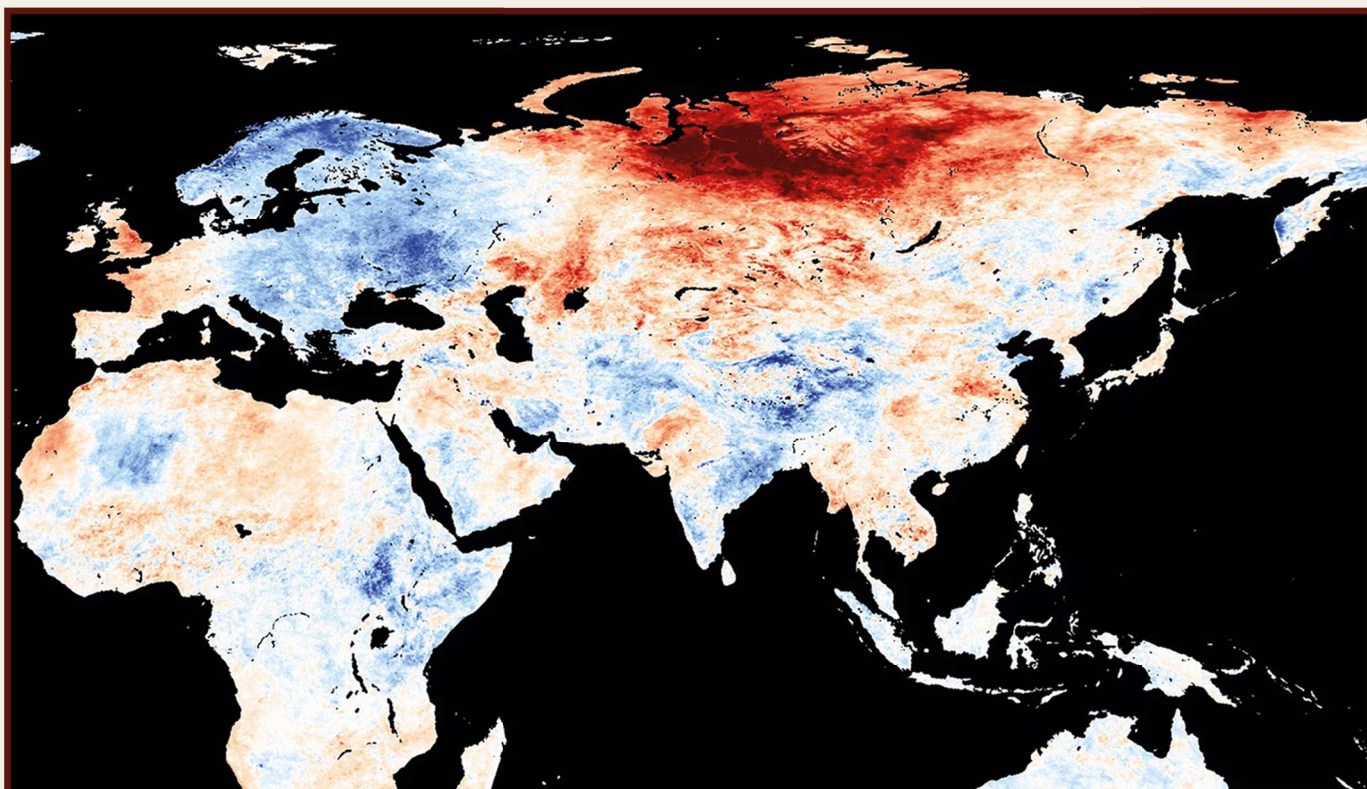


O PRIJETNJI

ERUPCIJE SIBIRSKE MAGMATSKE PERJANICE

I STRATEGIJE ZA RJEŠAVANJE TOG PROBLEMA



O PRIJETNJI

**ERUPCIJE SIBIRSKE MAGMATSKE PERJANICE
I STRATEGIJE ZA RJEŠAVANJE TOG PROBLEMA**

SADRŽAJ

Kratak opis geodinamičkog modela klimatskih promjena na Zemlji u sadašnjem razdoblju	4
Pomak jezgre prema Sibiru 1998.	16
Sibir i sibirski Arktik zagrijavaju se 3-4 puta brže od ostatka svijeta	21
Neizravni znakovi uspona sibirске perjanice	25
Topljenje permafrosta	27
Manifestacije blatnog vulkanizma	29
Zagrijavanje tla	31
Temperatura zraka blizu površine	32
Povećanje količine munja	34
Oštećenje ozonskog omotača	36
Struktura, moguće dimenzije i lokalizacija magmatske perjanice, na temelju objavljenih i promatranih podataka	38
Lokalizacija magmatske perjanice.....	44
Povećana seizmička aktivnost kao pokazatelj destabilizacije tektonskih ploča.....	48
Dokazi o neizbježnosti erupcije sibirске perjanice	72
Scenarij 1: Trenutna jednokratna erupcija sibirске perjanice	73
Aktivacija supervulkana i vulkanskih sustava	80
Kisele kiše	82
Vulkanska zima.....	83
Scenarij 2: Postupna erupcija sibirске perjanice	85
Posljedice postupnog proboja sibirске perjanice za Rusiju	90
Globalne posljedice postupnog proboja sibirске perjanice	91
Dugoročne posljedice postupnog proboja sibirске perjanice za planet.....	92
Scenarij 3: Planirano i kontrolirano otplinjavanje	93
Postojeće metode vulkanskog geoinženjeringa	93
Primjer programa za planirano otplinjavanje sibirске perjanice	100
Obrazloženje odabira lokacija za istraživačke bušotine za praćenje dinamike suvremene sibirске perjanice	102
Karakteristike bušenja i začepljenja magmatskih kanala tijekom planiranog otplinjavanja	105
Odabir optimalnog vremena za bušenje bušotina tijekom planiranog otplinjavanja	106
Predviđeni rezultati planiranog otplinjavanja sibirске perjanice	106
Zaključci	109
Dodatak 1	110
Reference	112

Kratak opis geodinamičkog modela klimatskih promjena na Zemlji u sadašnjem razdoblju

Tijekom proteklih 30 godina Zemlja je doživjela neviđen i istovremen porast klimatskih promjena, anomalija i ekstremnih događaja u svim slojevima planeta i njegovim geofizičkim parametrima. Progresija ovih promjena eksponencijalno se ubrzava. Sveobuhvatna analiza znanstvenih podataka pokazuje da su primarni pokretači anomalija uočenih u svim Zemljinim sferama astronomski ciklusi koji utječu na cijeli Sunčev sustav svakih 12.000 godina.

Ovu hipotezu o vanjskom astronomskom utjecaju podupire opažanje sličnih klimatskih, geodinamičkih i magnetskih anomalija koje se istovremeno pojavljuju na drugim planetima u Sunčevom sustavu i njihovim mjesecima. Na primjer, povećane brzine vjetra i širenje veličina uragana zabilježeni su na Uranu, Jupiteru i Veneri. U međuvremenu, Mars je pokazao topljenje polarnih ledenih kapa, uz sve veću

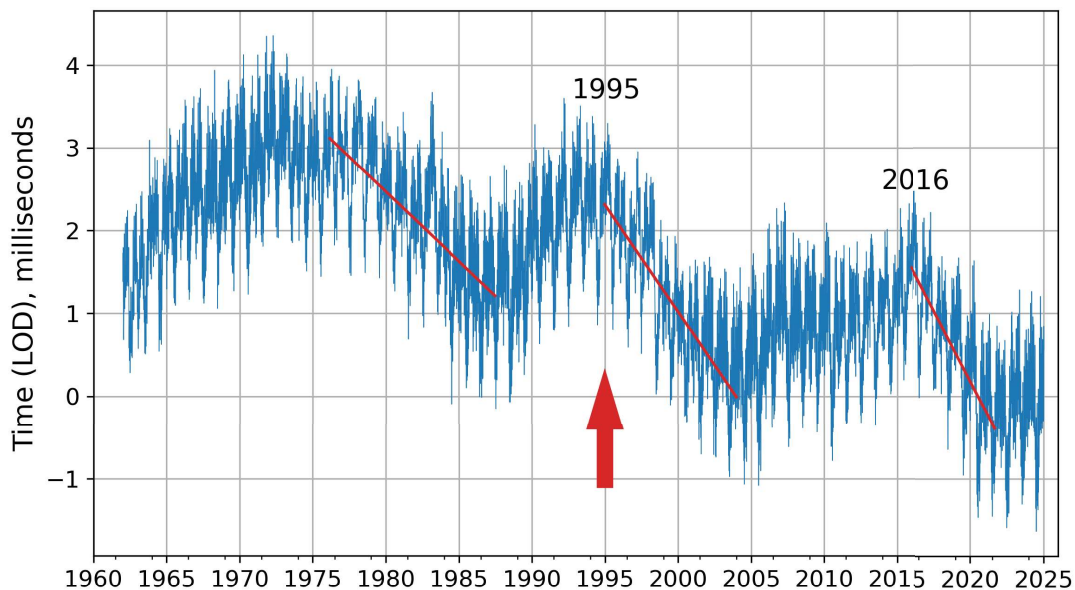
vulkansku aktivnost i na Veneri i na Marsu. Dodatno, pojačana je seizmička aktivnost na Marsu, što ukazuje na pojavu anomalnih geodinamičkih procesa.

Kritične promjene unutar Zemljinih sustava zbog kozmičkog ciklusa od 12 000 godina započele su u sadašnjem ciklusu 1995. godine. Značajne geofizičke anomalije zabilježene u to vrijeme uključivale su naglo ubrzanje Zemljine rotacije (Sl. 1.), pomak njezine osi¹ (Sl. 2.) i početak izraženog pomicanja Sjevernog magnetskog pola² (Sl. 3.). Ove pojave sugeriraju značajne promjene koje se događaju unutar Zemljine jezgre.

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.

Odstupanje u duljini dana



Slika 1.

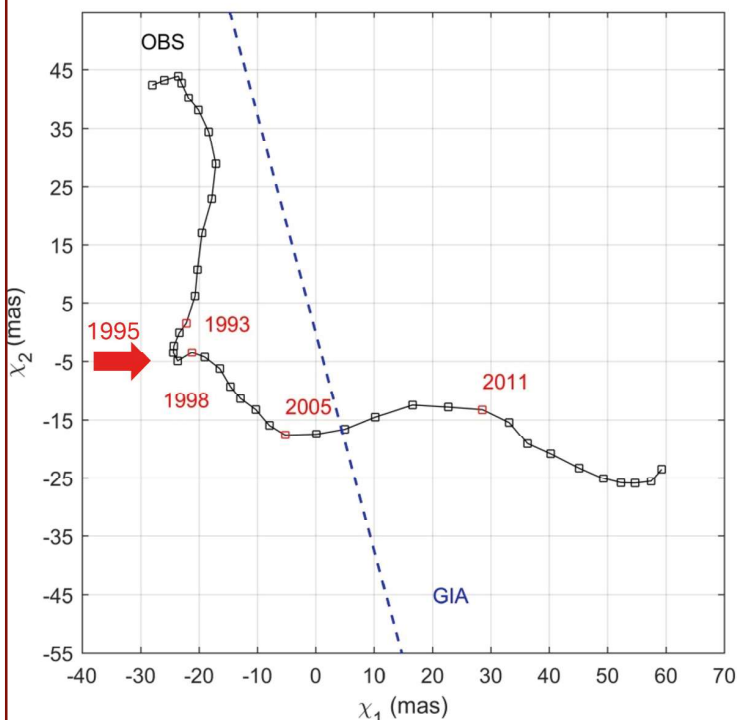
Odstupanje duljine dana u milisekundama od 1962. do 2023.

Izvor: IERS Earth Orientation Center Pariške zvezdarnice

Duljina dana – parametri orijentacije Zemlje:

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

Na slici crvene linije predstavljaju linije trenda koje ilustriraju brzinu kojom se duljina dana smanjuje. Na primjer, linija trenda lijevo je relativno blaga, dok je linija trenda desno, koja označava ubrzanje od 2016. godine, gotovo okomita. To ukazuje da se duljina dana znatno brže smanjuje, što znači da se rotacija planeta ubrzava.



Slika 2.

Dugoročna putanja promatrane ekscitacije nakon uklanjanja godišnjih i Chandlerovih ciklusa korištenjem metode pomičnog prosjeka.

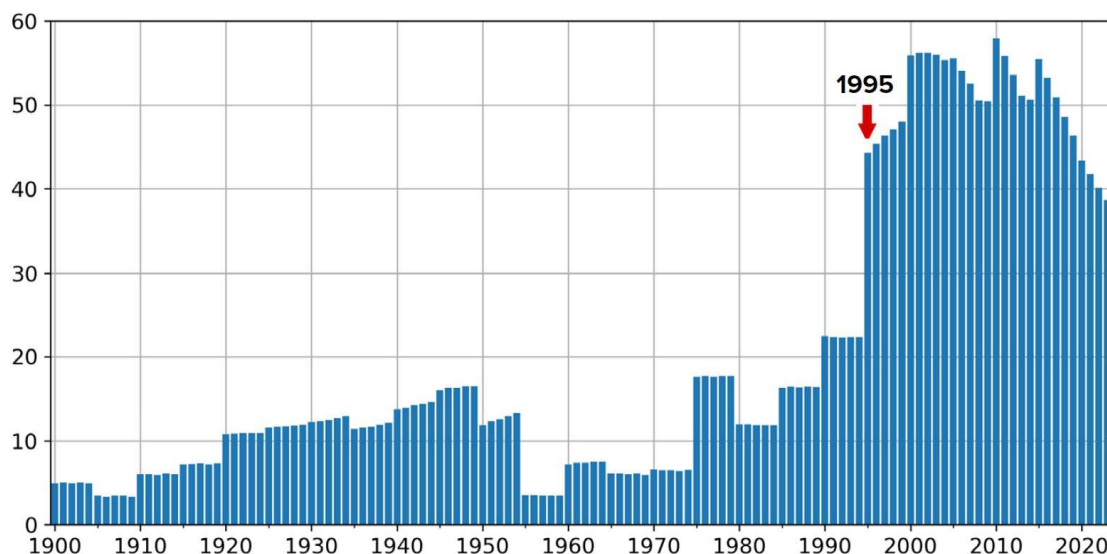
Crna crta s kvadratićima: promatrana putanja; plava isprekidana linija: smjer polarnog pomicanja uzrokovan glacijalnom izostatičkom prilagodbom (GIA).

Veličina podskupa pokretnog prosjeka postavljena je na 84 mjeseca, što je najmanji zajednički višekratnik od 12 mjeseci (godišnji ciklus) i 14 mjeseci (Chandlerov ciklus), prema studiji Liua i sur. (2017).

Izvor: 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>

Brzina sjevernog magnetskog pola (km/god.)



Slika 3.

