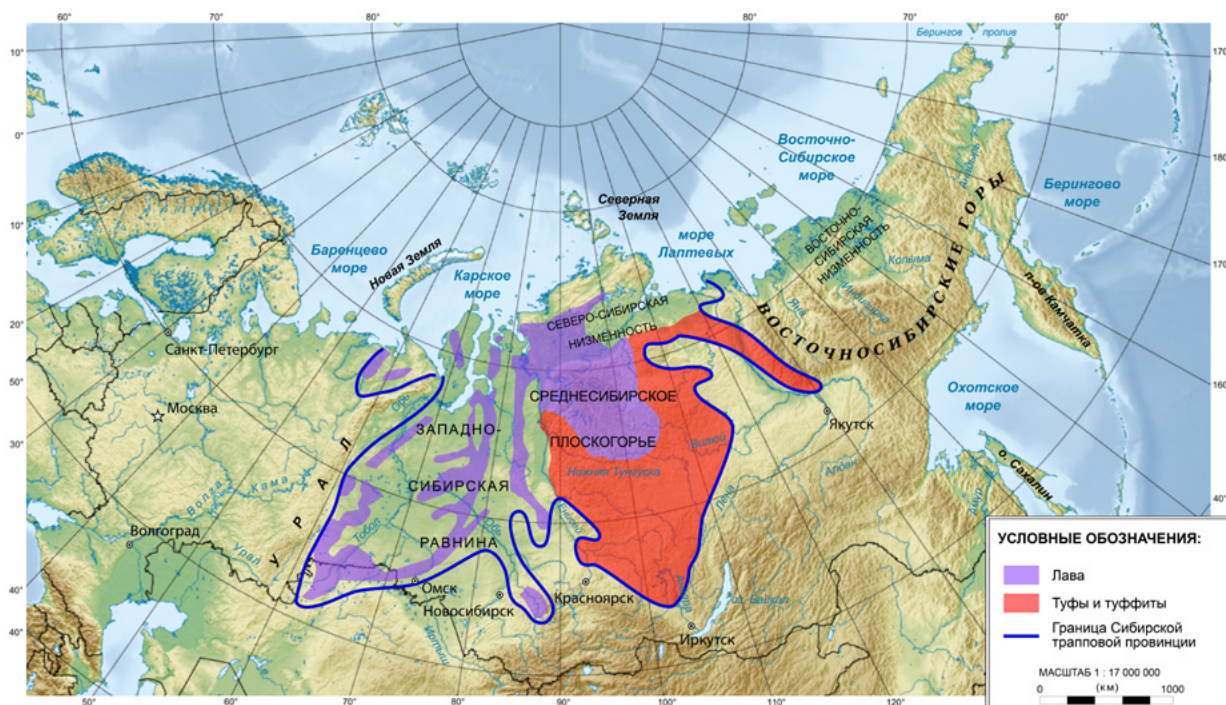
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029>

Scenár postupnej erupcie je porovnateľný s náhlou explóziou sibírskeho chochola, ale je rozťahnutý v čase. Možno si to predstaviť ako rad sopiek vybuchujúcich každý týždeň spolu s tvorbou bleskovo vznikajúcich trhlín, cez ktoré budú prúdiť čadičové lávy po celej západnej Sibíri.

Na mape (obr. 86) sú oblasti lávových prúdov vyznačené fialovou farbou. V miestach hustejšej a stabilnejšej kôry východosibírskej platformy sa lávy šírili plošne a na území západnej Sibíri, ktoré sa vyznačuje tenšou, mladšou a heterogénnejšou kôrou, dochádzalo k erupciám

pozdĺž pretiahnutých preliačín alebo riftov. Červené oblasti na mape označujú tufové zóny pozostávajúce z cementovaných pyroklastických úlomkov a popola.

Treba poznamenať, že erupcie na východnej a západnej Sibíri sa budú líšiť. Pod východnou Sibírou magma naráža na konzistentný archaický kratón, ktorý vytvára významnú bariéru. Počas stúpania sa magma „zažiera“ do hostiteľských hornín, ochladzuje sa a nasycuje prchavými zložkami, čo môže viesť k explozívny erupciám s intenzívnymi emisiami popola a možnej tvorbe kyslej viskóznej magmy.



Obr. 86

Mapa sibírskej trapovej provincie. Zobrazuje hlavné geologické štruktúry vrátane oblastí rozliatia lávových prúdov (fialová) a tufov s tufitmi (červená). Modré čiary označujú hranice sibírskej trapovej provincie.

Zdroj: wikipedia.org, podľa Masaitis, 1983.

Zatiaľ čo na západnej Sibíri, kde je kôra tenká a mladá, sa predpokladá prevaha výlevov tekutých čadičových lát.

Očakáva sa, že celková oblasť pokrytá lávovými prúdmi a tufmi na západnej a východnej Sibíri bude približne 7 miliónov km², čo je porovnateľné s výmerou dnešnej Austrálie. Plochy, ktoré budú vystavené degradácii, však pravdepodobne presiahnu desiatky miliónov km². Tieto územia budú vystavené rozsiahlym požiarom, erózií v dôsledku kyslých dažďov, spadom popola, zosuvom pôdy a bahnotokom nesúcim sopečné sedimenty. Všetok permafrost na Sibíri bude zničený.

Stojí za zmienku, že na Tajmýrskom polostrove, západne od náhornej plošiny Putorana, sa nachádzajú najväčšie svetové ložiská niklu, medi a kovov platinovej skupiny, rozpracované

spoločnosťou Nornikel. Tieto ložiská sú magmatického pôvodu a vznikli asi pred 250 miliónmi rokov počas erupcií v sibírskej trapovej magmatickej provincii, čo prispelo k vytvoreniu unikátnych rudných uzlov. Vysoká koncentrácia niklu vo vtedajších magmách pravdepodobne súvisela s vynášaním látok zemského jadra na povrch. V súčasnosti dochádza na Sibíri k vzostupu magmatického chochola, ktorého zrýchlenie bolo spôsobené posunom jadra v roku 1998 smerom k Tajmýrskemu polostrovu, čo zistil doktor vied Jurij Barkin. V blízkej budúcnosti existuje vysoké riziko prerazenia sibírskeho chochola v oblasti mesta Noril'sk, na rovnakom mieste, kde sa to stalo pred 250 miliónmi rokov.

Ďalej sa pozrieme na dôsledky tohto scenára pre Rusko a celý svet.

Dôsledky postupného prerážania sibírskeho chochola pre Rusko

Existujú výskumy, ktoré presne mapujú umiestnenie astenosférických roztavených šošoviek v litosfére južnej Sibíri, čo sa vysvetľuje tenkou kôrou tejto oblasti. Severná časť Sibíri však zostáva na seizmických mapách prakticky nepreskúmaná, čo predstavuje „biele miesto“ vo výskumoch spodnej kôry a plášťa. To znemožňuje predpovedať miesta prvých prerazení lávy a erupcií plynom nasýtených magiem, najmä vzhľadom na nedostatok plnohodnotného monitorovania útrob v zóne sibírskeho chochola.

Prvými príznakmi blížiacej sa katastrofy sa stanú častejšie zemetrasenia a lokálne emisie plynov pozdĺž okrajov sibírskeho bloku zemskej kôry. Po priblížení magmy k povrchu sa prudko začne topiť permafrost, čo môže viesť k poškodeniu infraštruktúry na zamrznutých pôdach. Po zohriatí pôdy sú možné aj výbuchy hydrátov plynov (metánu v štruktúre ľadu), čo sa prejaví vznikom veľkých kráterov a deštrukciou obývaných sídiel.

Masívne požiare sa stanú nevyhnutnými v dôsledku úniku metánu, prehrievania pôdy a uvoľňovania sopečných plynov. Ložiská uhľovodíkov na Sibíri a uhoľné panvy ako Kuzbas sa môžu vznietiť, ako sa to stalo už na prelome permu a triasu⁵⁴, keď boli ložiská uhlia vystavené tepelnému ohrevu až na 600 °C.

Erupcie začnú náhle a pokryjú mnohé miesta na rozľahlom teritóriu. Zemetrasenia s magnitúdou

7 až 8, trhliny a zlomy povedú k vyliatiu lávy na státisícoch štvorcových kilometroch. V okolí miest, kde prerazí láva, dôjde k masívnemu úhynu rastlín, zvierat a ľudí v dôsledku toxických emisií, ktoré v atmosfére vytvoria jedovatý „koktail“.

Už v prvých dňoch zahynú milióny ľudí a sopečný popol poškodí dopravné komunikácie, usadí sa na cestách a koľajach, zhorší viditeľnosť a zničí infraštruktúru. Letectvo bude tiež úplne pozastavené z dôvodu nebezpečenstva, ktoré predstavuje popol pre motory lietadiel a helikoptér.

Topenie permafrostu ešte viac zhorší situáciu – komunikačné trasy, potrubia, budovy a inžinierske siete začnú kolabovať. Mnoho miest zostane bez prístupu k vode, potravinám a elektrine, čo spôsobí humanitárnu krízu. Hromadná evakuácia bude vo veľkej časti erupčnej zóny nemožná, pretože láva, plyny, požiare a kyslé dažde spôsobia, že dopravné trasy budú nepoužiteľné. Panika zachváti milióny ľudí a evakuácia miliónov obyvateľov Sibíri povedie k sociálnej nestabilite a masovým nepokojom.

Ekonomika krajiny utrpí katastrofálne straty – ťažba ropy, plynu, uhlia, diamantov a kovov sa zastaví v dôsledku fyzického zničenia infraštruktúry, čo povedie k odstaveniu podnikov, nedostatku surovín a elektriny. Sopečná aktivita zdevastuje prírodné zdroje regiónu vrátane ropy a uhlia a zničí kľúčové ekonomické aktíva krajiny.

⁵⁴Elkins-Tanton, L. T., Grasby, S. E., Black, B. A., Veselovskiy, R. V., Ardakani, O. H., & Goodarzi, F. (2020). Field evidence for coal combustion links the 252 Ma Siberian Traps with global carbon disruption. *Geology*, 48(10), 986-991. <https://doi.org/10.1130/G47365.1>

Desaťročia po erupcii zostane Sibír zónou ekologickej kalamity. Katastrofa, ktorá postihne Rusko, nezvratne zmení jeho geografiu, ekonomiku a spoločnosť. Len 25 % územia krajiny zostane obývatel'ných, no bude čeliť obrovskému tlaku ekologických a sociálnych kríz.

Ekonomické pozície, historické pamiatky a väčšina prírodných zdrojov budú stratené a Sibír sa stane nevhodnou pre existenciu súčasnej civilizácie.

Dôsledky postupného prerážania sibírskeho chochola pre celý svet

Globálne dôsledky erupcie sibírskeho chochola zasiahnu celý svet a stane sa to v niekoľkých etapách.

V prvých dňoch sa preruší dopravné spojenie cez Sibír medzi Európou a Áziou a pre sopečný popol v atmosfére sa zastaví aj letecká doprava. Tieto procesy narušia globálnu logistiku a spôsobia rozsiahlu potravinovú krízu, pretože Rusko ako jeden z popredných vývozcov potravín prestane dodávať pšenicu a iné produkty. Prerušenie vývozu ropy, plynu a iných surovín z Ruska povedie k zvýšeniu cien, energetickej kríze a ekonomickej nestabilite v mnohých krajinách. Globálna ekonomika bude čeliť reťazovej reakcii finančných a sociálnych otrasov.

Oblaky popola a sírových aerosólov vyvolajú efekt globálneho zotmenia a znížia prílev slnečného žiarenia. To povedie k „vulkanickej zime“ s poklesom teplôt o 2 – 3 °C. Kyslé dažde a znečistenie pôdy poškodia poľnohospodárstvo nielen v Rusku, ale aj na celom svete. Masový hlad, nedostatok vody, toxický vzduch a kolaps klimatického systému povedú k postupnej smrti miliárd ľudí a zvierat. O pár rokov skolabujú sociálne systémy.

Postupom času sa sopečný popol začne usadzovať, no dôjde k dramatickým klimatickým zmenám. Uvoľňovanie metánu a oxidu uhličitého v dôsledku topenia permafrostu povedie k zosilneniu skleníkového efektu. Teploty začnú postupne stúpať o 5 – 10 °C, čo povedie k nestabilnej klíme, charakterizovanej prudkými teplotnými výkyvmi. Rozrušenie ozónovej vrstvy zvýši úroveň ultrafialového žiarenia na severnej pologuli, čím sa zhoršia následky erupcií.

Napriek svojej vzdialenosti od Sibíri bude Európa čeliť vážnym následkom erupcie sibírskeho chochola: popol pokryje severnú a východnú Európu a spôsobí početné respiračné ochorenia obyvateľstva. Kyslé dažde zničia lesy, mestskú infraštruktúru a poľnohospodársku pôdu. Po fáze prechodného ochladenia sa začne prudké oteplenie sprevádzané suchom na juhu a záplavami v strednej a severnej časti Európy.

Masová migrácia z Ruska, Ázie a Blízkeho východu spôsobí demografickú krízu a zintenzívni súťaž o zdroje. Európske krajiny sa budú musieť potýkať s neustálymi ekologickými, ekonomickými a sociálnymi výzvami.

Ázia, ktorá je najbližšie k epicentru erupcií, ponesie hlavné bremeno úderu. Znečistenie ovzdušia prachom a popolom sťažuje dýchanie a zapríčiní kyslé dažde, najmä v Číne, Mongolsku a Kazachstane. Poľnohospodárstvo v severnej Číne, kľúčovom potravinovom regióne, bude zdevastované nedostatkom slnečného svetla a zhoršujúcou sa kvalitou pôdy.

Teplotné výkyvy zdevastujú infraštruktúru a poľnohospodárske systémy na celom kontinente. Postupné zvyšovanie teplôt oceánov spôsobí

deoxygenáciu vody, čo zničí morské ekosystémy a povedie ku kolapsu rybolovu.

Časom sa účinky prebiehajúcich erupcií stanú len ničivejšími. Klimatické a ekologické krízy sa zhoršia, ľudstvo príde o mnohé moderné technológie, poznatky a podstúpi hlboký sklz vo vývoji. Svetová civilizácia sa ocitne na pokraji kolapsu.

Dlhodobé dôsledky postupného prerážania sibírskeho chochola pre planétu

Postupná erupcia sibírskeho chochola spôsobí masívne dlhodobé následky, ktoré radikálne zmenia planétu na milióny rokov. Atmosféra bude vystavená globálnemu znečisteniu toxickými látkami, čo povedie k tvorbe kyslých dažďov v planetárnom meradle a zničeniu ozónovej vrstvy. To zosilní ultrafialové žiarenie a ďalej destabilizuje globálne klimatické systémy.

Oceány sa kriticky okyslia, čo spôsobí masívne úhynny morských organizmov. Tieto procesy povedú ku kolapsu morských ekosystémov, narušeniu globálnych potravných reťazcov a kolapsu celej morskej biodiverzity.

Na súši sa hromadné vymieranie stane neodvratným v dôsledku toxických emisií do atmosféry, ničenia pôdných ekosystémov a

vymiznutia väčšiny rastlín. Úbytok opel'ovačov povedie ku kolapsu suchozemských ekosystémov. Predpokladá sa, že vyhynutie postihne 75 až 95 % všetkých existujúcich druhov.

Erupcia spôsobí komplexnú klimatickú, biologickú a geologickú krízu, ktorá úplne premení biosféru Zeme. Tento proces povedie ku kolapsu ľudskej civilizácie, smrti miliárd ľudí a návratu prežívajúcich rozptýlených skupín ľudí na vývojovú úroveň kamennej doby. Rozsah tejto katastrofy bude porovnateľný s najväčšími hromadnými vymieraniami v dejinách Zeme, čo umožní začať novú evolučnú etapu biosféry najskôr o milióny rokov.

Scenár 3.

Plánované kontrolované odplyňovanie (degazácia)

Existujúce metódy vulkanického geoinžinierstva

Vzhľadom na narastajúce napätie pod západosibírskou platňou a východosibírske kratónom súvisiace so vzostupom sibírskeho chochola, je potrebné prijať naliehavé opatrenia na minimalizáciu možných katastrofálnych následkov. Jedným z takýchto riešení je kontrolované uvoľnenie tlaku, lávy a plynov zo sekundárnych magmatických komôr, teda plánované kontrolované odplyňovanie (degazácia).

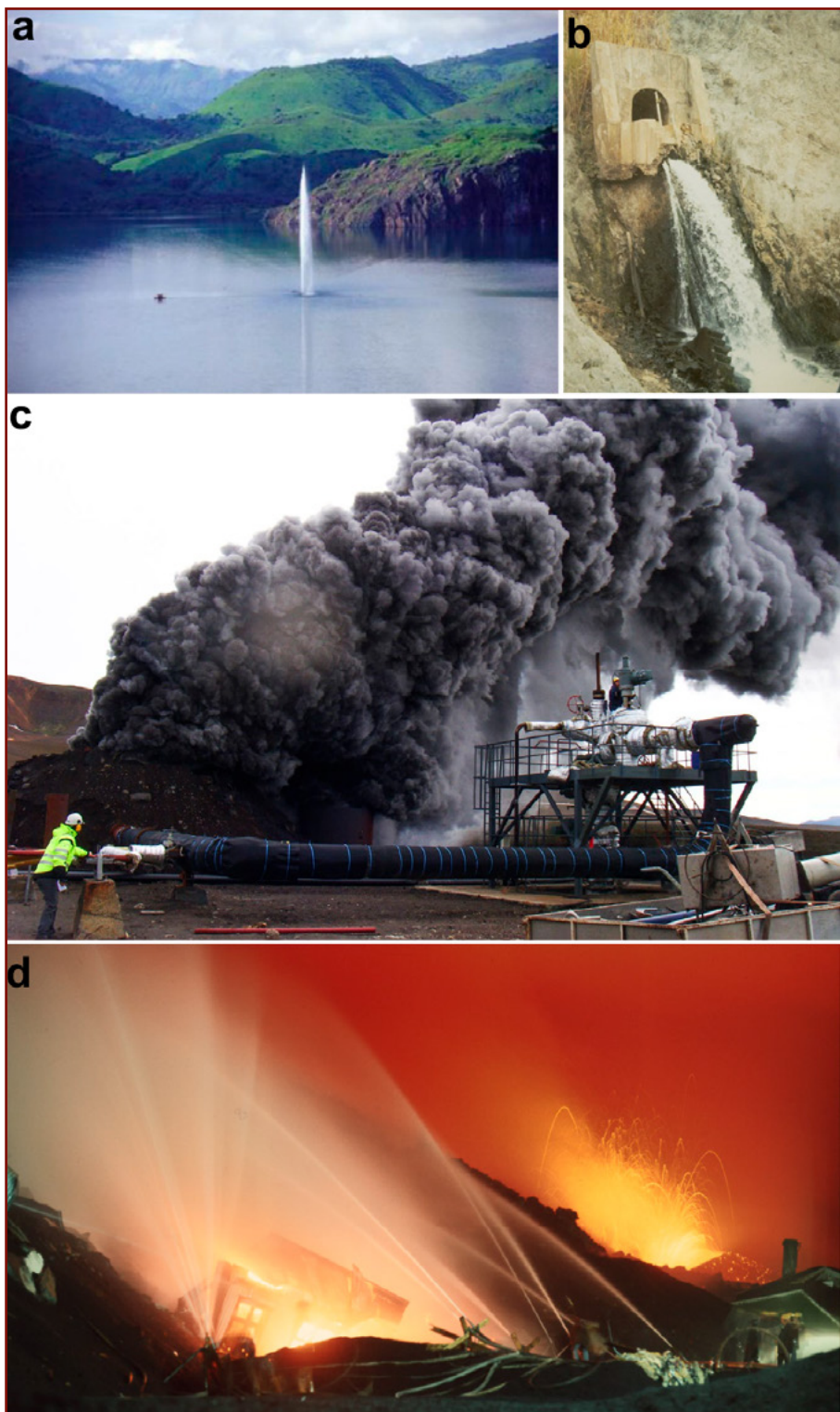
Moderné vedecké výskumy považujú odplyňovanie magmatických komôr za sľubnú metódu predchádzania rozsiahlym erupciám. Tento prístup poskytuje základ pre aplikáciu technológií sopečného geoinžinierstva nielen na sopkách alebo supervulkánoch, ale aj na riadenie aktivity magmatických chocholov. Koncept kontrolovaného odplyňovania sa premietol do množstva vedeckých publikácií a patentov vyvinutých odborníkmi z rôznych krajín.

Teoretické základy sopečného geoinžinierstva boli položené na začiatku 20. storočia a praktické experimenty sa uskutočňovali v jeho priebehu. Metódy sopečnej intervencie zahŕňali vŕtanie kráterov, odvodňovanie sopečných jazier,

vytváranie kanálov na odvod lávy, chladenie lávových prúdov morskou vodou, bombardovanie lávových prúdov a odčerpávanie skleníkových plynov (oxidu uhličitého a metánu) (obr. 87).

Od 60. rokov 20. storočia vykonáva Geologická služba Spojených štátov (USGS) v oblastiach lávových jazier na havajskej sopke Kilauea vrty na presmerovanie lávy. Podobné iniciatívy sa realizujú v Japonsku, na Islande a v Taliansku. Napríklad Japonsko testovalo technológie na zníženie tlaku v magmatických komorách a Island má úspešné skúsenosti s presmerovaním lávy na ostrove Heimaey, kde sa prúdy chladili vodnými delami. V Taliansku sa vyvíjajú systémy včasného varovania a techniky riadenia lávových prúdov, príkladom je explozívna likvidácia lávových bariér na Etne v roku 1983.

Dnes sa konajú medzinárodné vedecké konferencie a sympóziá o hĺbkových vrtoch v oblastiach sopečnej a geotermálnej aktivity, čo rozširuje vyhliadky na využitie sopečného geoinžinierstva na predchádzanie erupciám a znižovanie ich následkov na globálnej úrovni.



Obr. 87

a) Degazácia oxidu uhličitého z jazera Nyos v Kamerune, podľa Halbwachsa et al. (2020).

b) Drenážny tunel v stene krátera sopky Kelud, Indonézia (Global Volcanism Program image GVP-01120).

c) Súbežné vŕtanie magmatickej kapsy v Krafle na Islande v roku 2009 (obrázok GO Friðleifsson/IDDP).

d) Chladenie lávových prúdov pumpovanou morskou vodou v Heimaey, Island v roku 1973, Tristan H. Benediktsson.