Brzina kretanja sjevernog magnetskog polusa (km/god)

Izvor: podaci o položaju sjevernog magnetskog polusa NOAA

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

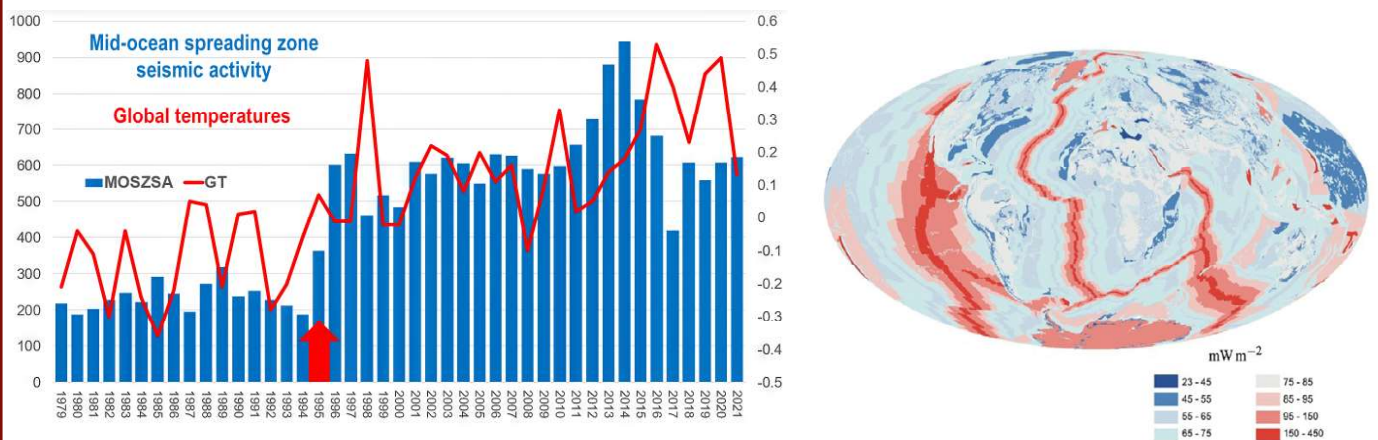
Prema hipotezi, u ovom je trenutku Sunčev sustav počeo ulaziti u područje u kojem su vanjske kozmičke sile počele vršiti značajan utjecaj na planetarne jezgre. Promjene uočene u Zemljinoj jezgri 1995. godine sugeriraju povećanje zagrijavanja vanjske jezgre, što znači da je dodatna energija počela dopirati do Zemljine jezgre. Takve duboke promjene u Zemljinoj jezgri zahtijevaju unos energije kvadrilijune puta veći od sve energije koju je ikada proizvela ljudska civilizacija tijekom svog postojanja.

Dotok vanjske energije u Zemljino jezgro pokrenuo je procese povezane s topljenjem plašta i izlaskom magme na površinu. To je zauzvrat pokrenulo lančanu reakciju seizmičke i vulkanske aktivnosti, povećanu toplinu koja izlazi iz Zemljine unutrašnjosti i porast katastrofa povezanih s klimom diljem svijeta.

Na primjer, od 1995. godine uočen je značajan porast seizmičke aktivnosti koju karakterizira veća učestalost, magnituda i energija potresa. Ovaj trend utječe i na kontinentalne regije i na dno oceana (Sl. 4.), uključujući područja koja su se prije smatrala seizmički neaktivnima, što ukazuje na globalnu prirodu ovih promjena.

Važno je napomenuti da se porast broja potresa magnitude 5,0 ili više ne može pripisati napretku u tehnologiji seizmičkog praćenja (Sl. 5.), već odražava stvarne promjene u geodinamičkom sustavu Zemlje. Kumulativni podaci Međunarodnog seizmološkog centra potvrđuju da se broj potresa znatno povećao u posljednjih 25 godina i nastavlja rasti (Sl. 6.).

Porast potresa na dnu oceana duž srednjooceanskih grebena

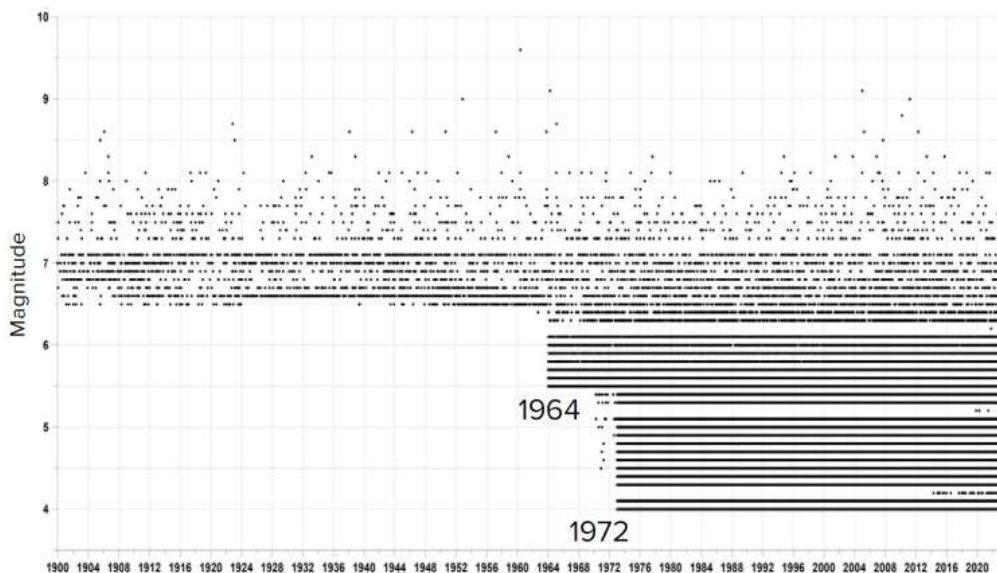


Slika 4.
Istovremeno povećanje potresa na dnu oceana i globalnih atmosferskih temperatura (lijevo)
Geotermalno zagrijavanje srednjooceanskih grebena (desno)

Izvor: 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>

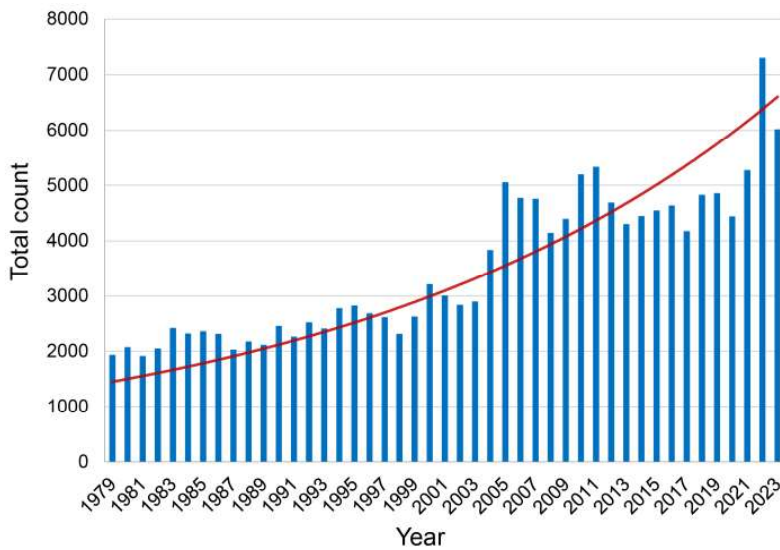
Dijagram ilustrira nagli porast broja potresa na dnu oceana duž srednjooceanskih grebena počevši od 1995. godine, uz jaku korelaciju između seizmičnosti oceanskog dna i atmosferskih temperatura. To ukazuje na dodatni duboki izvor topline koji utječe i na oceane i na atmosferu.



Slika 5.
Magnitude potresa zabilježene tijekom vremena

Crne točke predstavljaju potrese različitih magnituda tijekom različitih godina. Prije 1964. zabilježeni su samo potresi magnitude 6,5 i više. Počevši od 1964. godine, uvođenjem osjetljivijih senzora, dokumentirani su potresi od 5,5 i više. Od 1972. stalno se bilježe potresi od 4,0 i više, bez obzira na lokaciju.

Potresi M5+ 1979. - 2023. god., ISC



Slika 6.

Potresi M5+ od 1979. do 2023. godine

Izvor: ISC baza podataka.

Skup podataka je sastavljen korištenjem algoritma maksimalne magnitude, odabirom najveće vrijednosti magnitude zabilježene u ISC bazi podataka za svaki događaj (vidi Dodatak 1).

Štoviše, seizmička aktivnost u blizini vulkana je u porastu, uključujući supervulkane kao što su Yellowstone (SAD), Campi Flegrei (Italija), Taupo (Novi Zeland) i drugi koji su eruptili tijekom prethodnih ciklusa od 12 000 godina. Ukupan broj dana vulkanske erupcije također raste, popraćen anomalnim erupcijama. U tim slučajevima, izbačena lava je pregrijana i pokazuje atipičan sastav karakterističan za magmu iz dubljih slojeva plašta.^{3,4,5,6,7}

Posebnu pozornost privlači povećanje potresa dubokog žarišta koji se događaju na dubinama većim od 300 kilometara (186 milja), a ponekad dosežu i do 750 kilometara (466 milja) ispod

Zemljine površine. Ti događaji ne nastaju u Zemljinoj kori, već u plaštu, gdje se materijal obično glatko deformira, a ne lomi. To čini prirodu takvih potresa vrlo neobičnom.

S obzirom na ekstremne pritiske i temperature na tim dubinama, ove se pojave mogu shvatiti kao snažne eksplozije koje se po energiji mogu usporediti s istovremenom detonacijom više atomskih bombi unutar Zemljinog plašta. Osim toga, potresi dubokog fokusa često izazivaju značajne seizmičke događaje u Zemljinoj kori, pojačavajući njihov razorni učinak.^{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>

⁶Halldórssón, 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>

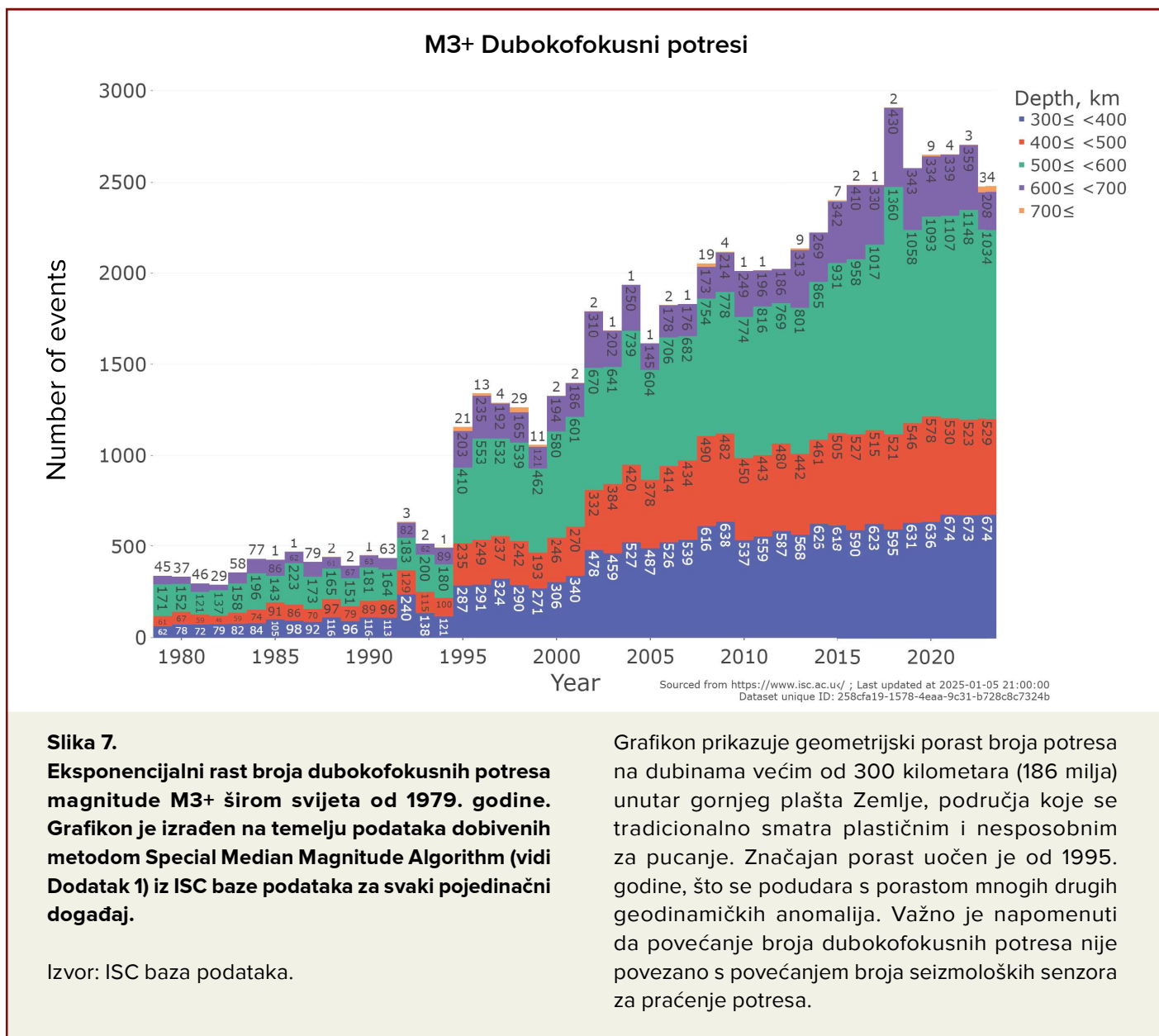
⁷D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports*, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>

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 1995. godine došlo je do brzog eksponencijalnog porasta broja takvih dubokih potresa (Sl. 7., 8.), koji koincidira s drugim geodinamičkim anomalijama koje su započele u istom razdoblju. Porast ovih eksplozija unutar

plašta ukazuje na povećanje energije unutar Zemljinih dubina i pojačano topljenje plašta, što bi moglo rezultirati velikim vulkanskim erupcijama.