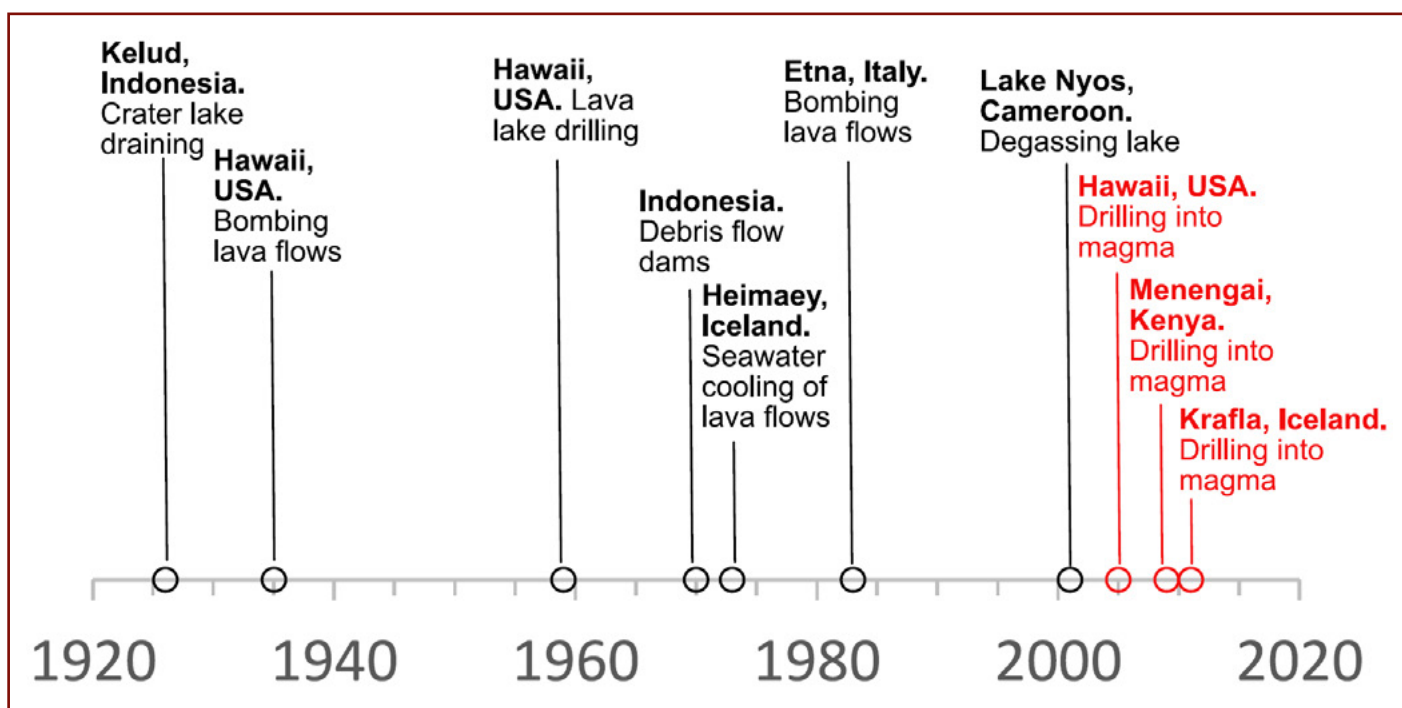
Zdroj: Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). The Ethics of Volcano Geoengineering. *Earth's Future*, 11(10), e2023EF003714.

<https://doi.org/10.1029/2023EF003714>

Diagram (obr. 88) zobrazuje chronológiu najpozoruhodnejších prípadov sopečného geoinžinierstva. Čierne kruhy predstavujú úmyselné zásahy, zatiaľ čo červené kruhy predstavujú neúmyselné ovplyvnenie sopečnej aktivity.

Existujú aj patentované metódy na plánované odplynenie a zníženie rizík erupcií sopiek a supervulkánov.

Napríklad, princíp jednej z technológií, patentovanej dvoma ruskými špecialistami, spočíva v prevencii nekontrolovaných lavínovitých erupcií sopiek šikmým vŕtaním vrtov a reguláciou tlaku v magmatických komorách (obr. 89).



Obr. 88

Chronológia niektorých pozoruhodných prípadov sopečného geoinžinierstva. Čierne kruhy predstavujú úmyselné zásahy, zatiaľ čo červené kruhy predstavujú neúmyselné sopečné zásahy.

Zdroj: Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). The Ethics of Volcano Geoengineering. *Earth's Future*, 11(10), e2023EF003714. <https://doi.org/10.1029/2023EF003714>



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2007112443/03, 04.04.2007

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.04.2007

(45) Опубликовано: 10.01.2009 Бюл. № 1

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2098850 C1, 10.12.1997. SU 1193223
A, 23.11.1985. RU 2073769 C1, 20.02.1997. RU
2057839 C1, 10.04.1996. RU 2231092 C2,
20.06.2004. SU 1699979 A1, 23.12.1991. US
4319648 A, 16.03.1982.Адрес для переписки:
109145, Москва, Жулебинский б-р, 1, кв.82,
Г.К.Мкртумяну

(72) Автор(ы):

Мкртычан Олег Альбертович (RU),
Мкртумян Георгий Каропетович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Мкртычан Олег Альбертович (RU),
Мкртумян Георгий Каропетович (RU)

(54) СПОСОБ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЛАВИНООБРАЗНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к способам предотвращения неконтролируемого - лавинообразного извержения вулканов и организации контролируемого транспортирования магмы для ее использования при строительстве. Обеспечивает повышение эффективности способа. Сущность изобретения: по способу управляют давлением во вторичных магматических очагах под вулканами, проявляющими сольфатарную активность. Для этого производят наклонное

бурение каналов в основание вторичного магматического очага. В этот очаг подают сжатый газ. Повышают давление во вторичном магматическом очаге и замедляют поступление в него магмы из первичного очага. При этом осуществляют добычу и транспортирование магмы для строительства, накопившейся во вторичном магматическом очаге, через пробуренные каналы. При этом не допускают достижения критической величины давления, при которой происходит лавинообразное извержение.

5 0 8 C 1

RU 2 343 508 C 1

Obr. 89

Patent: Spôsob prevencie lavínovitých sopečných erupcií

Vynález sa týka spôsobov prevencie nekontrolovaných lavínovitých sopečných erupcií a organizácie kontrolovaného transportu magmy na jej použitie v stavebníctve. To zvyšuje účinnosť prístupu.

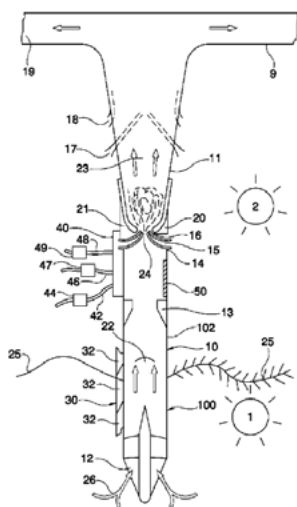
Podstata vynálezu: metóda sa používa na reguláciu tlaku v sekundárnych magmatických komorách pod sopkami vykazujúcich solfatarovú aktivitu. Na tento účel sa do základne sekundárnej magmatickej komory vykonáva šikmé vŕtanie kanálov. Do tejto komory sa privádza stlačený plyn. V sekundárnej magmatickej komore sa zvyšuje tlak, čím sa do nej spomaľuje prítok magmy z primárnej komory. Súčasne sa magma nahromadená v sekundárnej magmatickej komore cez vyvŕtané kanály odsáva a prepravuje na stavebné účely. Tým sa bráni dosiahnutiu kritickej hodnoty tlaku, pri ktorej dochádza k lavínovitej erupcii.

Zdroj: <https://patentimages.storage.googleapis.com/0e/4a/51/11fd6e028d2813/RU2343508C1.pdf>

Ďalšiu technológiu vyvinul americký vynálezca (obr. 90). Technológia popisuje metódy čerpania magmy zo sopečných magmatických komôr, ako je tá v Yellowstonskom supervulkáne, aby sa predišlo nožnej katastrofickej erupcii.

Základnou myšlienkou je vytvorenie umelých kanálov (potrubí), ktoré vyvedú magmu na povrch, kde ju možno spracovať a použiť napríklad na výrobu energie.

(12) United States Patent Stratford		(10) Patent No.: US 7,284,931 B2
		(45) Date of Patent: Oct. 23, 2007
(54)	MAGMA EVACUATION SYSTEMS FOR THE PREVENTION OF EXPLOSIONS FROM SUPERVOLCANOES	3,357,505 A * 12/1967 Armstrong et al. 175/16
		3,396,806 A * 8/1968 Benson 165/45
		3,693,731 A * 9/1972 Armstrong et al. 175/16
		3,957,108 A * 5/1976 Van Huisen 165/45
		3,967,675 A * 7/1976 Georgii 166/302
		3,991,817 A * 11/1976 Clay 165/45
		4,134,462 A * 1/1979 Clay 175/16
		4,776,169 A * 10/1988 Coles, Jr. 165/45
(76)	Inventor: Brian Stapleton Stratford, 40 Field Ris , Little ver, Derby DE23 1DE (GB)	
(*)	Notice: Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 0 days.	
(21)	Appl. No.: 10/230,549	GB 2362410 11/2001
(22)	Filed: Aug. 29, 2002	JP 070071020 A 3/1995
		JP 100076104 A 3/1998
		JP 100077952 A 3/1998
		JP 100078497 A 3/1998
(65)	Prior Publication Data US 2003/0145592 A1 Aug. 7, 2003	
(30)	Foreign Application Priority Data Feb. 4, 2002 (GB) 0202465.1	
(51)	Int. Cl. E21B 36/00 (2006.01) E21B 43/24 (2006.01)	* cited by examiner
(52)	U.S. Cl. 405/131; 405/258.1; 405/303; 166/302; 166/57	<i>Primary Examiner</i> —Tara L Mayo
(58)	Field of Classification Search 405/52, 405/258.1, 130, 131, 303; 165/45; 166/302, 166/304, 57–62 See application file for complete search history.	(74) <i>Attorney, Agent, or Firm</i> —Woodard, Emhardt, Moriarty, McNett & Henry LLP
(56)	References Cited U.S. PATENT DOCUMENTS 3,115,194 A * 12/1963 Adams 376/273	(57) ABSTRACT An apparatus controls the evacuation of volcanic magma to prevent explosions. Magma evacuation is through a single evacuation tube that heats the magma flow within the tube to prevent stickiness of the magma in the tube. The heating may use small combustion chambers to heat steam, which in turn heats and stabilizes the magma flow. Stability is aided by central cooling, where needed, using water jets from nozzles located at the wall of the tube.
		25 Claims, 2 Drawing Sheets



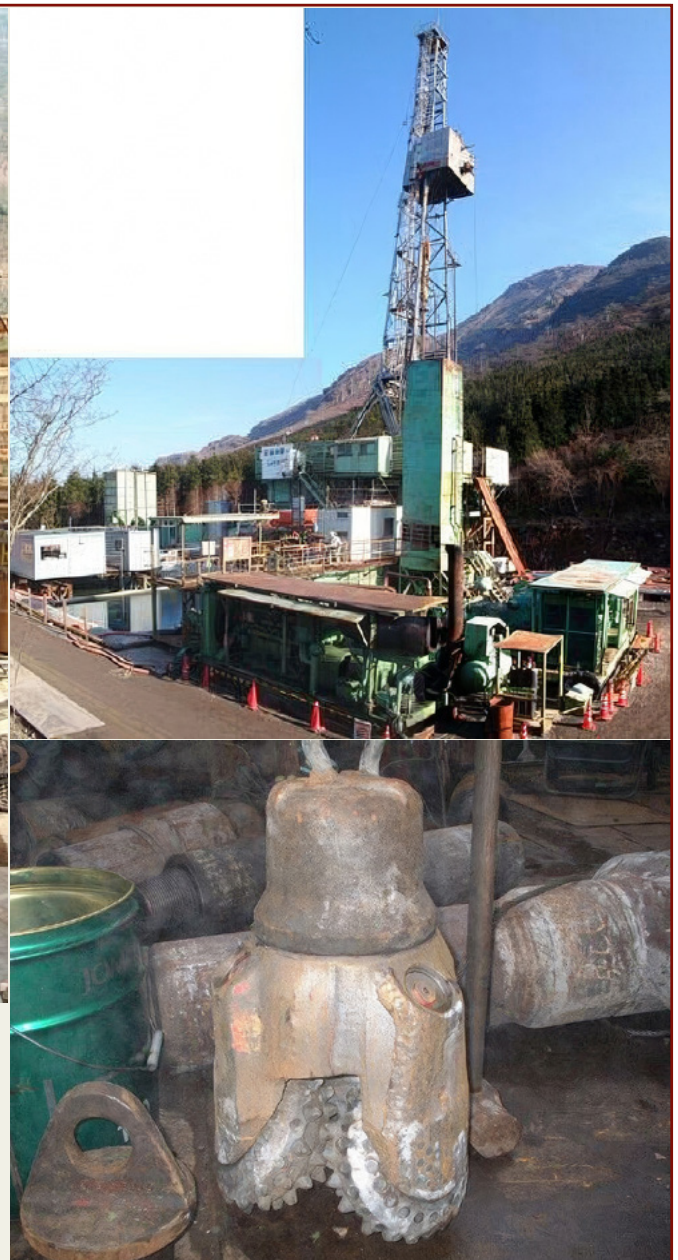
Obr. 90
Patent: Systémy evakuácie magmy na zabránenie explóziám supervulkánov

Zariadenie riadi čerpanie sopečnej magmy, aby sa zabránilo výbuchom. Magma sa odčerpáva cez jedno evakuačné potrubie, v ktorom sa prúd magmy ohrieva, aby sa zabránilo jej zlepeniu v potrubí. Na ohrievanie môžu byť použité malé spaľovacie komory na dodávku pary, ktorá následne ohrieva a stabilizuje prúd magmy. V prípade potreby je stabilita udržiavaná centrálnym chladením pomocou prúdov vody z trysiek umiestnených na stenách potrubia.

Zdroj:
<https://patentimages.storage.googleapis.com/5f/dc/0d/7b5b99d61d1a75/US7284931.pdf>

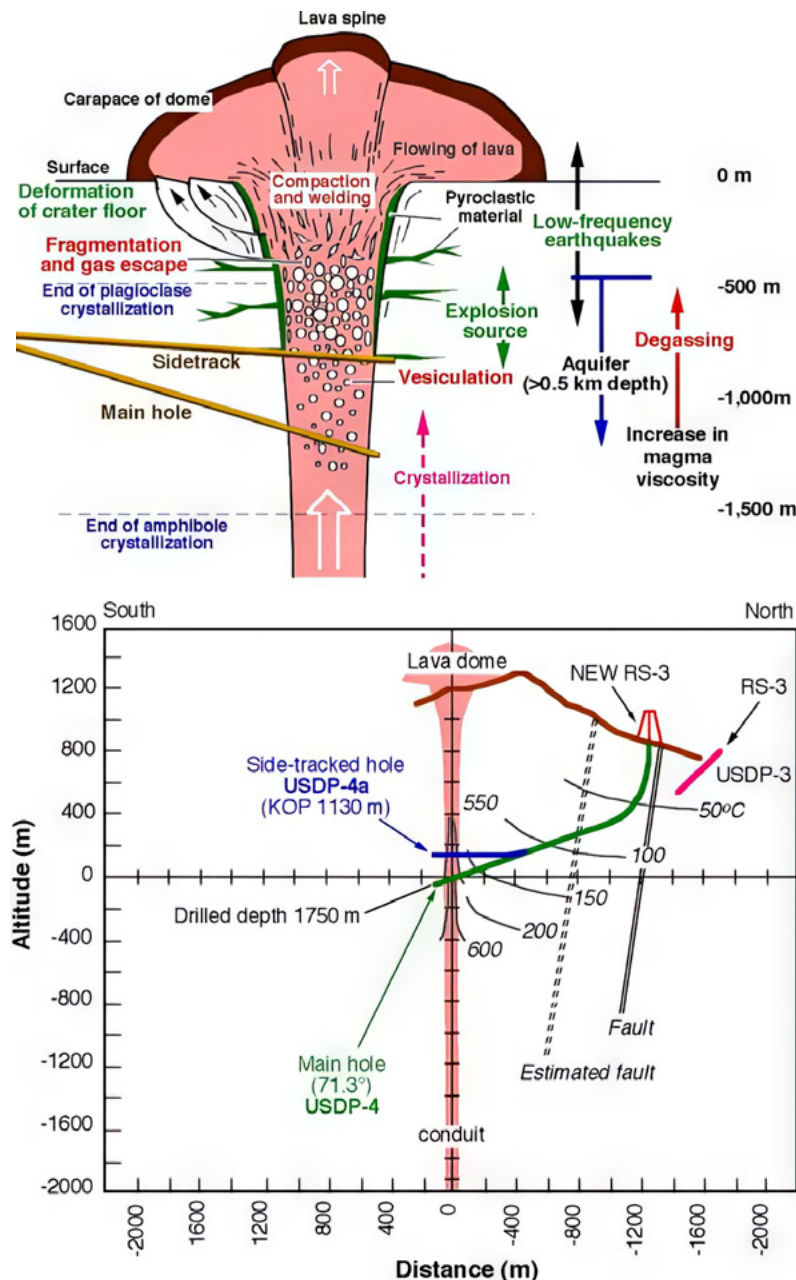
Ďalším príkladom úspešného odplynienia je japonský projekt Unzen ([Unzen Scientific Drilling Project](https://www.icdp-online.org/projects/by-continent/asia/usdp-japan/gallery/), USDP). Je to 6-ročná iniciatíva, ktorá bola spustená v apríli 1999 a zameraná na štúdium histórie rastu, podpovrchovej štruktúry a procesov výstupu magmy sopky Unzen (obr. 91). Prvá fáza zahŕňala vyvrtanie dvoch vrtoŧ na svahoch sopky a vytvorenie modelu jej

štruktúry. Druhá fáza sa zameriavala na vŕtanie kanála v magme z erupcií v rokoch 1990 – 1995 s cieľom analyzovať mechanizmus odplynienia. Na dosiahnutie úspešného vŕtania bola vyvinutá stratégia, ktorá zahŕňala vertikálne vŕtanie, po ktorom nasledovalo zväčšenie sklonu vrtu (obr. 92).



Obr. 91
Vŕtné zariadenie na vŕtanie sopky Unzen v roku 1995

Zdroj:
<https://www.icdp-online.org/projects/by-continent/asia/usdp-japan/gallery/>



Obr. 92

a) Obrázok lávového dómu a hornej časti šachty sopky Unzen. K účinnému odplynaniu zo spenenej magmy došlo počas jej fragmentácie a žihania v hornej časti šachty. Stav šachty bol preskúmaný pri vŕtaní hlavnej šachty (USDP-4) v roku 2003 a kontinuálny odber vzoriek jadra sa vykonával pri vŕtaní bočnej šachty (USDP-4a) v roku 2004.

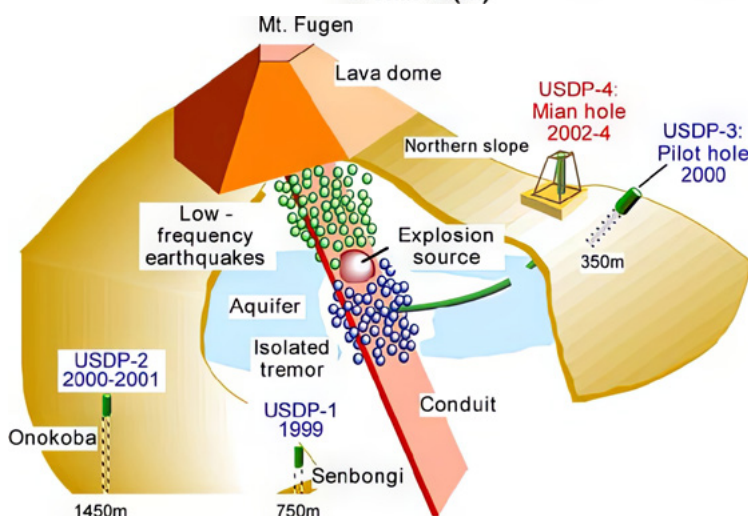
Zdroj: USDP project. (n.d.). In Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. (dátum prístupu 31. december 2024) <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20>

b) Trajektórie vrtov šachiet. Z bodov New RS-3 a RS-3 sa plánuje vyvŕtanie hlavných bočných šachiet a pilotnej šachty.

Zdroj: USDP project. (n.d.). In Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. (dátum prístupu 31. december 2024) <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20>

c) Trojrozmerná schéma vŕtania šachty

Zdroj: Volcanic fluid research center. (n.d.). Understanding of the conduit system at Unzen Volcano. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. (údaje k 31. decembru 2024) <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/vrc/usdp/conduit.html>



Dnes ľudstvo disponuje dostatočným technologickým a inžinierskym potenciálom na to, aby preniklo do sopečných systémov, avšak každý prípad plánovaného odplynenia si vyžaduje čo najstarostlivejšiu prípravu, analýzu veľkého množstva údajov a čo najpresnejšie výpočty. A aj v tomto prípade zostávajú riziká.

Uvedené príklady boli vyskúšané na obyčajných sopkách, ktoré sa svojou veľkosťou rozhodne líšia od rozmerov obrovského magmatického chochola na Sibíri. Tento chochol predstavuje hrozbu ďaleko presahujúcu silu jedného supervulkánu, porovnateľnú s energiou výbuchov tisícky Yellowstonekých kalder. Diskusia o tomto probléme sa však stala aktuálnou práve preto, že existujú potenciálne prístupy k jeho riešeniu.

Pri správnom prístupe je ľudstvo schopné vyvinúť program odplynenia magmatického chochola založený na nahromadených globálnych skúsenostiach odborníkov. Jeho hlavnou úlohou bude minimalizácia následkov vzostupu sibírskeho chochola znížením tlaku lávy a plynov v sekundárnych magmatických komorách, čo zabráni rozsiahlym nekontrolovaným erupciám.

Realizácia takéhoto programu si bude vyžadovať úzku medzinárodnú spoluprácu a konsolidáciu úsilia vedcov a inžinierov z celého sveta. Len jednotný prístup nám umožní vyvinúť efektívne riešenia zamerané na zaistenie bezpečnosti celého ľudstva.