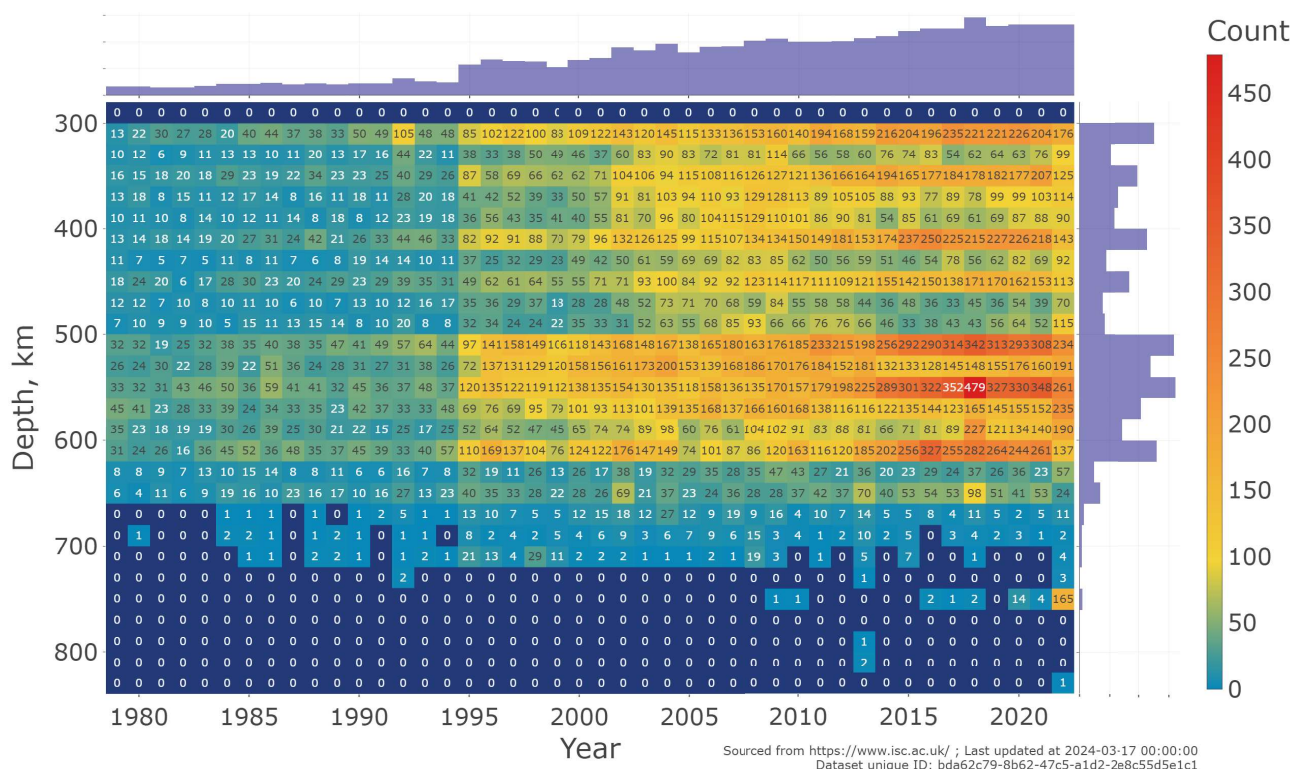


Slika 7.
Eksponencijalni rast broja dubokofokusnih potresa magnitude M3+ širom svijeta od 1979. godine. Grafikon je izrađen na temelju podataka dobivenih metodom Special Median Magnitude Algorithm (vidi Dodatak 1) iz ISC baze podataka za svaki pojedinačni događaj.

Izvor: ISC baza podataka.

Grafikon prikazuje geometrijski porast broja potresa na dubinama većim od 300 kilometara (186 milja) unutar gornjeg plašta Zemlje, područja koje se tradicionalno smatra plastičnim i nesposobnim za pucanje. Značajan porast uočen je od 1995. godine, što se podudara s porastom mnogih drugih geodinamičkih anomalija. Važno je napomenuti da povećanje broja dubokofokusnih potresa nije povezano s povećanjem broja seizmoloških senzora za praćenje potresa.

M3+ Dubokofokusni potresi

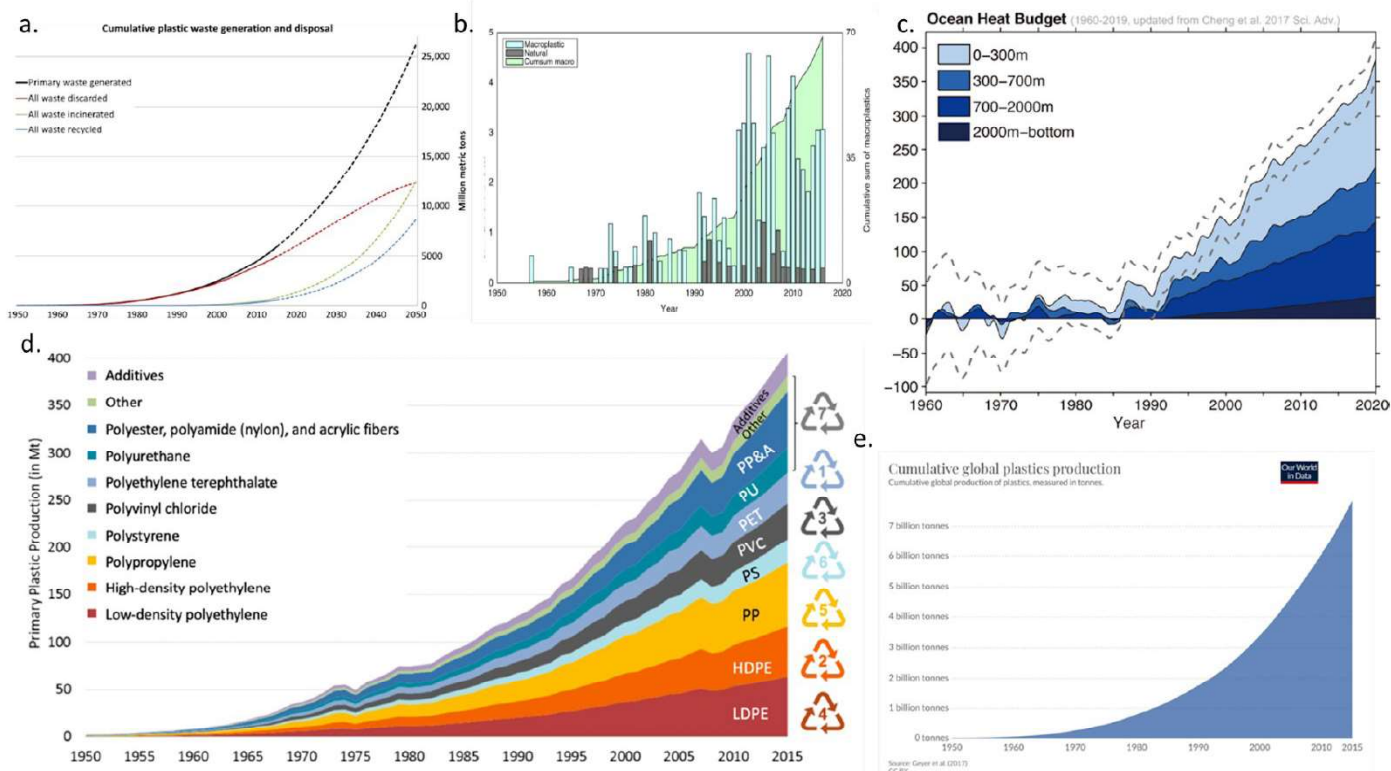


Slika 8.
Distribucija potresa dubokog žarišta M3+ po godini i dubini
Izvor: ISC baza podataka.

Porast potresa dubokog fokusa ukazuje na topljenje plašta koji se zagrijava iz jezgre. Zbog centrifugalnih sila rastaljena magma unutar plašta počinje se naglo dizati prema površini Zemlje. Ovo kretanje erodira i zagrijava litosferu iznutra povećanom brzinom. Uspinjanje magme izravno je odgovorno za povećanje geotermalnog toka iz unutrašnjosti planeta i aktivaciju magmatske perjanice ispod ledenjaka na zapadnom Antarktiku i središnjem Grenlandu. Ovaj proces značajno ubrzava topljenje ledenjaka i permafrosta odozdo prema gore.

Danas se ocean zagrijava kao nikada prije,

značajno intenzivirajući ekstremne prirodne događaje poput poplava, uragana i tropskih ciklona. Ocean igra ključnu ulogu u regulaciji topline planeta jer može apsorbirati i redistribuirati višak topline, sprječavajući katastrofalne posljedice. Međutim, sada kada se zagrijavanje Zemlje pojačava zbog geodinamičke aktivnosti uzrokovane astronomskim ciklusima, ocean je izgubio svoju funkciju uklanjanja topline iz dubina. To se dogodilo zbog onečišćenja oceana koje je uzrokovao čovjek. Plastični otpad se razgrađuje na mikroplastiku i nanoplastiku, smanjujući toplinsku vodljivost vode (Sl. 9.).



Slika 9.

Dijagrami promjena temperature oceana od 1960. do 2019. godine i njihova usporedba s dijagramima rasta proizvodnje sintetskih polimera, njihove uporabe u raznim sektorima gospodarstva te odlaganja plastičnog otpada u ocean (iz raznih izvora).

a. Kumulativno stvaranje i odlaganje plastičnog otpada

Izvor: 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. Ukupna količina mikroplastike u oceanu i godišnje

Izvor: 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. Proračun topline oceana od 1960. do 2019. god.

(Purkey i Johnson, 2010.; ažurirano iz Cheng i dr., 2017.)

Izvor: 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. Globalna primarna proizvodnja plastike prema vrsti polimera

Izvor: 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. Kumulativna globalna proizvodnja plastike od 1950. god.

Izvor podataka: Plastic Marine Pollution Global Dataset

Porast temperature vode ne događa se samo na površini, već u cijeloj dubini i na dnu oceana. Zagrijavanje oceana uzrokovano je uzdizanjem magme, koja posebno zagrijava oceansku koru, koja je tanja i ranjivija od kontinentalne kore.

Povijesni podaci iz geoloških i ledenih jezgri pokazuju da se Zemlja suočavala sa sličnim katastrofalnim ciklusima svakih 12 000 godina.¹⁰ Svakih 24 000 godina te su planetarne katastrofe bile znatno intenzivnije, što je dokazano studijama slojeva vulkanskog pepela u ledenim jezgrama¹¹ (Sl. 10.) i drugim geokronološkim istraživanjima. Zemlja sada ulazi u takav ciklus. Međutim, trenutni ciklus je pogoršan antropogenim čimbenicima, kao što je onečišćenje oceana, što je dodatno umanjilo sposobnost oceana da regulira energetske ravnoteže Zemlje.

Kako se oceani zagrijavaju, plastični otpad se razgrađuje na mikroplastiku i nanoplastiku, što dodatno smanjuje toplinsku vodljivost oceana. Ovaj gubitak toplinske vodljivosti je kritično važan tijekom razdoblja pojačane geodinamičke aktivnosti potaknute astronomskim ciklusima. Akumulacija viška energije unutar Zemljine

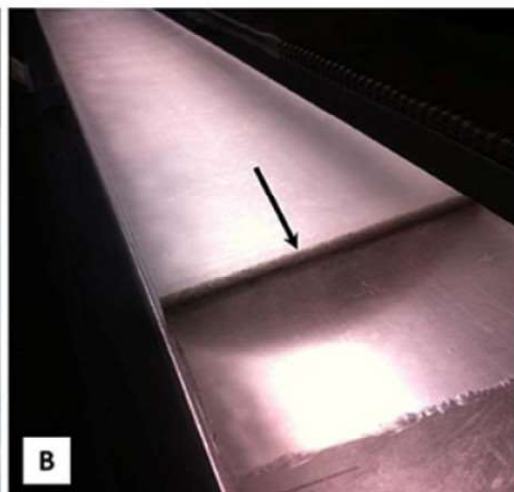
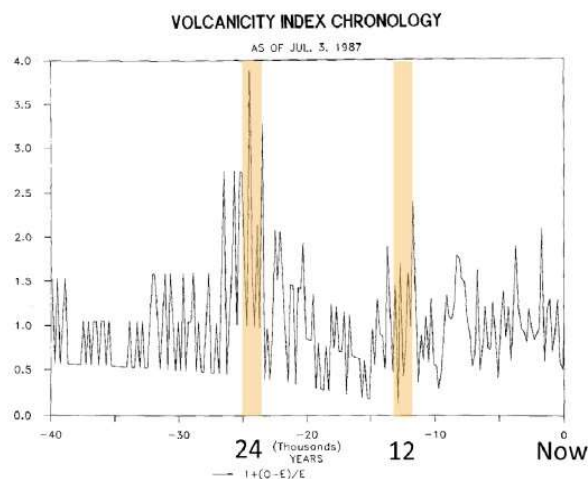
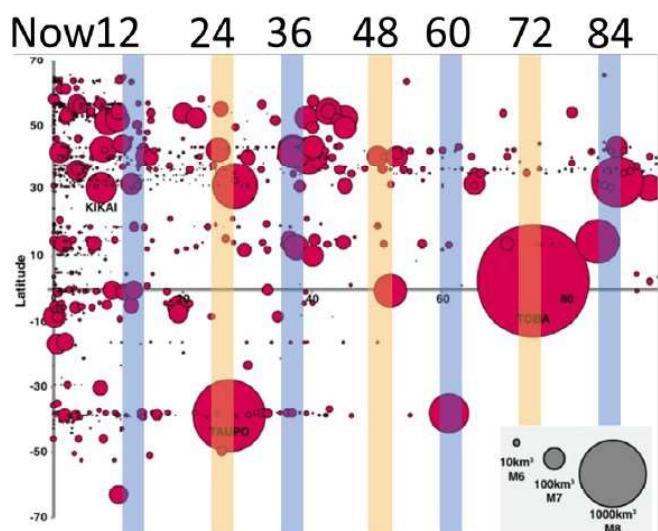
unutrašnjosti dovela je do povećanja broja potresa dubokog fokusa i brzog stvaranja novih komora magme, pojačavajući nestabilnost planeta. Ova povratna sprega ubrzava zagrijavanje i destabilizaciju Zemlje, gurajući planet bliže neizbježnom uništenju.

Matematičko modeliranje pokazuje da bi se svjetski ekonomski i društveni sustavi mogli urušiti u sljedećih 4-6 godina zbog sve veće štete od klimatskih katastrofa. Eksponencijalni porast katastrofalnih događaja prijete da će Zemlju učiniti nenastanjivom u sljedećem desetljeću (Sl. 11.). Za razliku od prethodnih ciklusa, trenutno stanje planeta pogoršano je onečišćenjem uzrokovanim ljudskim djelovanjem, ostavljajući malo nade za opstanak ekosustava ili same Zemlje. **Važno je razumjeti da rješavanje problema povezanih s oceanima može usporiti napredovanje kataklizmi, ali ih neće u potpunosti zaustaviti.**

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>

Katastrofalne vulkanske erupcije koje se događaju u ciklusu od 12 000 godina



Slika 10.
Istraživački podaci o slojevima vulkanskog pepela iz erupcija u posljednjih 100 000 godina u jezgrama leda s Antarktiku i Arktiku, sastavljen od djela raznih autora.