Príklad programu plánovaného odplyňovania sibírskeho chochola

Program môže zahŕňať rozvoj niekoľkých smerov súčasne:

1. Vytvorenie monitorovacej siete

1.1 Bude potrebné vytvoriť sieť vysoko citlivých senzorov a satelitných pozorovaní na monitorovanie seizmickej a tepelnej aktivity v regióne. To umožní včasnú detekciu zón prieniku sekundárnych komôr.

1.2 Bude potrebné vykonať podrobné zmapovanie sekundárnych magmatických komôr metódami seizmického prieskumu. Bude dôležité vopred odhadnúť tlak a objem magmy v každej sekundárnej komore.

1.3 Potom bude potrebné vyvŕtať prieskumné a monitorovacie vrty a v anomálnych zónach

nainštalovať snímače tlaku, teploty a seizmickej aktivity.

2. Vývoj technológií kontrolovaného odplyňovania a blokovania magmatických kanálov

2.1 Bude potrebné vypracovať plán vŕtania hlbokých šikmých vrtov (do hĺbky 8 km) v bezpečných zónach. Na dosiahnutie sekundárnych komôr bude potrebný podrobný výpočet trajektórií šikmých vrtov. Bude potrebné použiť technológie vŕtania odolné voči vysokým teplotám a tlakom, to znamená použitie žiaruvzdorných materiálov na spevnenie stien vrtov, vytvorenie systému sledovania tlaku a teploty vo vrtoch.

2.2 Bude potrebné vyvinúť proces na odvod plynov a lávy prostredníctvom postupného riadenia tlaku v sekundárnych komorách pomocou systému vrto. To si vyžaduje kontrolu rýchlosti odplyňovania, aby sa zabránilo prudkým rozdielom tlaku, a použitie systému kompresorov na riadenie tlaku plynu. Na zabránenie emisii toxických látok do atmosféry bude potrebný filtračný a chladiaci systém. Odvádzanie lávy a plynov sa bude vykonávať do stabilizácie tlaku v každej komore.

2.3 Potom bude potrebné vypracovať plán smerovaného jadrového výbuchu v konkrétnych vrtoch pre zahradenie vrstiev nad sekundárnou magmatickou komorou. Tým sa zabráni tomu, aby sa prebytočná magma dostala na povrch a minimalizovali sa emisie popola.

Postupné uvoľňovanie tlaku zabezpečí stabilitu Sibíri a ochráni hlavné centrá osídlenia, možno s výnimkou Noril'ska a okolitých obcí.

2.4 Počas procesu odvodu lávy z komôr bude potrebné čo najviac kontrolovať jej rozlievanie. Snažiť sa ho nasmerovať cez špeciálne pripravené kanály smerom k arktickým moriam. Vytvoriť program na využitie magmy pre výstavbu (napríklad na vytvorenie umelých ostrovov alebo spevnenie pobrežnej línie).

3. Evakuácia obyvateľstva

Bude potrebné zaviesť systém včasného varovania a vypracovať evakuačné plány pre nepredvídané situácie. Vyžiada si to aj plánovanú organizáciu bezpečnej evakuácie obyvateľstva z rizikových zón a jeho adaptácie a sociálneho zabezpečenia s prihliadnutím na možnosť dlhodobého presídlenia.

4. Zachovanie infraštruktúry

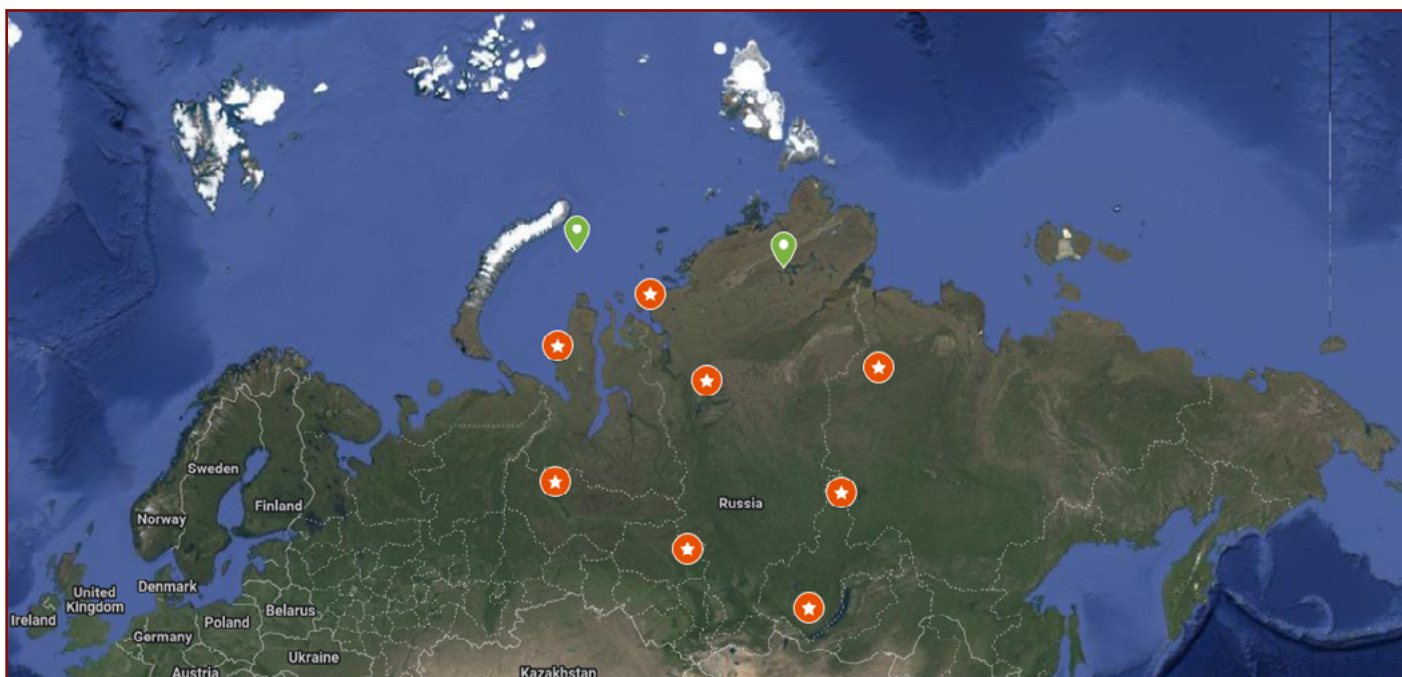
Potrebné je vypracovať plány na záchranu a evakuáciu strategických objektov z oblastí vystavených riziku zaliatia lávou. Vybudovať rezervné skladiská v bezpečných oblastiach pre evakuované strategické zdroje regiónu, ako sú ropa, plyn, neželezné a drahé kovy, rudy, hnojivá, potraviny, voda a lieky.

Zdôvodnenie výberu miesta pre vedecko-výskumné vrty na monitorovanie dynamiky súčasného sibírskeho magmatického chochola

Základným krokom k pochopeniu rýchlosti a smeru výstupu chochola, roztekania jeho hlavy a jeho prenikania cez trhliny v zemskej kôre je monitorovanie geotermálnych a geofyzikálnych parametrov v hĺbke. To si vyžaduje vŕtanie nových vrtoŧ, vykonávanie pravidelných meraní teploty a tlaku, odber vzoriek zloženia

plynov, sledovanie markerov zintenzívnenia magmatických procesov, seizmického šumu a iných parametrov.

Na realizáciu prieskumných vrtoŧ bolo navrhnutých desať lokalít (obr. 93, 94).



Obr. 93

Predbežné umiestnenie 10 odporúčaných lokalít na vŕtanie prieskumných vrtoŧ

Borehole name	Locality or nearby infrastructure	Coordinates X (Latitude)	Coordinates Y (Longitude)	Area
Ц 1	Talnakh District, Norilsk, Krasnoyarskiy Krai	69.4459423	88.7670478	Taymyr Peninsula
3C3 2	Kharasavey field, Yamal Peninsula	71.1849618	66.9830117	Western Siberia
3Ю3 3	Kislorskoye field, Beloyarsky District, Khanty-Mansi Autonomous Okrug	63.6572613	66.5569363	Western Siberia
Ю3 4	Tsentralny settlement in Verkhneketsky District, Tomsk Region	58.9454	86.0127	Western Siberia
Ю 5	Chichkova village, Chichkovskoye municipal formation, Ust-Udinsky District, Irkutsk Region	54.19598	103.7021	Eastern Siberia
ЮВ 6	Nakanno village in Katangsky District, Irkutsk Region	62.89873	108.45027	Eastern Siberia
В 7	Zhilinda village in Olenyoksky District, Yakutia	70.1528916	113.9261131	Eastern Siberia
С3 8	Dikson settlement in Taymyrsky Dolgano-Nenetsky District, Krasnoyarskiy Krai	73.50246	80.5498	Taymyr Peninsula
СВ 9	Lead-zinc deposit to the northwest of Lake Taymyr, Taymyr Peninsula	74.52147	100.02184	Eastern Siberia
С3 10	Rogozinskaya-1 site, Kara Sea	75.16298	69.74128	Western Arctic Platform

Obr. 94

Tabuľka 10 odporúčaných lokalít na vedecko-výskumné vŕtanie s cieľom monitorovania postupu sibírskeho chochola, obsahujúca názov vrtu, súradnice, blízke sídlo alebo infraštruktúru, geologickú stavbu profilu

Výberové kritériá pre tieto vrty boli založené na nasledujúcich princípoch:

1. Umiestnenie vrtu vzhľadom k najväčšiemu priesečníku tepelných a geodynamických anomálií spojených s prenikaním a roztekáním hlavy chochola. Na základe tohto princípu bol jeden vrt navrhnutý v mieste centrálnej časti predpokladaného vzostupu chochola, 7 vrtov bolo navrhnutých po obvode predpokladaného roztekania magmy. Ďalší vrt bol navrhnutý v oblasti Bajkalu, v smere predpokladaného aktívneho pohybu magmy pod základňou východosibírskeho kratónu. Ešte jeden vrt bol navrhnutý v oblasti Karského mora na monitorovanie postupu chochola pod oceánskou kôrou arktického šelfu.

2. Umiestnenie vrtov bolo zvolené optimálne pre budúce seizmotomografické práce, aby mohli informácie zo seizmických senzorov vo vrtoch pri následnej konverzii poskytnúť najzreteľnejšie 3D zobrazenie. Teda tak, aby mriežka seizmických senzorov vo vrtoch bola umiestnená optimálne pre seizmickú tomografiu podložja.

3. Miesta vrtov boli vybrané s ohľadom na možnosť dodania vrtnej techniky a zabezpečenie príjazdových ciest (dopravnú dostupnosť). Keďže sever západnej a východnej Sibíri má mimoriadne ťažko prechodné územia, močaristú krajinu, málo ciest a extrémne klimatické podmienky, výber vrtných miest sa opieral o dispozíciu existujúcej infraštruktúry na vykonávanie vedecko-výskumných prác – jestvujúce cesty, sídla a fungujúce vrtné plošiny. Dve lokality boli vybrané na aktuálne prevádzkovaných ropných poliach, ktoré vlastní Gazprom a Rosneft, ostatné sa nachádzajú v oblastiach blízko ložísk ropy, plynu a iných nerastných surovín. Treba poznamenať, že ak nie je možné vrty vyvŕtať v špecifikovaných súradniciach, je prípustné posunúť ich o 10 – 20 km v ľubovoľnom smere.

Odporúčané metódy prieskumu vrtov

Pre komplexné monitorovanie a výskum plášťového chochola je potrebné zozbierať nasledujúce parametre zo senzorov v prieskumných vrtoch:

- 1. Monitorovanie teploty** – meranie teploty v rôznych hĺbkach na analýzu tepelných anomálií a zintenzívnenia geotermálneho prúdenia v dôsledku pohybu magmy v oblastiach roztekania chochola.
- 2. Tlak** – stanovenie tlaku vo vrte na posúdenie zmien hydrodynamických podmienok v dôsledku aktivity magmy a fluidnej fázy.
- 3. Odber vzoriek plynov** – zber vzoriek plynov pochádzajúcich z hlbokých vrstiev na štúdium ich zloženia a možného vplyvu magmatickej aktivity.
- 4. Seizmický výskum** – inštalácia štandardných aj širokopásmových seizmických senzorov na zaznamenávanie seizmickej aktivity s cieľom vytvoriť podrobnú seizmotomografiu zemskej kôry a plášťa pre nepretržité monitorovanie stavu chochola.
- 5. Zloženie formačných kvapalín** – štúdium zloženia formačných kvapalín kvôli identifikácii možného tepelného alebo magmatického napájania.
- 6. Geomechanické výskumy** – meranie napätí v horninách s cieľom analyzovať stav napätia litosféry vystavenej deformáciám v dôsledku prenikania chochola.
- 7. Elektromagnetické metódy** – vykonanie elektromagnetického výskumu pre zaznamenanie zmien elektrických vlastností prostredí súvisiacich s prenikaním magmy.

Zozbierané údaje poslúžia ako základ pre zostavenie komplexného modelu dynamiky

plášťového chochola, ako aj pre posúdenie jeho vplyvu na geologické procesy na Sibíri.

Špecifiká vrtania a blokovanie magmatických kanálov počas plánovaného odplyňovania

Hlavným účelom vrtania vrtoch počas plánovaného odplyňovania bude zníženie tlaku v sekundárnych magmatických komorách chochola, zabránenie výbuchom magmy a organizovanie kontrolovaného odvádzania plynu a lávy.

V úvodnej fáze bude vrtanie prebiehať za účasti operátorov, keďže v malej hĺbke predstavuje proces štandardnú technologickú úlohu s minimálnymi rizikami pre personál. Na tento účel budú použité tradičné vrtné súpravy vybavené systémami monitorovania teploty a tlaku, čo umožní kontrolovať proces a promptne reagovať na odchýlky od normy.

Pri dosiahnutí kritickej hĺbky a priblížení sa k aktívnym zónam magmatického systému sa riziko pre ľudí výrazne zvyšuje. V tejto fáze budú musieť byť práce úplne automatizované. Použijú sa špecializované vrtné súpravy s automatickým riadením. Proces vrtania bude riadený na diaľku pomocou softvéru, ktorý analyzuje prichádzajúce údaje v reálnom čase a upravuje činnosti zariadenia.

Na zvýšenie presnosti kontroly budú operátori využívať technológie virtuálnej reality, ktoré umožňujú detailné ovládanie zariadení bez toho, aby sa fyzicky nachádzali v nebezpečnej zóne. Tým sa bude môcť znížiť pravdepodobnosť havárií spojených s únikom plynov pod vysokým tlakom alebo deštrukciou zariadení rázovou vlnou.

Monitorovanie stavu vrtného komplexu a životného prostredia sa bude vykonávať

pomocou dronov a robotov. Drony vybavené kamerami, termovíziou a senzormi budú zaznamenávať úniky plynu, tepelné anomálie a seizmickú aktivitu. Roboty pracujúce priamo v zóne vrtania budú zbierať údaje o teplote, tlaku a chemickom zložení prostredia a prenášať ich do automatizovaných riadiacich centier. Tieto technológie umožnia minimalizovať prítomnosť ľudí vo vysoko rizikových zónach a zaistiť vysokú úroveň presnosti a bezpečnosti.

Po ukončení vrtania je v pláne vykonanie kontrolovaného odplyňovania – postupného uvoľňovania tlaku a odvádzania veľkých objemov lávy. V záverečných fázach, po výraznom znížení objemu magmy a plynov, môže vzniknúť potreba vykonať kontrolovaný výbuch na uzavretie kanálov vzostupu magmy. Jedna z navrhovaných metód zahŕňa smerovaný jadrový výbuch v realizovanom vrte. Jeho účelom je zmiernenie tektonických napätí a vytvorenie stabilných štruktúrnych bariér, blokujúcich magmatické kanály.

Tento prístup predpokladá rozrušenie hornín vo vysoko namáhaných zónach, po ktorom nasleduje ich tavenie a ochladzovanie pod vplyvom tepelnej energie. To bude slúžiť na vytvorenie monolitnej bariéry, ktorá môže úplne alebo čiastočne blokovať prístup magmy k povrchu. Termodynamické pôsobenie môže tiež znížiť tektonické napätie, čím sa zníži pravdepodobnosť ďalších erupcií.

Realizácia jadrových výbuchov si vyžaduje vysokú presnosť výpočtov, vrátane hodnotenia

litostatického tlaku, tvrdosti a hustoty hornín, ako aj charakteristík magmatickej taveniny. Tieto faktory je potrebné brať do úvahy, aby sa dosiahla

maximálna účinnosť metódy a minimalizovali sa možné riziká.

Výber optimálneho času na vŕtanie vrtov počas plánovaného odplyňovania

V súčasnosti sa naši špecialisti zameriavajú najmä na štúdium optimálnych časových rámcov vŕtania pre plánované odplynenie. Hoci je priskoro robiť konečné závery, predbežné výpočty už naznačujú možnosť presného výberu najvhodnejšieho času na začatie odplyňovania. Získané výsledky naznačujú, že pri správne zvolenom načasovaní môže byť niekoľkonásobne znížené riziko možných komplikácií.

Pri procese vŕtania je potrebné brať do úvahy nielen fyzikálne a mechanické vlastnosti hornín vrátane ich pevnosti a lámavosti, ale aj časové parametre spojené s nebeskou mechanikou. Výpočty musia vychádzať z analýzy polohy Zeme na ekliptike, fázy Mesiaca, polohy veľkých planét,

ako je Jupiter, a tiež aktuálnej úrovne slnečnej aktivity. Okrem toho je dôležitým faktorom monitorovanie zemetrasení s hlbokým ohniskom v oblasti budúcich vrtov, pretože môžu výrazne zvýšiť lokálnu seizmickú aktivitu.

V tejto chvíli je sformovaná všeobecná predstava o mechanizme a kľúčových zákonitostiach procesu, ale tieto údaje vyžadujú ďalšie viacnásobné overenie. Získané výsledky musia byť nielen starostlivo opakovane preverené naším vedeckým tímom, ale aj potvrdené nezávislými výskumami a modelmi iných špecialistov.

Scenáre výsledkov realizácie plánovanej degazácie sibírskeho chochola

Počas plánovaného odplyňovania sibírskeho chochola sú možné tri hlavné scenáre vývoja udalostí, vypočítané s ohľadom na dve fázy projektu: skoršiu a neskoršiu fázu. Pozrime sa na ne podrobnejšie.

1. Minimálne škody pre územie Ruska

Ak bude proces odplyňovania a odvádzania prebytočnej lávy zo sekundárnych magmatických komôr modelovaný medzinárodným tímom odborníkov a výpočty budú vykonané starostlivo a presne s prihliadnutím na všetky geologické danosti, obe fázy odplyňovania

prebehnú bez nehôd a komplikácií. Vtedy sa škody na území Ruska znížia na minimum – strata bude predstavovať 5 – 7 % rozlohy krajiny, v extrémnom prípade až 10 % (rádius poškodenia asi 500 – 600 km). V rámci tohto scenára je možné zabezpečiť ochranu veľkých miest na území Krasnojarského kraja a vyhnúť sa stratám na životoch. Navyše sa predpokladá, že ak sa udalosti vyvinú priaznivo, prúd lávy môže byť presmerovaný do arktických morí, čo Rusku umožní zväčšiť svoje územie rozšírením pobrežnej línie.

2. Stredne veľké škody pre územie Ruska

V tomto scenári sa predpokladá úspešné vykonanie skoršej fázy odplyňovania, ale v neskorších fázach môžu nastať nepredvídané komplikácie, ako napríklad náhla explózia plynu alebo výron lávy. Keďže v tomto čase už bude časť plynov a lávy vypustená, následky budú menej deštruktívne. Môže dôjsť k výlevu tekutých čadičových láv, charakteristických pre Island alebo Havaj, alebo k stredne výbušnej erupcii. V tomto prípade sa možná strata územia zvýši na 25 – 30 % (asi 4 – 5 miliónov km²). Dôsledky môžu postihnúť mestá v okruhu 1 000 km od aktívnej zóny. Tento scenár však nepovedie ku globálnej civilizačnej katastrofe ani k nezvratnej deštrukcii na území Ruska. Ľudstvo bude schopné vyrovnať sa s novými klimatickými a ekologickými výzvami.

3. Maximálne škody pre Rusko a celý svet

Tento scenár predpokladá, že neskorá iniciatíva alebo nedostatočná kvalifikácia špecialistov povedie k vážnym problémom. Nedostatok výskumov, chyba vo výpočtoch alebo vrtnie cez mäkkú alebo rozpraskanú horninu môžu narušiť chod operácie. Ak dôjde ku komplikácii v skoršej fáze odplyňovania, keď je tlak v komorách najvyšší, môže to spôsobiť jeden z dvoch katastrofických následkov: okamžitú explóziu celého systému sibírskeho chochola alebo pomalé, ale rozsiahle výlevy lávy, podobne ako pri vytváraní sibírskych trapov.

Napriek potenciálnym rizikám je pravdepodobnosť takehoto vývoja udalostí extrémne nízka, keďže je ťažké predstaviť si realizáciu takehoto komplexného projektu bez náležitej medzinárodnej prípravy.

Optimistický a najpravdepodobnejší variant predpokladá stratu iba 5 – 7 % územia Ruska s minimálnymi škodami. V prípade komplikácií v neskorších fázach sa dokonca môže poškodenie zvýšiť na 25 – 30 %, čo zostáva výrazne priaznivejšie ako dôsledky nečinnosti. Riziko vážnejšej deštrukcie počas procesu plánovaného odplyňovania je pre Rusko alebo celý svet zanedbateľné.

Realizácia plánovaného odplynienia poskytne Rusku unikátne skúsenosti s riadením globálnych geodynamických rizík, čo posilní jeho pozíciu medzinárodného vedeckého a technologického lídra. Úspešná realizácia projektu preukáže schopnosť krajiny vyrovnáť sa s výzvami planetárneho rozsahu a prispieť k posilneniu globálnej spolupráce v oblasti predchádzania prírodným katastrofám. To stabilizuje nielen vnútropolitickú a spoločenskú situáciu, ale posilní tiež medzinárodnú spoluprácu pri riešení globálnych problémov.

Kontrolované odplynienie sibírskeho chochola môže ovplyvniť nielen lokálnu zónu, ale aj iné sopečné systémy – Yellowstone a iné stratovulkány po celom svete. Magmatické rezervoáre a ich dynamika tvoria jedinú vzájomne prepojenú globálnu sieť fungujúcu ako jednotný geomechanický mechanizmus. Kontrolované odtlakovanie v jednom segmente môže znížiť systém napätí v magmatických rezervoároch a predísť reťazovým reakciám a erupciám. Dá sa to chápať ako odtlakovanie pneumatiky automobilu: zníženie tlaku v jednej jej časti umožňuje prerozdeliť záťaž a predísť prasknutiu v kriticky namáhaných segmentoch. Podobný prístup k odplyňovaniu môže pomôcť stabilizovať magmatické systémy v celosvetovom meradle.