Izvor: Brown, S. K., Croswell, 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>

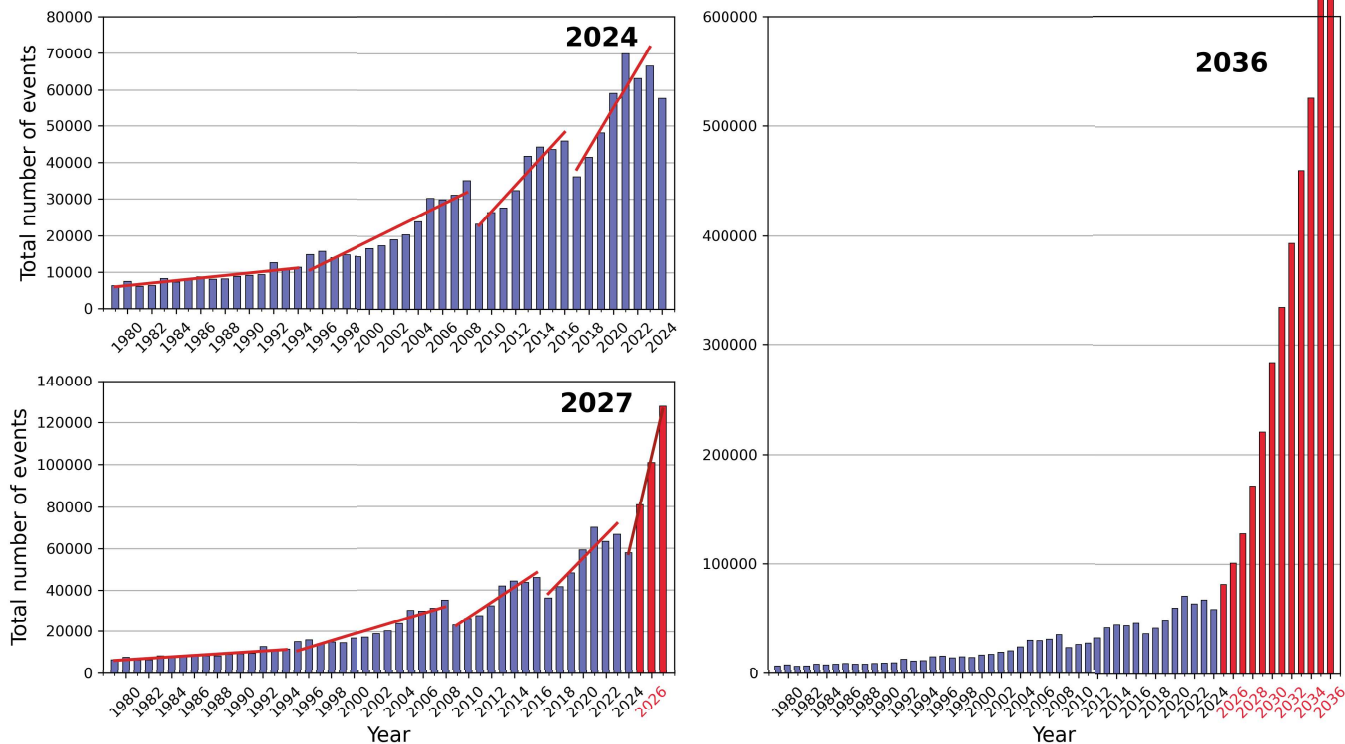
Bryson, R. A. (1989). Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125.
<https://doi.org/10.1007/bf00868307>

Grafikoni ilustriraju katastrofalnu vulkansku aktivnost koja se javlja svakih 12 000 godina, s još intenzivnijim događajima svakih 24 000 godina (uzimajući u obzir nesigurnost datiranja). Ove katastrofalne epizode dovele su do oštih temperaturnih fluktuacija, prirodnih katastrofa, vulkanskih zima i masovnog izumiranja vrsta. Mnogi supervulkani koji su erupirali tijekom prošlih ciklusa počeli su pokazivati nenormalnu aktivnost posljednjih godina, osobito od 1995. godine.

Progresija eskalirajućih katastrofa, ilustrirana potresima

M3+ potresi globalno 1979. - 2024. god.

volcanodiscovery.com



Slika 11.

Model eksponencijalnog rasta broja prirodnih kataklizmi na primjeru potresa do 2036. god.

Grafikoni pokazuju geometrijsku progresiju učestalosti i magnitude potresa diljem svijeta na temelju trenutnih trendova. U svakoj sljedećoj fazi broj potresa se utrostručuje. Predviđa se da će do 2028. godine Zemlja doživjeti 1000 potresa dnevno

s magnitudama iznad 3,0, u usporedbi sa trenutnim prosjekom od 125 takvih potresa dnevno.

Velika je vjerojatnost da će u roku od šest godina Zemlja doživjeti svakodnevne potrese razorne poput onog u Turskoj i Siriji 6. veljače 2023. godine.

Ovo izvješće bavi se dodatnom prijetnjom koju predstavljaju promjene u Zemljinoj jezgri koje su rezultat priljeva vanjske energije. U razdoblju 1997.–1998. godine znanstvenici su, koristeći satelitske podatke iz Zemljinog centra za masovna istraživanja, uočili pojavu bez presedana — nagli pomak unutarnje jezgre planeta. Kao rezultat toga, jezgra je migrirala prema sjeveru duž putanje od zapadne Antarktike do istočnog Sibira i poluotoka Taimyr u Ruskoj Federaciji. Ovaj pomak jezgre uzrokovao je nekontrolirano uzdizanje magme u tom smjeru, što je dovelo do brzog izdizanja ogromne magmatske perjanice ispod Sibira.

Trenutačno je sibirski perjanica već dosegla podnožje Zemljine kore u sjevernom području istočnosibirskog kratona i počela podizati ploču. To znači da je rastopljena magma počela sagorijevati svoj put do površine.

Nekontrolirano probijanje sibirske perjanice može rezultirati globalnim izumiranjem, ne ostavljajući čovječanstvu nikakve šanse za preživljavanje. Prema izračunima, takva bi erupcija bila 1000 puta jača od najznačajnije erupcije supervulkana Yellowstone. Slične erupcije magmatske perjanice u Sibiru dogodile su se prije 250 milijuna godina, uzrokujući veliko permsko izumiranje.

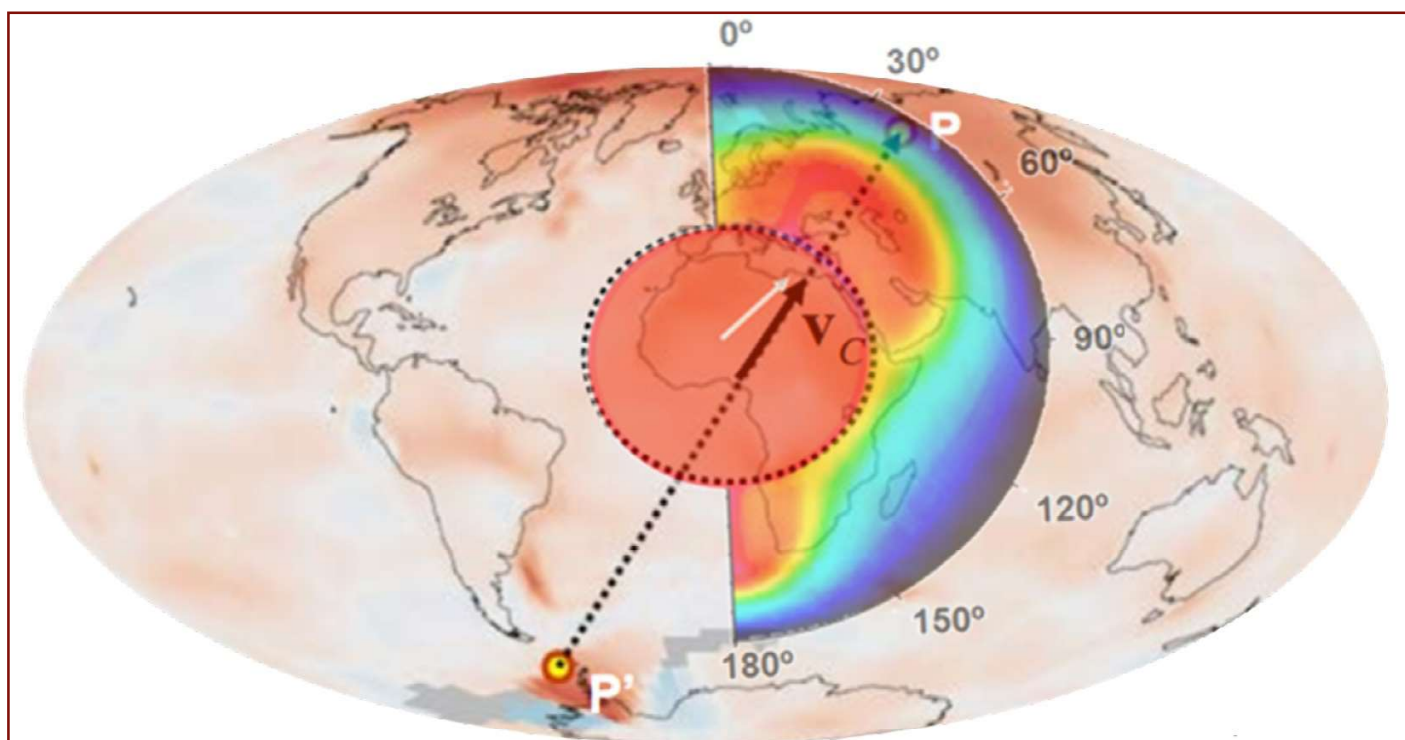
Ovo izvješće ocrtava tri potencijalna scenarija za razvoj ove situacije i predlaže korake za rješavanje rastuće sibirske perjanice i ublažavanje rizika od njezinog nekontroliranog proboja.



Temeljni pomak prema Sibiru 1998

Godine 1997.-1998., proučavajući središte mase Zemlje putem satelita, znanstvenici su zabilježili pojavu bez premca — pomicanje Zemljine unutarnje jezgre.^{12,13} Kao rezultat toga,

jezgra planeta pomaknula se prema sjeveru, duž linije od zapadne Antarktike do poluotoka Taimyr na sjeveru istočnog Sibira (Sl. 12.).



Slika 12.

Pomicanje jezgre 1997.-1998. godine i toplinski valovi u magmi uzrokovani pomakom jezgre. (Barkin, Yu. V.)

Karta prikazuje vektor pomaka unutarnje jezgre od zapadne Antarktike do istočnog Sibira, prema poluotoku Taimyr. Shema je prekrivena kartom atmosferskih toplinskih anomalija.

Izvor: Geophysical implications of relative displacements and oscillations of the Earth's core and mantle. Presentation by Yu.V. Barkin, Moscow, IFZ, OMTS. September 16, 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.

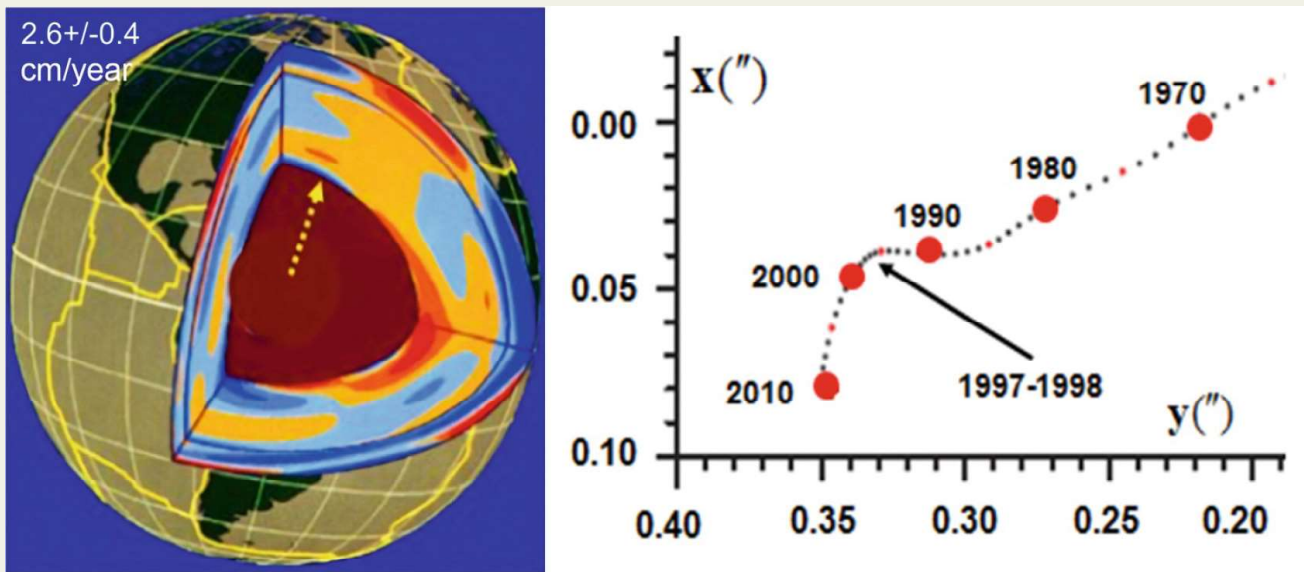
¹³ Smolkov, G. Ya. (2018). Exposure of the solar system and the earth to external influences. *Physics & Astronomy International Journal*, 2(4), 310-321. <https://doi.org/10.15406/paij.2018.02.00104>

Istovremeno s tim, četiri različita znanstvena tima, neovisno jedan od drugog, zabilježila su anomalne promjene u različitim geofizičkim parametrima Zemlje. Na temelju satelitskih podataka, tim autora sa Moskovskog državnog sveučilišta Lomonosov i Instituta za fiziku Zemlje Ruske akademije znanosti ustanovili su skok centra mase Zemlje 1998. godine.¹⁴ (Sl. 13).

Earth Rotation Service (IERS) zabilježio je naglo ubrzanje rotacije planeta. U isto vrijeme, na postaji Medicina u Italiji, znanstvenici su zabilježili iznenadni pomak u gravitaciji.¹⁵ Istodobno je primijećena oštra promjena oblika Zemlje¹⁶, registrirana pomoću sustava laserskog

daljinomjera američkih satelita.

Prema doktoru fizikalnih i matematičkih znanosti, profesoru Yuriju Barkinu, doktoru tehničkih znanosti, profesoru Gennadiju Smolkovu,¹⁷ doktoru geografskih znanosti, profesoru Mihailu Arušanovu,¹⁸ akademiku Ruske akademije znanosti i počasnom profesoru Moskovskog državnog sveučilišta Lomonosov, doktoru geoloških i mineraloških znanosti Victoru Khaina,¹⁹ i mnogim drugim istraživačima, pomicanje jezgre rezultiralo je promjenama u svim Zemljinim ljuskama.



Slika 13.

Unutarnja struktura Zemlje; smjer sekularnog kretanja Zemljino središte mase i putanja njegovog pola preko Zemljine površine od 1990. – 2010. god., sa rotacijom od skoro 90° u periodu 1997. – 1998. godine u pravcu poluotoka Taimyr.