Realizácia plánovaného kontrolovaného odplynenia tak v každom prípade zostáva jedinou šancou na záchranu Ruska aj celého ľudstva, čo je neporovnateľne výhodnejšie a rozumnejšie ako nečinnosť. Tento scenár umožní vyhnúť sa globálnej katastrofe a poskytnie ľudstvu čas na vývoj ďalších riešení.

Napriek značným perspektívam sa však úspešná realizácia dokonca aj optimistického

scenáru stane výzvou pôsobivých rozmerov. Je potrebné konať hneď, pretože oneskorenie zvyšuje pravdepodobnosť katastrofických udalostí. Prekvapivo však realizácia takéhoto projektu môže naraziť na námietky v rámci Ruska vzhľadom na potenciálne riziká zničenia infraštruktúry a oslabenie kontroly nad strategickými zdrojmi.



■ Závery

Sibírsky chochol predstavuje globálnu geodynamickú hrozbu, ktorá je rozsahom porovnateľná s tisíckou katastrofických erupcií najväčších supervulkánov. V prípade nekontrolovanej erupcie môžu vzniknúť celoplanetárne následky, vrátane nástupu ľadovej doby, zničenia ekosystémov, zničenia infraštruktúry a záhuby ľudstva. Tieto riziká diktujú potrebu prijať preventívne opatrenia v podobe plánovaného odplynenia magmatického systému sibírskeho chochola.

Nečinnosť vytvára hrozbu spontánnych, nekontrolovaných erupcií, ktorých následky budú katastrofálne nielen pre Rusko, ale aj pre celú planétu. Kontrolované odtlakovanie magmatických komôr pomôže vyhnúť sa najhorším scenárom a poskytne ľudstvu životne dôležitý čas na vývoj dlhodobých riešení.

Okrem toho integrácia technológie generátorov atmosférickej vody do každodenného používania spolu s odpynením sibírskeho chochola vytvorí nové príležitosti na obnovenie ekologickej rovnováhy. To pomôže vyčistiť oceán od plastov, posilniť kolobeh vody a obnoviť tepelnú rovnováhu planéty. Komplexné

zavedenie takýchto riešení môže stabilizovať klimatickú situáciu a zabezpečiť budúcnosť pre celé ľudstvo uvoľnením času na hľadanie riešenia problému vonkajšieho kozmického pôsobenia, zapríčiňujúceho katastrofické udalosti počas 12 000-ročného cyklu.

Tieto úlohy si vyžadujú naliehavú medzinárodnú spoluprácu medzi vedcami z rôznych disciplín, vrátane kvantových fyzikov, s cieľom vyvinúť a realizovať komplexné riešenia. Takejto spolupráci však bránia geopolitické a vojenské konflikty. Potrebné je globálne moratórium na vojny a presmerovanie vojenských zdrojov na zmierňovanie katastrof a humanitárne úsilie. Ľudstvu na prijatie potrebných opatrení zostáva len 4-6 rokov relatívne stabilného času.

Ak budú vytvorené podmienky pre otvorenú spoluprácu, vedci nezačnú od nuly, pretože v tomto smere už existujú reálne výsledky a pochopenie kauzálnych súvislostí. Neschopnosť ľudstva uprednostniť globálnu jednotu a vedeckú spoluprácu bude mať pre život na Zemi nezvratné dôsledky.

■ Príloha 1

Metodika analýzy seizmickej aktivity zahŕňala sťahovanie a špeciálne spracovanie údajov získaných z webovej stránky International Seismological Centre (ISC). Keďže údaje obsahujú rôzne zdroje z rôznych krajín a výskumných ústavov, ako aj rôzne typy magnitúdy (Mw, Ms, Mb, ML, MD atď.), vykonal sa určitý algoritmus spracovania údajov na výber vhodného typu magnitúdy z rôznych zdrojov. Použili sme dva rôzne prístupy:

1. V texte nazývaný ako **špeciálny algoritmus stredných hodnôt magnitúdy**. Metóda zahŕňa výber preferovaného odhadu magnitúdy a zahrnutie udalosti do vzorky, ak je preferovaný odhad v rámci požadovaného rozsahu magnitúdy. Vyberáme preferovaný odhad magnitúdy vyhľadávaním medzi odhadmi pre nasledujúce typy magnitúdy (v poradí preferencie): Mw, ML, MS, Mb, MD, MV. Ak pre preferovaný typ existuje vzorka magnitúd pre jednu udalosť, potom sa na výpočet mediánu použijú všetky odhady magnitúdy vybratého typu pre danú udalosť. Potom sa pre ne nájde medián.

Ak pre danú udalosť neexistuje odhad žiadneho z vyššie uvedených preferovaných typov (čo je zriedkavé, iba niekoľko percent udalostí v celej databáze), vyberie sa akýkoľvek odhad magnitúdy s hodnotou, ktorá sa zhoduje s mediánom vypočítaným zo všetkých typov magnitúdy pre danú udalosť.

2. V texte nazývaný ako **algoritmus maximálnych hodnôt magnitúdy**. Vyberie sa odhad magnitúdy s najvyššou hodnotou spomedzi všetkých odhadov hodnoty pre danú udalosť.

Prvý algoritmus vo všeobecnosti vedie k miernemu zníženiu hodnoty magnitúdy v porovnaní s najvyššou udávanou hodnotou, ale skúsenosti ukázali, že mediánový algoritmus vykazuje zodpovedajúce správanie podľa Gutenberg-Richterovho zákona a iných zákonitostí a celkom dobre súhlasí s údajmi z iných seizmologických databáz, ako sú United States Geological Survey (USGS) a Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS).

Druhý algoritmus umožňuje odhadnúť počet zemetrasení zaregistrovaných ktorýmkoľvek z výskumných ústavov s hodnotou vyššou ako zvolená. Táto analýza nám umožňuje vidieť trend v počte zemetrasení vo vybranom rozsahu magnitúd.

Všetky grafy prezentované v časti „Rast seizmickej aktivity ako príznak destabilizácie tektonických platní v dôsledku aktivity sibírskeho magmatického chochola“ boli skonštruované pomocou prvého algoritmu, špeciálneho algoritmu stredných hodnôt magnitúdy (obr. 44 – 75).

Po výbere magnitúdy boli získané údaje filtrované podľa typov udalostí v databáze ISC, aby sa vylúčili udalosti spôsobené ľudskou činnosťou počas ťažobných prác: explózie, potenciálne výbuchy, zrútenia hornín atď. Vylúčené boli nasledujúce typy udalostí:

km = known mine explosion (známy banský výbuch)

sm = suspected mine explosion (predpokladaný banský výbuch)

kh = known chemical explosion (známy chemický výbuch, bežne sa nemonitoruje IMS)

sh = suspected chemical explosion (predpokladaný chemický výbuch, bežne sa nemonitoruje IMS)

kx = known experimental explosion (známy experimentálny výbuch)

sx = suspected experimental explosion (predpokladaný experimentálny výbuch)

kn = known nuclear explosion (známy jadrový výbuch)

sn = suspected nuclear explosion (predpokladaný jadrový výbuch)

Keďže na území Ruska je veľa ťažobných podnikov, databáza ISC bola porovnaná s údajmi Jednotnej geofyzikálnej služby Ruskej akadémie vied k januáru 2025, kde sú uvedené všetky známe výbuchy a zrútenia hornín v Rusku. Tieto udalosti boli tiež vylúčené, aby sa zabezpečilo, že vo výsledných údajoch nezostanú žiadne udalosti zodpovedajúce výbuchom.

Zoznam použitej literatúry

- Arushanov, M. L. (2023). Climate dynamics: Space factors. LAMBERT Academic Publishing.
- Arushanov, M. L. (2023). Causes of Earth's climate change as a result of cosmic impact, dispelling the myth of anthropogenic global warming. *Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft*, 53, 4-14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979>
- Barkin, Y.V. and Lyubushin, A.A. (2007) 'Movement of the Earth's geocenter and its geodynamic content', in Sagitov Readings 2007, Moscow State University, Moscow, 31 January-1 February [Online]. Available at: http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/life/chteniya/sagi2007/SAGITOV_BARKIN_2007.pdf
- Barkin, Yu. V. (2009). Cyclic inversion changes of climate in the Northern and Southern hemispheres of the Earth. In *Geology of Seas and Oceans: Proceedings of the XVIII International Scientific Conference on Marine Geology* (Vol. 3, pp. 4-8). GEOS.
- Barkin, Yu. V. (2011). Synchronous jumps in activity of natural planetary processes in 1997-1998 and their unified mechanism. In *Geology of Seas and Oceans: Proceedings of the XIX International Scientific Conference on Marine Geology* (Vol. 5, pp. 28-32). GEOS.
- Barkin, Yu. V., & Smolkov, G. Ya. (2013). Abrupt changes in trends of geodynamic and geophysical phenomena in 1997-1998. In *Proceedings of the All-Russian Conference on Solar-Terrestrial Physics* (pp. 16-21). Irkutsk.
- Barkin, Yu. V. (2014, September 16). *Geofizicheskie sledstviya otnositel'nykh smeshcheniy i kolebaniy yadra i mantii Zemli* [Geophysical consequences of relative displacements and oscillations of the Earth's core and mantle]. Institute of Physics of the Earth, Moscow.
- Beerling, D.J., Harfoot, M., Lomax, B. & Pyle, J.A., 2007. The stability of the stratospheric ozone layer during the end-Permian eruption of the Siberian Traps. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365, pp.1843–1866. Available at: <http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2046>
- Black, B.A., Elkins-Tanton, L.T., Rowe, M.C., Ukstins Peate, I., 2012. Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps. *Earth and Planetary Science Letters*, 317–318, pp.363–373. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001>
- Black, B., Mittal, T., Lingo, F., Walowski, K., & Hernandez, A. (2021). Assessing the Environmental Consequences of the Generation and Alteration of Mafic Volcaniclastic Deposits During Large Igneous Province Emplacement. In R. E. Ernst, A. J. Dickson, & A. Bekker (Eds.), *Geophysical Monograph Series* (pp. 117-131). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch5>
- Bogoyavlensky, V.I., Nikonov, R.A. & Bogoyavlensky, I.V., 2023. New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: thermokarst lakes with gas blowout craters and mud volcanoes. *AEE*, 13, pp.353–368. Available at: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>
- Bogoyavlensky, V.I., 2023. New data on mud volcanism in the Arctic on the Yamal Peninsula. *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk. Nauki o Zemle*, 512, pp.92–99. Available at: <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>
- Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., ... & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3(5). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Bryson, R. A. (1989). Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115-125. <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