Izvor: Smolkov, G.Ya. (2020). Heliogeophysical Research. Issue 25, 14–29. Retrieved from <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569>

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., & Ghirrotti, 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>

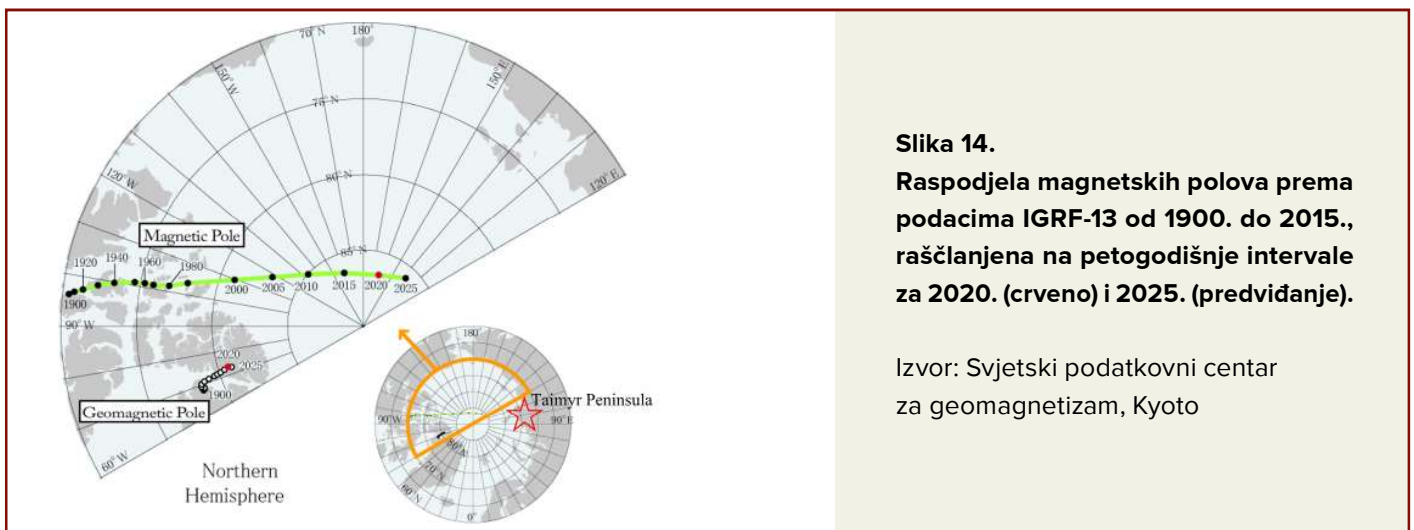
¹⁹ International Committee GCGE GEOCHANGE. (2010). *Global environmental changes: Threat to civilization development* (Vol. 1). London: GCGE. ISSN 2218-5798

Važno je napomenuti da je ovaj smjer usklađen s naglim pomicanjem Sjevernog magnetskog pola koje je počelo 1995. godine. Od početka prošlog stoljeća pol se kretao prosječnom brzinom od 10 km/godišnje (6,2 milje/godišnje), ali je onda iznenada povećao svoju brzinu na maksimalnih 57 km/godišnje (35,4 milja/godišnje) i promijenio svoju putanju, krenuvši prema Sibiru i poluotoku Taimyr²⁰ (Sl. 3., 14.).

Ovo ukazuje na to da su se uvjeti za pomicanje jezgre prema poluotoku Taimyr počeli formirati već 1995. godine, potaknuti ukapljivanjem Zemljine vanjske tekuće jezgre. Godine 2013. istraživači sa Sveučilišta u Leedsu ustanovili su da su ove promjene u magnetskom polju uzrokovane ubrzanim protokom tekućeg željeza u Zemljinoj vanjskoj jezgri²¹ (Sl. 15.), koji je vjerojatno započeo 1995. godine.

Prema objavljenim podacima, postoji

korelacija između učestalosti inverzija magnetskog polja i intenziteta magmatizma plašta.^{22,23,24} Istodobno je poznato da su inverzije magnetskog polja vjerojatno povezane s procesima koji se odvijaju u vanjskoj jezgri u blizini granice jezgre i plašta.²⁵ Korelacija između promjena intenziteta magmatizma plašta i učestalosti inverzija Zemljinog magnetskog polja ukazuje da poremećaji u Zemljinom magnetskom polju nastaju u vanjskoj jezgri zbog promjena u intenzitetu prijenosa topline na bazama perjanica koje se nalaze na granici jezgre i plašta. Ukupna toplinska snaga perjanica raste zbog pojave novih perjanica i povećanja toplinskog učinka već aktivnih perjanica. Može se pretpostaviti da se geodinamički poremećaji u vanjskoj jezgri i plaštu događaju tijekom razdoblja pojavljivanja perjanica i izlivanja na površinu.²⁶



Slika 14.
Raspodjela magnetskih polova prema podacima IGRF-13 od 1900. do 2015., raščlanjena na petogodišnje intervale za 2020. (crveno) i 2025. (predviđanje).

Izvor: Svjetski podatkovni centar za geomagnetizam, 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>

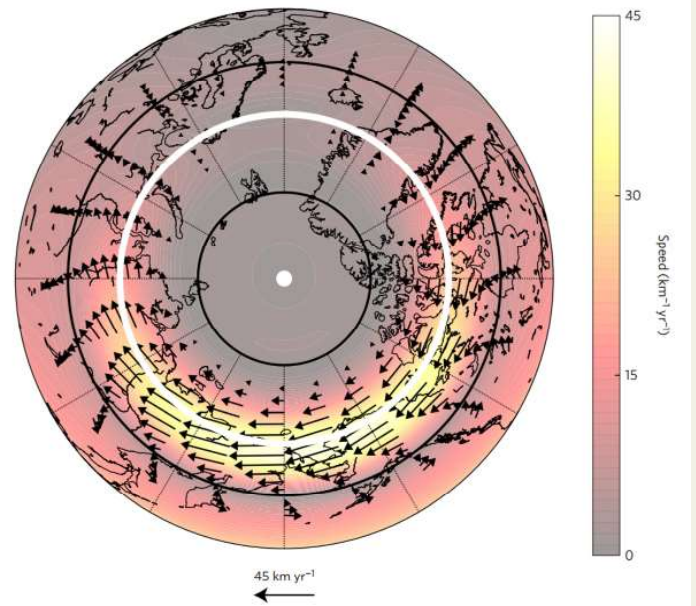
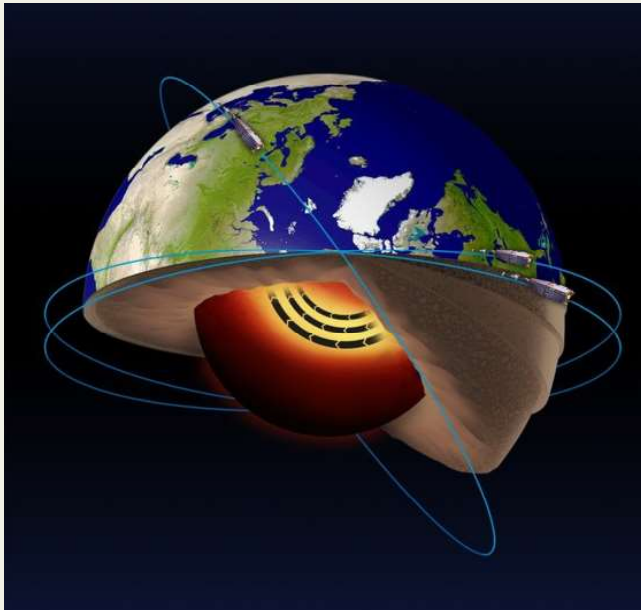
²²Alain Mazaud, Carlo Laj, The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 107, Issues 3–4, 1991, Pages 689–696, ISSN 012-821X, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90111-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T)

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., Kiryashkin, A.G., Kiryashkin, A.A. "Deep Geodynamics". Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, GEO Branch, 2001, 408 p.

²⁶Kiryashkin, A.A., Kiryashkin, 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.



Slika 15.

Analiza satelitskih podataka ESA Swarm otkrila je prisutnost mlazne struje u dijelu Zemljine jezgre od tekućeg željeza na dubini od 3000 km ispod površine, te da se ta mlazna struja ubrzava.

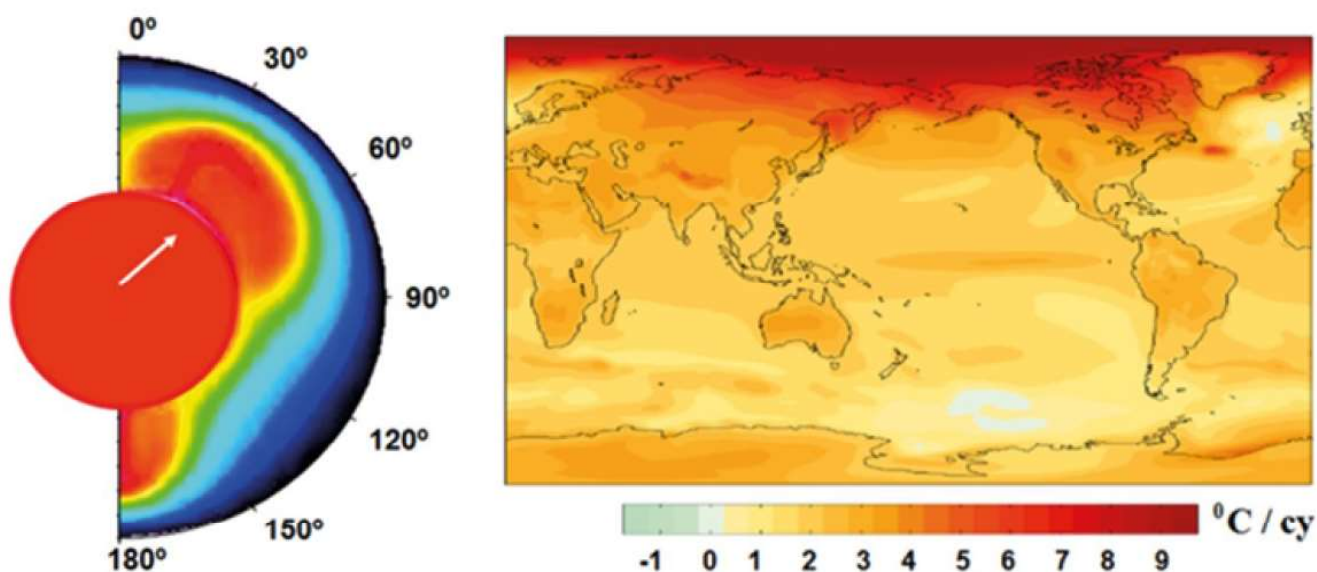
Izvor: ESA

Livermore, P. W., Hollerbach, R. i Finlay, C. C. (2017.). Ubrzavajući mlaz visoke geografske širine u Zemljinoj jezgri. *Nature Geoscience*, 10, 62–68. <https://doi.org/10.1038/ngeo2859>

Stoga, trenutno pomicanje Sjevernog magnetskog pola prema poluotoku Taimyr može biti dodatni dokaz promjena u Zemljinoj vanjskoj tekućoj jezgri i naglog porasta perjanice od granice jezgre i plašta ispod Sibira.

Dakle, kao rezultat vanjskog kozmičkog utjecaja na Zemljinu jezgru 1995. godine, unutarnja jezgra se počela zagrijavati. Vanjska jezgra se počela topiti, što je dovelo do brzog ubrzanja pomicanja Sjevernog magnetskog pola. Ukapljivanje vanjske jezgre stvorilo je uvjete za pomak jezgre prema Sibiru i poluotoku

Taimyr 1997.-1998. godine. Prema hipotezi koju je predložio dr. Yuri V. Barkin, pomak jezgre uzrokovao je asimetričan prijenos topline prema Sibiru (Sl. 16.). Ključno je napomenuti da se prijenos topline unutar plašta prvenstveno događa konvektivnim miješanjem. To sugerira da je pomak jezgre prvenstveno pokrenuo uspon magme prema Sibiru. Kasnije se u ovom dijelu Sibira počelo opažati nenormalno zagrijavanje atmosfere, koje se svake godine povećava.



Slika 16.

Prisilni relativni pomak jezgre i plašta te shema asimetričnog dovoda topline u gornje slojeve plašta (lijevo). Linearni trendovi površinskog zagrijavanja (u °C po stoljeću) prema podacima NCAR CCSM3 usrednjeni prema posebnom scenariju http://www.realclimate.org/bitz_fig3.png (desno)

Izvor: Barkin, Yu.V. (2009). Cikličeskie inversionnye izmenenija klimata v severnom i juzhnom polusharijah Zemli [Cyclic Inversion Climate Change in the Northern and Southern Hemispheres of Earth]. Geology of the Seas and Oceans: Materials of the XVIII International Scientific Conference (School) on Marine Geology. Vol. III. - Moscow: GEOS. pp. 4-8.

Sibir i sibirski Arktik zagrijavaju se 3-4 puta brže od ostatka svijeta

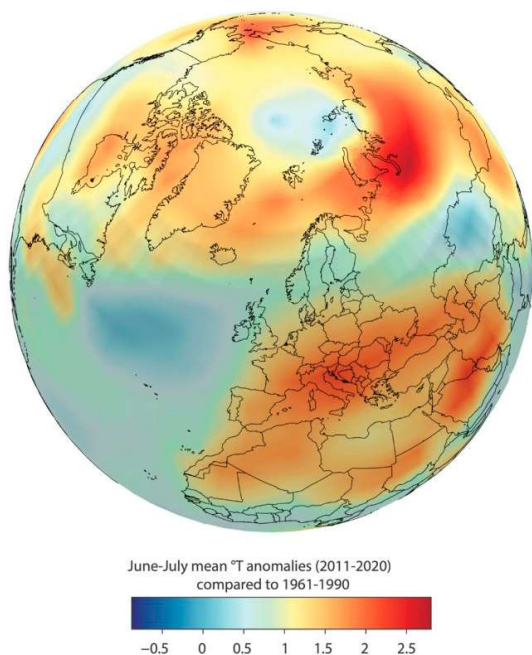
Prema različitim organizacijama, područje Rusije, posebice arktičko područje, doživljava ekstremno zagrijavanje.

Kako proizlazi iz podataka znanstvenika Međuvladinog panela o klimatskim promjenama (IPCC) za 2021. godinu, Rusija se zagrijava tri puta brže od ostatka svijeta, a njezine arktičke i sibirske regije zagrijavaju se četiri puta brže od globalnog prosjeka.

Godine 2022. Igor Shumakov, voditelj Roshidrometa, citirao je podatke Svjetske meteorološke organizacije²⁷ koji pokazuju da se teritorij Rusije zagrijava 2,5 puta više od globalne stope, pri čemu se u sjevernom polarnom području zemlje najbrže povećava temperatura, posebno tijekom posljednjih desetljeća. Sibir je

među regijama koje doživljavaju najintenzivnije zagrijavanje na globalnoj razini (Sl. 17.), trend bez presedana u posljednjih 7000 godina, kako je rekonstruirano iz dendroklimatskih studija.²⁸

Američki Woodwell Climate Research Center (WCRC)²⁹ proveo je opsežnu studiju kako bi procijenio kako su klimatske promjene utjecale na temperature, vlažnost tla, debljinu snježnog pokrivača, razine oborina i druge značajne klimatske parametre u različitim regijama Arktika. Kako bi to učinili, znanstvenici su kombinirali i sistematizirali podatke prikupljene putem satelita, zrakoplova, bespilotnih letjelica i zemaljskih meteoroloških postaja u proteklih 40 godina.



Slika 17.

Anomalije srednje temperature u lipnju i srpnju za sjevernu hemisferu (poluotoci Yamal i Taimyr) tijekom posljednjeg desetljeća promatranja (2011.-2020.). Temperature su izražene kao anomalije u odnosu na početnu klimu 1961. – 1990. pomoću skupa podataka HadCRUT.5.

Izvor: 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>

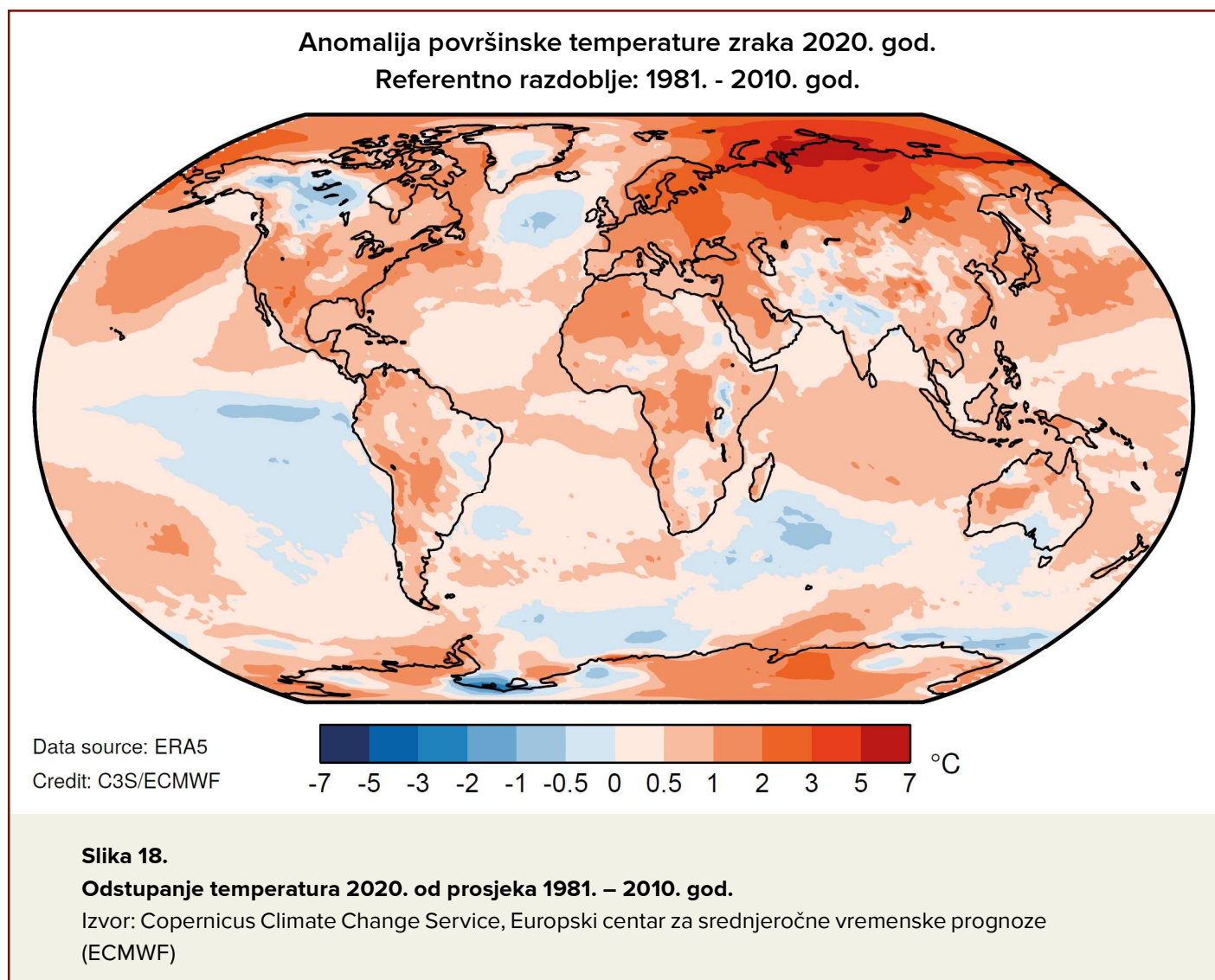
²⁹Watts, J. D., Potter, S., Rogers, B. M., Virkkala, A.-M., Fiske, G., Arndt, K. A., et al. (2025). Regional hotspots of change in northern high latitudes informed by observations from space. *Geophysical Research Letters*, 52, e2023GL108081. <https://doi.org/10.1029/2023GL108081>

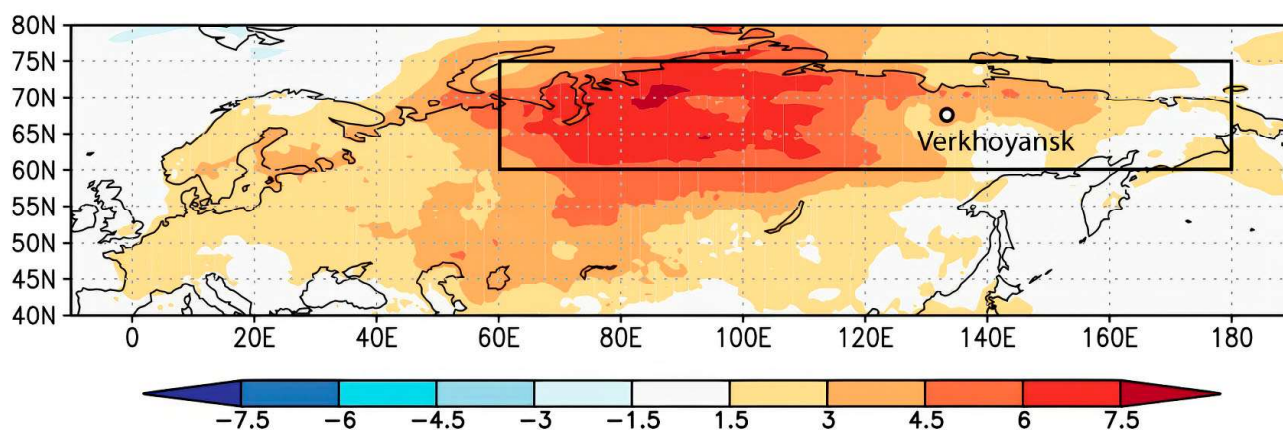
Naknadna analiza tih podataka omogućila je istraživačima da identificiraju dvadesetak klimatskih žarišta. Najintenzivnije zagrijavanje zahvatilo je polarna i središnja područja istočnog Sibira gdje su prosječne godišnje temperature rasle za 1,1°C svakog desetljeća, što je nekoliko puta više od stope globalnog zatopljenja. Temperature su rasle još brže na poluotoku Taimyr: 1,7°C po desetljeću. Slično tome, temperature u sibirskoj tajgi od kasnih 1980-ih rastu brzinom od 0,6°C po desetljeću.

Toplinski valovi u Sibiru dosegli su zabrinjavajuće nove razine posljednjih godina, posebno 2020. godine, kada su temperature naglo skočile u cijeloj regiji (Sl. 18.).

Temperature u Sibiru bile su više od 5°C (9°F) iznad prosjeka od siječnja do lipnja, s anomalijama koje su dosezale do 10°C (18°F) iznad prosjeka u lipnju (u odnosu na početnu vrijednost od 1981. do 2010.). Ovo iznimno vruće razdoblje oborilo je lokalne toplinske rekorde, uključujući meteorološku postaju Verkhoyansk, koja je 20. lipnja zabilježila najvišu temperaturu svih vremena od +38°C (100,4°F) (Sl. 19.).

Ruska meteorološka služba izjavila je da je ova temperatura najviša ikad zabilježena sjeverno od Arktičkog kruga.





Slika 19.

Dugotrajna sibirski vrućina: prosječne temperature od siječnja do lipnja 2020. u usporedbi s normom (1981. – 2010.) u sibirskoj regiji i lokacija Verkhoyansk, gdje je u lipnju zabilježena rekordna temperatura Arktičkog kruga od +38°C.

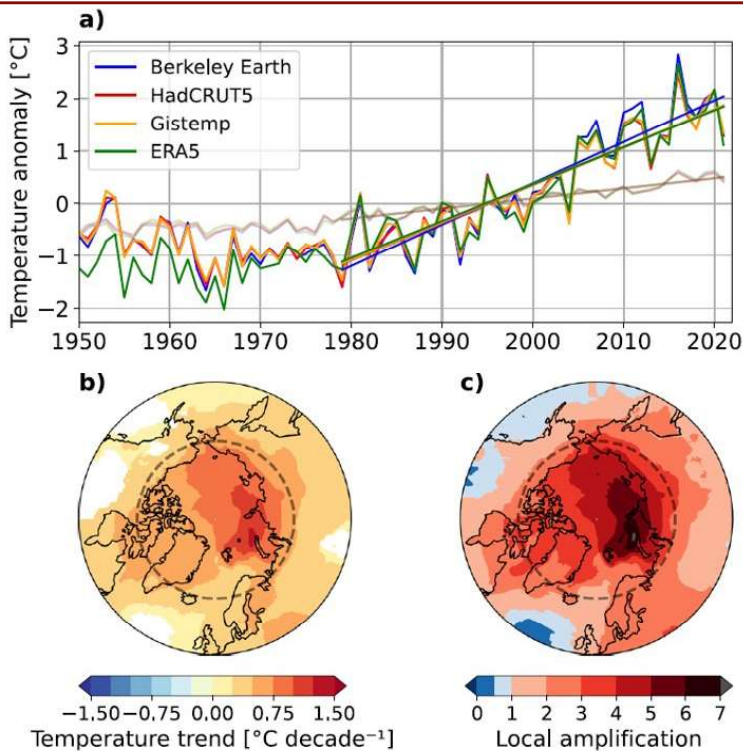
Izvor: Ciavarella, A., Cotterill, D., Stott, P., et al. (2021). Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. *Climatic Change*, 166, 9. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>

Ti toplinski valovi ne traju u Sibiru kontinuirano, već se javljaju u obliku pulsiranja jer inkluzije magme koje uzrokuju toplinske valove imaju valni karakter. U atmosferi u kojoj se zračne mase slobodno kreću i miješaju, toplinski valovi mogu popustiti u roku od nekoliko mjeseci kao što se dogodilo 2020. godine, za razliku od toplinskih valova u vodenom okolišu.

Prema istraživanju iz 2022. godine, Sibirski Arktik zagrijava se gotovo četiri puta brže od globalnog prosjeka, što je omjer veći nego što je ranije bio prikazan u klimatskim modelima i koji je iznenadio znanstvenike³⁰ (Sl. 20.).

Značajno, ovo zagrijavanje na Arktiku događa se posebno u regiji poluotoka Taimyr. Ova anomalija u oceanskoj zoni Sibira može se objasniti tanjom oceanskom korom koja učinkovitije provodi toplinu, te većim toplinskim kapacitetom vode u usporedbi s atmosferom. Oceanska voda stoga intenzivno apsorbira i zadržava toplinu iz uzdižuće magmatske perjanice, iako se perjanica diže ispod kontinentalne kore na relativnoj udaljenosti od obale.

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>



Slika 20.

Razvoj srednje godišnje temperature na Arktiku. (a) Godišnje srednje temperaturne anomalije na Arktiku (66,5°–90°N) (tamne boje) i globalno (svijetle boje) tijekom 1950. – 2021. izvedene iz različitih skupova podataka promatranja. Temperaturne anomalije izračunate su u odnosu na standardno 30-godišnje razdoblje od 1981. do 2010. godine. Isprekidana linija u (b) i (c) prikazuje Arktički krug (66,5°N zemljopisne širine).

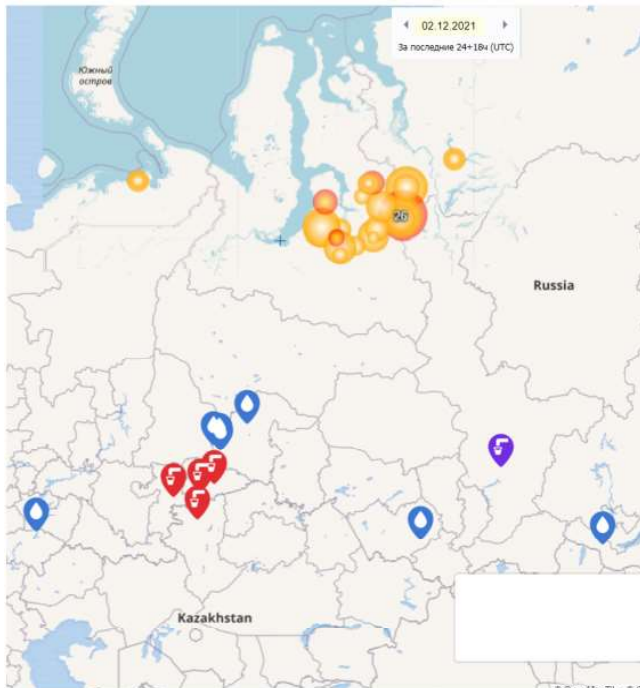
Izvor: Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 3, 168.

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

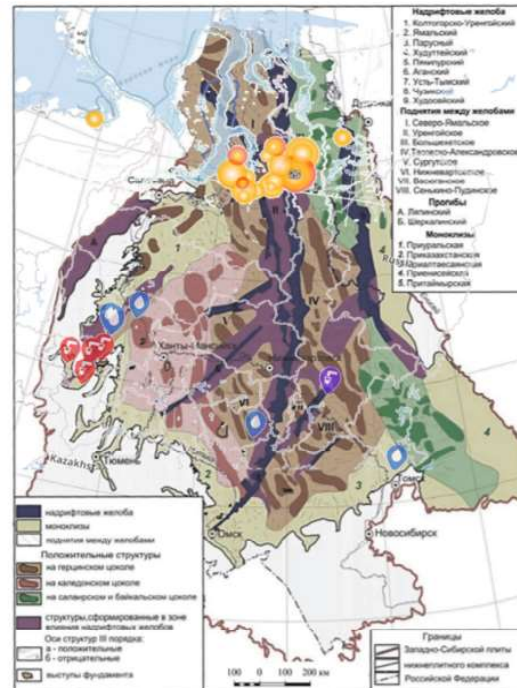
Neizravni znakovi uspona sibirske perjanice

Prodor magmatske perjanice u Zemljinu koru ispod Sibira uzrokuje ne samo zagrijavanje atmosfere, već i niz drugih anomalija: permafrost se topi odozdo prema gore; seizmička aktivnost u regiji raste; topla voda se diže na površinu, uzrokujući ključanje bunara, a širom Sibira izbili su požari bez presedana, uključujući i pod snijegom. Najveća lokalizacija šumskih

požara pod snijegom počela se manifestirati posljednjih godina na jugu poluotoka Taimyr, Yamal i Gydan u polarnoj regiji. Važan čimbenik je da se “zombi požari” — šumski požari pod snijegom — i kipuća voda u bunarima pojavljuju iznad područja dubokih rasjeda (Sl. 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]"

Slika 21.

Karta koja prikazuje lokalizaciju zimskih šumskih požara pod snijegom izvan arktičkog kruga 2021. god.