- Campbell I.H, Czamanske G.K, Fedorenko V.A, Hill R.I& Stepanov V. 1992 Synchronism of the Siberian Traps and the Permian–Triassic boundary. *Science*. 258, 1760–1763.doi:10.1126/science.258.5089.1760.
- Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). The Ethics of Volcano Geoengineering. *Earth's Future*, 11(10), e2023EF003714. <https://doi.org/10.1029/2023EF003714>
- Castro, J., & Dingwell, D. (2009). Rapid ascent of rhyolitic magma at Chaitén volcano, Chile. *Nature*, 461, 780-783. <https://doi.org/10.1038/nature08458>
- Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>
- Ciavarella, A., Cotterill, D., Stott, P., et al. (2021). Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. *Climatic Change*, 166, 9. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>
- Nikiforova, M. P., Vargin, P. N., Zvyagintsev, A. M., Ivanova, N. S., Kuznetsova, I. N., & Luk'yanov, A. N. (2016). Ozone mini-hole over the Northern Urals and Siberia. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*, 360, 168–180. In *Proc. of the Hydrometeorological Conf.*, February 9–10, Vol. 4, 91–96. Voronezh: Nauchno-Issledovatelskie Publikatsii.
- Cox, C., & Chao, B. F. (2002). Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998. *Science*, 297(5582), 831–833. <https://doi.org/10.1126/science.1072188>
- Davydova, V.O., Shcherbakov, V.D., Plechov, P.Yu., Koulakov, I.Yu., 2022. Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezymianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 421, 107422. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107422>
- D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports*, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>
- Dannberg, J., & Sobolev, S. (2015). Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept. *Nature Communications*, 6, 6960. <https://doi.org/10.1038/ncomms7960>
- Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48(7). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>
- Dobretsov, N.L., Kirdyashkin, A.G. & Kirdyashkin, A.A., 2001. *Deep Geodynamics*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, GEO Branch, 408 p.
- Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism. *Earth-Science Reviews*, 247, 104595. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>
- Dyachenko, A. I. (2003). Earth's magnetic poles. MCCME.
- Elkins-Tanton, L. T., Grasby, S. E., Black, B. A., Veselovskiy, R. V., Ardakani, O. H., & Goodarzi, F. (2020). Field evidence for coal combustion links the 252 Ma Siberian Traps with global carbon disruption. *Geology*, 48(10), 986-991. <https://doi.org/10.1130/G47365.1>
- Ernst, R. E., & Buchan, K. L. (2002). Maximum size and distribution in time and space of mantle plumes: evidence from large igneous provinces. *Journal of Geodynamics*, 34, 309-342.
- Federal Research Center, Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, n.d. Available at: <http://www.ceme.gsr.ru/zr/contents.html>

- Fedorenko, V. A., Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., Czamanske, G. K., Hawkesworth, C. J., Wooden, J. L., & Ebel, D. S. (1996). Petrogenesis of the Flood-Basalt Sequence at Noril'sk, North Central Siberia. *International Geology Review*, 38(2), 99-135. <https://doi.org/10.1080/00206819709465327>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Halldórsson, S. A., Marshall, E. W., Caracciolo, A., et al. (2022). Rapid shifting of a deep magmatic source at Fagradalsfjall volcano, Iceland. *Nature*, 609, 529-534. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04981-x>
- Hantemirov, R. M., Corona, C., Guillet, S., et al. (2022). Current Siberian heating is unprecedented during the past seven millennia. *Nature Communications*, 13, 4968. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x>
- Holzworth, R.H., Brundell, J.B., McCarthy, M.P., Jacobson, A.R., Rodger, C.J. & Anderson, T.S., 2021. Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091366. Available at: <https://doi.org/10.1029/2020GL091366>
- International Committee GCGE GEOCHANGE. (2010). Global environmental changes: Threat to civilization development (Vol. 1). London: GCGE. ISSN 2218-5798
- Ivanov, A.V., He, H., Yan, L., Ryabov, V.V., Shevko, A.Y., Paleskii, S.V., Nikolaeva, I.V., 2013. Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism. *Earth-Science Reviews*, 122, pp.58–76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>
- Khain V.E Geology of the USSR, Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde. 1985 Berlin-Stuttgart, Germany:Gebrüder Bornträger.
- Kirdyashkin, A.A. & Kirdyashkin, A.G., 2013. Interaction of a Thermochemical Plume with Mantle Free-Convective Flows and Its Influence on Mantle Melting and Recrystallization. *Geology and Geophysics*, 54(5), pp.707–721
- Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3(5). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Konstantinov, K. M., Bazhenov, M. L., Fetisova, A. M., & Khutorskoy, M. D. (2014). Paleomagnetism of trap intrusions, East Siberia: Implications to flood basalt emplacement and the Permo–Triassic crisis of biosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 242-253. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029>
- Koptev, A., & Cloetingh, S. (2024). Role of Large Igneous Provinces in continental break-up varying from “Shirker” to “Producer.” *Communications Earth & Environment*, 5, 27. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01191-9>
- Koulakov, I. Y. (2008). Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia from regional seismic tomography. *Russian Geology and Geophysics*, 49(3), 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012>
- Larson, R.L. & Olson, P., 1991. Mantle plumes control magnetic reversal frequency. *Earth and Planetary Science Letters*, 107(3–4), pp.437–447. Available at: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90091-U](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90091-U)
- Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). Remnant of the late Permian superplume that generated the Siberian Traps inferred from geomagnetic data. *Nature Communications*, 14, 1311. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37053-3>
- Livermore, P. W., Hollerbach, R., & Finlay, C. C. (2017). An accelerating high-latitude jet in Earth's core. *Nature Geoscience*, 10, 62–68. <https://doi.org/10.1038/ngeo2859>
- Lvova, E. V. (2010). Tectonics of mantle plumes: Evolution of basic concepts. *Moscow University Geology Bulletin*, 5, 21-29.

- Mazaud, A. & Laj, C., 1991. The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test. *Earth and Planetary Science Letters*, 107(3–4), pp.689–696. Available at: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90111-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T)
- Mikhailova, R. S. (2014). Strong earthquakes in the mantle and their influence in the near and far zone. *Geophysical Survey RAS*. <http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mihaylova.pdf>
- Mikhailova, R. S., Ulubieva, T. R., & Petrova, N. V. (2021). The Hindu Kush earthquake of October 26, 2015 with $M_w=7.5$, $I_0 \sim 7$: Previous seismicity and aftershock sequence. *Earthquakes in Northern Eurasia*, 24(2015), 324-339. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.31>
- Nikiforova, M.P., 2017. Extremely low total ozone values over the northern Ural and Siberia in the end of January 2016. AOO. Available at: doi:10.15372/AOO20170102
- Ostle, C., Thompson, R. C., Broughton, D., Gregory, L., Wootton, M., & Johns, D. G. (2019). The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nature Communications*, 10(1622). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>
- Popykina, A., Ilin, N., Shatalina, M., Price, C., Sarafanov, F., Terentev, A., & Kurkin, A. (2024). Thunderstorms near the North Pole. *Atmosphere*, 15(3), 310. <https://doi.org/10.3390/atmos15030310>
- Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
- Roger L. Larson, Peter Olson, Mantle plumes control magnetic reversal frequency, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 107, Issues 3–4, 1991, Pages 437-447, ISSN 0012-821X, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90091-U](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90091-U)
- Romagnoli, C., Zerbini, S., Lago, L., Richter, B., Simon, D., Domenichini, F., Elmi, C., & Ghirotti, M. (2003). Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations. *Journal of Geodynamics*, 35(4-5), 521-539. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00012-7)
- Roshydromet. (2022). Report on climate features in the Russian Federation for 2021. Moscow: Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.
- Roshydromet. (2024). Report on climate features in the Russian Federation for 2023. Moscow: Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.
- Samenow, J. (2019, August 12). Lightning struck near the North Pole 48 times on Saturday, as rapid Arctic warming continues. *The Washington Post*. <https://www.washingtonpost.com/weather/2019/08/12/lightning-struck-within-miles-north-pole-saturday-rapid-arctic-warming-continues/>
- Sawyer, D. E., Urgeles, R., & Lo Iacono, C. (2023). 50,000 yr of recurrent volcanoclastic megabed deposition in the Marsili Basin, Tyrrhenian Sea. *Geology*, 51(11), 1001-1006. <https://doi.org/10.1130/G51198.1>
- Sherstyukov, B. G. (2023). Global warming and its possible causes. *Journal of Hydrometeorology and Ecology*, 70, 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>
- Smirnov, S. Z., et al. (2021). High explosivity of the June 21, 2019 eruption of Raikoke volcano (Central Kuril Islands): Mineralogical and petrological constraints on the pyroclastic materials. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 418, 107346. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107346>
- Smolkov, G. Ya. (2018). Exposure of the solar system and the earth to external influences. *Physics & Astronomy International Journal*, 2(4), 310-321. <https://doi.org/10.15406/paij.2018.02.00104>
- Smolkov, G. Y. (2020). Heliogeophysical research. *Heliogeophysical Research*, 25, 14-29. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569>

Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutsкая, N. A., Petrunin, A. G., Arndt, N. T., Radko, V. A., & Vasiliev, Y. R. (2011). Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. *Nature*, 477, 312-316.

Sobolev, S.V., Sobolev, A.V., Kuzmin, D.V., Krivolutsкая, N.A., Petrunin, A.G., Arndt, N.T., Radko, V.A. & Vasiliev, Y.R., 2011. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. *Nature*, 477, pp.312–316. Available at: DOI: 10.1038/nature10385

Swallow, E. J., Wilson, C. J. N., Charlier, B. L. A., & Gamble, J. A. (2019). The Huckleberry Ridge Tuff, Yellowstone: evacuation of multiple magmatic systems in a complex episodic eruption. *Journal of Petrology*, 60, 1371-1426. <https://doi.org/10.1093/petrology/egz034>

Syvorotkin, V.L., 2018. Deep degassing in polar regions of the planet and climate change. APOG. Available at: doi:10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art48

TASS. (2024, January). Russia's territory is warming 2.5 times faster than the rest of the planet. TASS News Agency. <https://tass.ru/obschestvo/16009287>

USDP project. (n.d.). In Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. Retrieved December 31, 2024, from <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20>

Viterito, A. (2022). 1995: An important inflection point in recent geophysical history. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Volcanic fluid research center. (n.d.). Understanding of the conduit system at Unzen Volcano. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. Retrieved December 31, 2024, from <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/vrc/usdp/conduit.html>

Watts, J.D., Potter, S., Rogers, B.M., Virkkala, A.-M., Fiske, G., Arndt, K.A., et al., 2025. Regional hotspots of change in northern high latitudes informed by observations from space. *Geophysical Research Letters*, 52, e2023GL108081. Available at: <https://doi.org/10.1029/2023GL108081>

Why the Tongan eruption will go down in the history of volcanology. (2022). *Nature*, 602, 376-378. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00394-y>

Witze, A. (2017). Earth's lost history of planet-altering eruptions revealed. *Nature*, 543, 295-296. <https://doi.org/10.1038/543295a>

Xia, Y. et al., 2021. Significant contribution of severe ozone loss to the Siberian-Arctic surface warming in spring 2020. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL092509. Available at: <https://doi.org/10.1029/2021GL092509>

Zonenshain, L.P. & Kuzmin, M.I., 1993. Deep Geodynamics of the Earth. *Geology and Geophysics*, 34(4), pp.3–13.

Zonenshain, L.P., Kuzmin, M.I. *Deep Geodynamics of the Earth* // *Geology and Geophysics*, 1993, Vol. 34 (4), pp. 3–13.

Zotov, L. V., Barkin, Yu. V., & Lyubushin, A. A. (2009). Geocenter motion and its geodynamics. In *Proceedings of the Conference "Space Geodynamics and Modeling of Global Geodynamic Processes"* (pp. 98-101). Siberian Branch of RAS.