Fotografijama požara pod snijegom u regiji Sverdlovsk

U sjevernim geografskim širinama povećavaju se emisije metana i vodika iz podzemlja, raste broj kratera od eksplozija prirodnog plina, a intenzivira se blatni vulkanizam u arktičkom pojasu. Zagrijavanje odozdo uzrokuje degradaciju permafrosta i uništavanje plinskih hidrata, što dovodi

do ispuštanja plinova, eksplozija kratera i povećanja blatnog vulkanizma. Plin koji se oslobađa iz unutrašnjosti planeta utječe na stanje atmosfere, uzrokujući dodatne toplinske, geokemijske i elektromagnetske anomalije. Razmotrimo ove procese detaljnije.

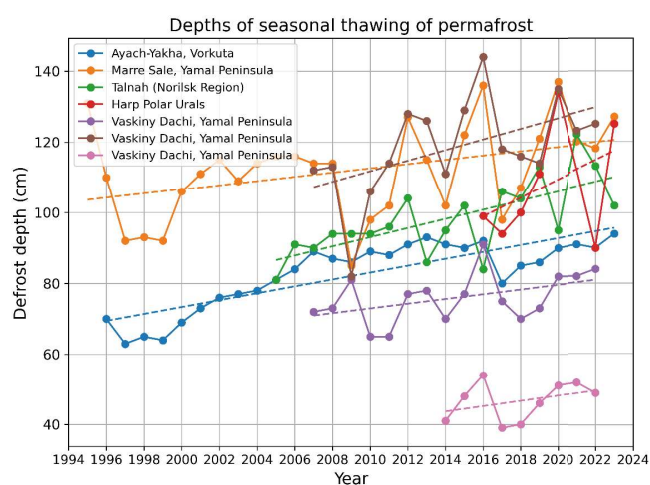
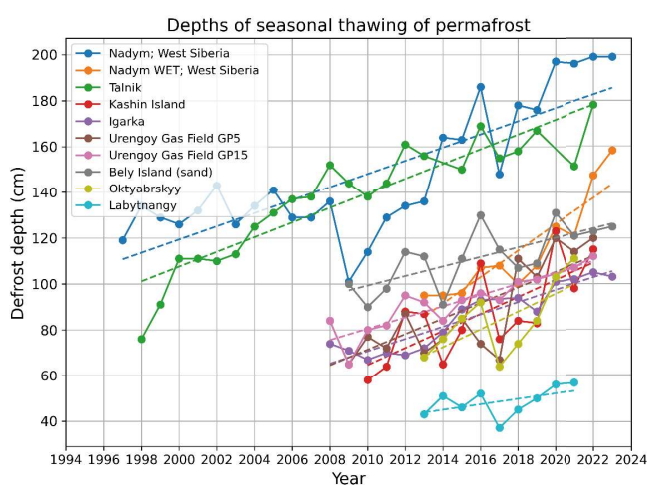
Topljenje permafrosta

Još jedan pokazatelj dodatne geotermalne topline koja dolazi iz perjanice plašta je stanje permafrosta. Autori izvješća analizirali su podatke o dubini sezonskog otapanja permafrosta u Rusiji od 1994. do 2023. godine. Baza podataka sastavljena je na temelju mjerenja provedenih u okviru programa Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) promatrajući reakciju aktivnog sloja i permafrosta blizu površine. Baza podataka dostupna je na web stranici permafrost.su.

Trenutačno u Rusiji postoji 58 lokacija koje prate permafrost pomoću standardizirane metodologije, a 46 lokacija provodi mjerenja više od 10 godina,

što omogućuje prepoznavanje dugoročnih trendova. Analiza niza podataka omogućila je istraživačima da identificiraju mjesta na kojima postoji stalni trend povećanja dubine topljenja, što ukazuje na dodatno zagrijavanje u ovom području.

Identificirane su dvije skupine podataka: mjesta s izraženijim trendom povećanog otapanja na dubinama od 40 cm (15,8 inča) do 200 cm (78,7 inča) (Sl. 22.a) i mjesta s manje intenzivnom stopom otapanja permafrosta na dubinama od 40 cm (15,8 inča) do 140 cm (55,1 inča) (Sl.22.b).



Slika 22.

Promjena dubine sezonskog otapanja permafrosta u različitim regijama s različitim intenzitetom: a) s izraženijim povećanjem dubine otapanja; b) s manje izraženim povećanjem dubine otapanja

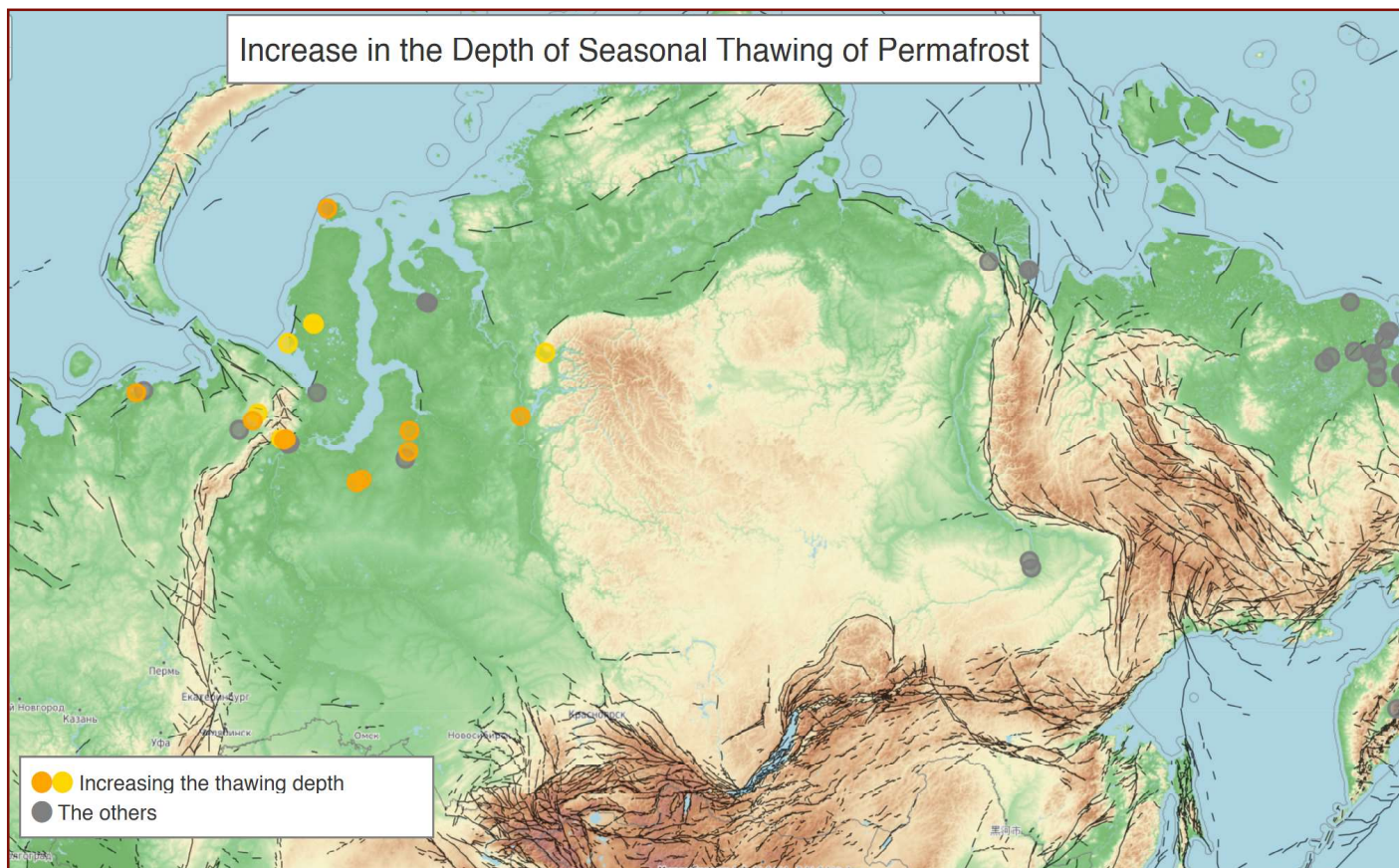
Izvor podataka: <https://permafrost.su>

Mjerenja se provode u okviru programa Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM):

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

Radi jasnoće, sve promatrane točke mapirane su i označene narančastom odnosno žutom bojom (Sl. 23.). Važno je napomenuti da su te točke uglavnom koncentrirane u određenoj regiji: na sjeveru Zapadnog Sibira, na poluotoku Yamal i južno od poluotoka Gydan i Taimyr.

Ovakva lokalizacija područja maksimalnog otapanja permafrosta odgovara području smanjenih brzina seizmičkih valova u plaštu, u pretpostavljenoj zoni širenja glave magmatske perjanice. To je pak uzrok povišenih temperatura tla, uključujući i unutar smrznutog sloja.



Slika 23.

Mjesta s povećanim dubinama sezonskog otapanja permafrosta. Mjerna mjesta označena su točkama: sivo — mjesta bez primjetnog povećanja sezonskog otapanja, žuto — mjesta gdje se dubina otapanja povećava.

Izvor podataka: <https://permafrost.su>

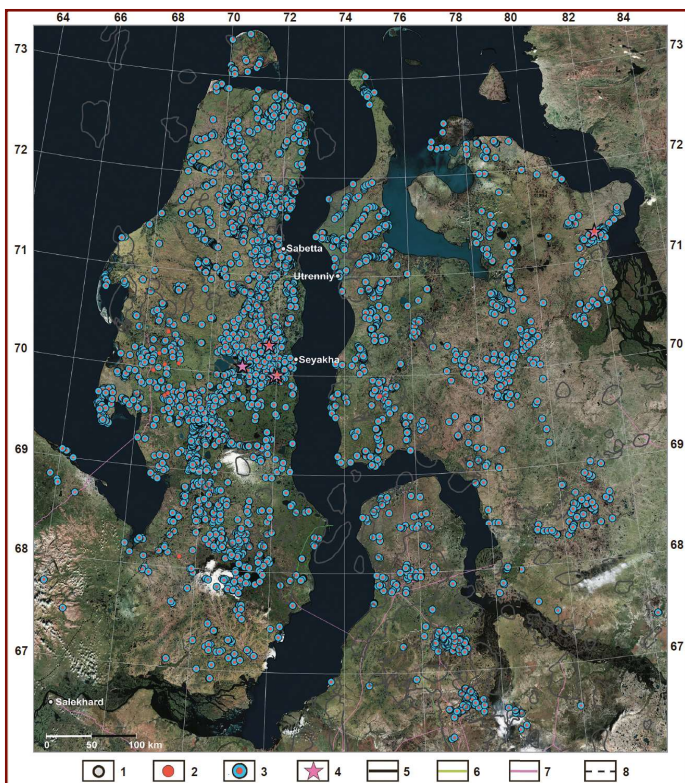
Mjerenja se provode u okviru programa Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM):

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

Manifestacije blatnog vulkanizma

Dodatno zagrijavanje od magme koja se diže rezultira degradacijom permafrosta i utječe na plinske hidrate sačuvane u tlu, oslobađajući velike količine plinova sadržanih u njima. Osim toga, plin migrira iz plinskih naslaga i voda u ležištima visoko zasićenih plinom, smanjujući svojstva elastičnosti i čvrstoće tla, pospješujući ukapljivanje gline i dovodeći do mogućih procesa blatnog vulkanizma. Blatni vulkanizam je geološki proces erupcije mješavine plina, vode i klastičnog materijala kroz pukotine u Zemljinoj kori pod utjecajem unutarnjeg geostatskog tlaka.

Ove su procese otkrili istraživači Ruske akademije znanosti (RAS) na arktičkom poluotoku Yamal.³¹ Kao rezultat kompleksa geoloških i geofizičkih istraživanja koja su koristila podatke daljinskog istraživanja Zemlje između 2014. i 2022. godine, identificirano je više od 3000 područja snažnih emisija plinova sa stvaranjem kratera na dnu termokraških jezera, rijeka i obalnog dijela Karskog mora (Sl. 24.).



Slika 24.

Raspodjela snažnih zona izbijanja plina na sjeveru zapadnog Sibira. Oznake: 1 — naselja, 2 — izolirani krateri izbijanja plina, 3 — krateri izbijanja plina na dnu rezervoara, 4 — blatne vulkanske manifestacije, 5 — konture naftnih i plinskih polja, 6 — naftovodi, 7 — plinovodi, 8 — željeznica. Osnovna karta je mozaik satelitskih snimaka ESRI-ja

Izvor: 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).

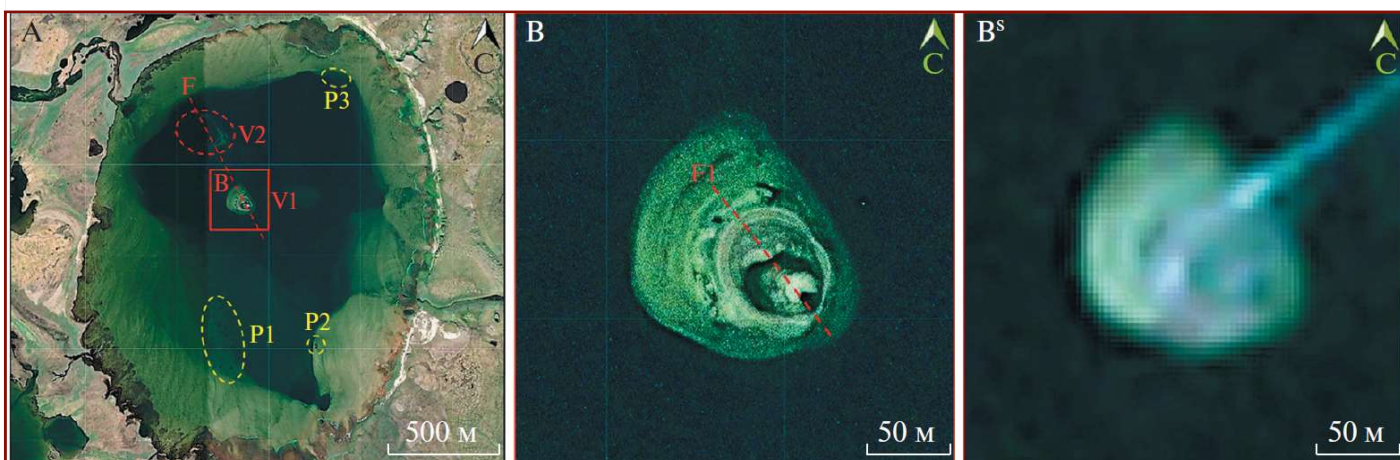
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

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>

U razdoblju 2022. – 2023. godine podaci daljinskog istraživanja prvi su put otkrili velike blatne vulkanske strukture na dnu termokraških jezera Labvarto i Yambuto, povremeno pokazujući aktivni blatni vulkanizam³² (Sl. 25.). Termokraško jezero — to je vodeno tijelo nastalo otapanjem permafrosta. Dakle, ne samo otapanje jezera, već i ukapljivanje gline duboko ispod njega ukazuje

na duboki izvor topline.

Prema autorima istraživanja, tako izrazite blatne vulkanske strukture na dnu termokraških jezera nisu prije bile dokumentirane u cijeloj cirkum-arktičkoj regiji.



Slika 25.

WorldView-2 satelitska snimka termokraškog jezera Labvarto (A) i njegov uvećani fragment (B), dopunjen fragmentom satelitske snimke Sentinel-2 (BS). Oznake: P1, P2 i P3 – udubine; V1 i V2 – blatni vulkani; F i F1 – predviđeni rasjedi.

Izvor: 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>

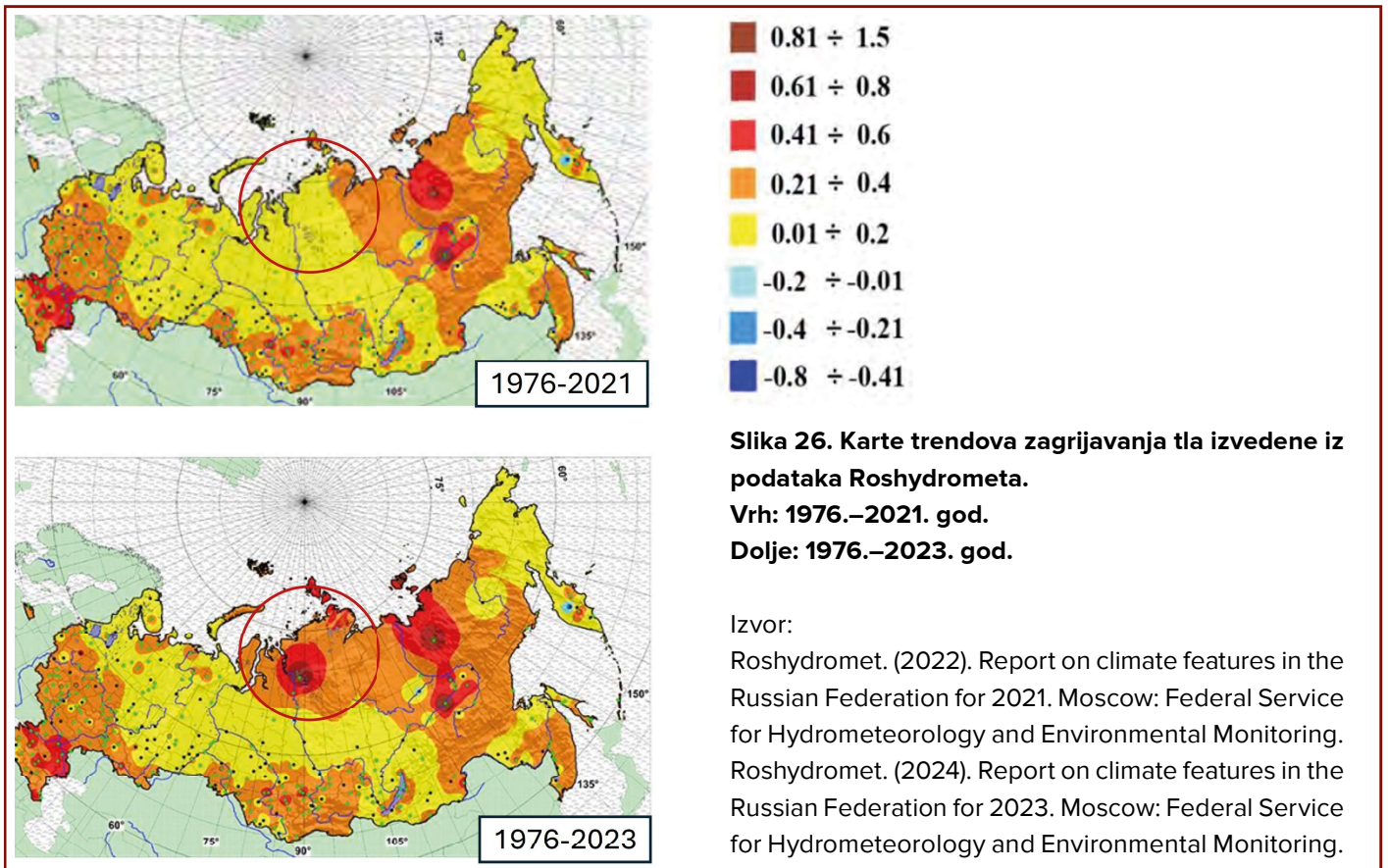
³² Bogoyavlensky, V. I. NEW DATA ON MUD VOLCANISM IN THE ARCTIC ON THE YAMAL PENINSULA. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle 512, 92–99 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

Zagrijavanje tla

Na temelju podataka Roshydrometa od 2021. do 2023. godine analizirane su karte temperature tla na dubinama od 80 cm, 160 cm i 320 cm. Najinformativnija usporedba bila je usporedba temperaturnih trendova u razdobljima 1976. – 2021. godine i 1976. – 2023. godine (Sl. 26.). Između 2021. i 2023. godine pojavila se jasna anomalija na karti trendova u području južno od poluotoka Gydan i Taimyr. Ova se anomalija geografski podudara s područjem niskih brzina u

plaštu identificiranom seizmičkom tomografijom ispod litosfere sibirskog područja.

S obzirom na značajnu dubinu mjerenja (320 cm) i opsežnu pokrivenost motrenja (466 meteoroloških postaja diljem Rusije), može se zaključiti da je otkrivena temperaturna anomalija povezana s povećanjem geotermalne topline zbog porasta magmatske perjanice

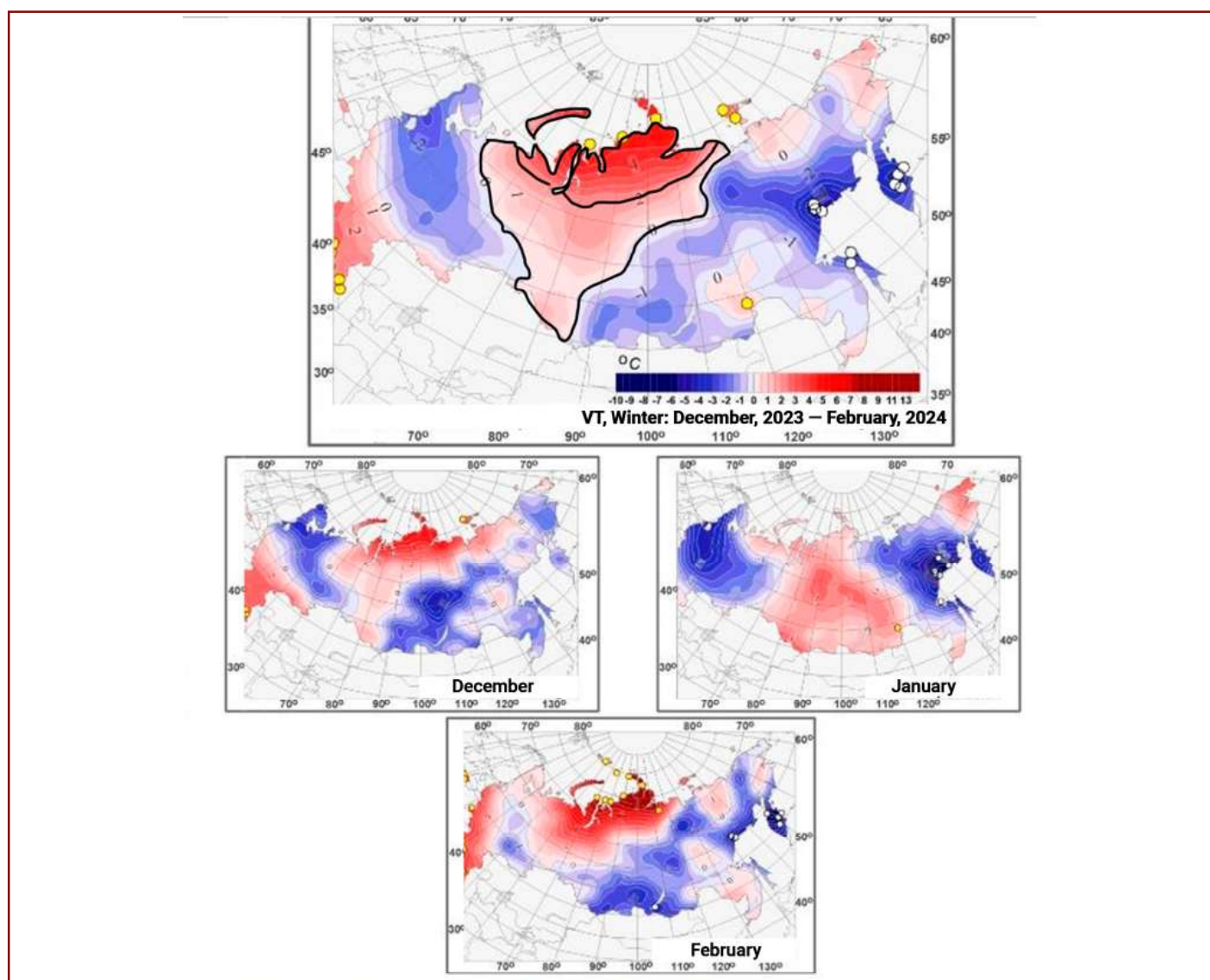


Temperatura zraka blizu površine

Promatranja temperature tijekom zime 2023. – 2024. godine također otkrivaju anomalan obrazac u temperaturama zraka blizu površine (Sl. 27.). Karta prosječnih temperaturnih anomalija od prosinca 2023. do veljače 2024. godine pokazuje porast od 2,0–4,5°C iznad

norme na području poluotoka Gydan i Taimyr.

S obzirom na sjeverni položaj ove regije, tako značajan zimski porast temperature može se pripisati toplinskom utjecaju plašta.



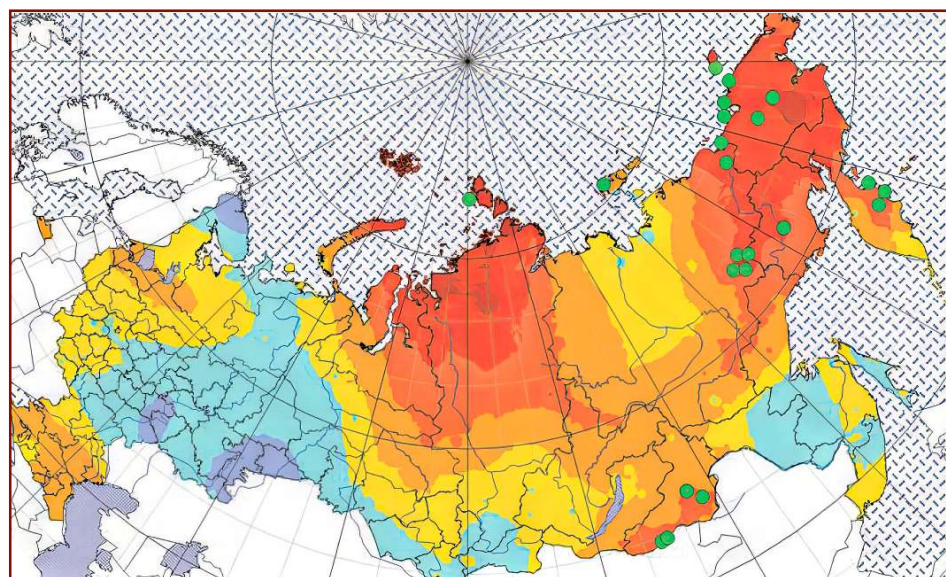
Slika 27.

Polja prosječnih sezonskih i mjesečnih anomalija temperature zraka blizu površine (°C) diljem Rusije tijekom zime 2023/24.

Izvor: Roshydromet. (2024). Report on climate features in the Russian Federation for 2023. Moscow: Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

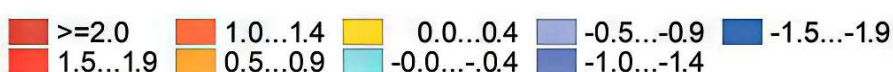
Analiza karata prosječne mjesečne temperature³³ za siječanj i srpanj u razdoblju 2001. – 2022. godine pokazuje dosljednu temperaturnu anomaliju u proučavanoj regiji (Sl. 28.,29.). Ovo ukazuje na to da anomalija nije

opažena samo tijekom posljednje dvije godine, već je opstala tijekom čitavog 23-godišnjeg razdoblja promatranja, dodatno podupirući zaključak da prodor perjanice utječe na temperature blizu površine.



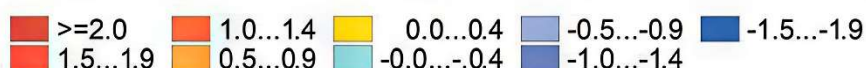
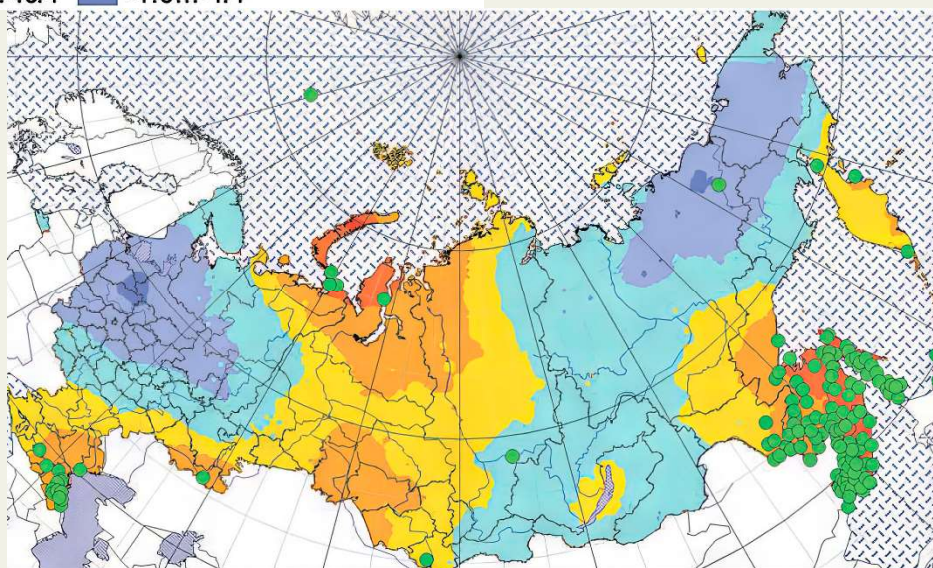
Slika 28.
Koeficijenti linearnog trenda (°C/10 godina) za prosječne mjesečne temperature zraka od 2001. do 2022. (unutar granica Rusije od veljače 2022.) – siječanj.

Izvor: 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>



Slika 29.
Koeficijenti linearnog trenda (°C/10 godina) za prosječne mjesečne temperature zraka u Moskvi od 2001. do 2022. (unutar granica Rusije od veljače 2022.) – srpanj.

Izvor: Sherstyukov B. G. Global warming and its possible causes. Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2023;(70):7–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

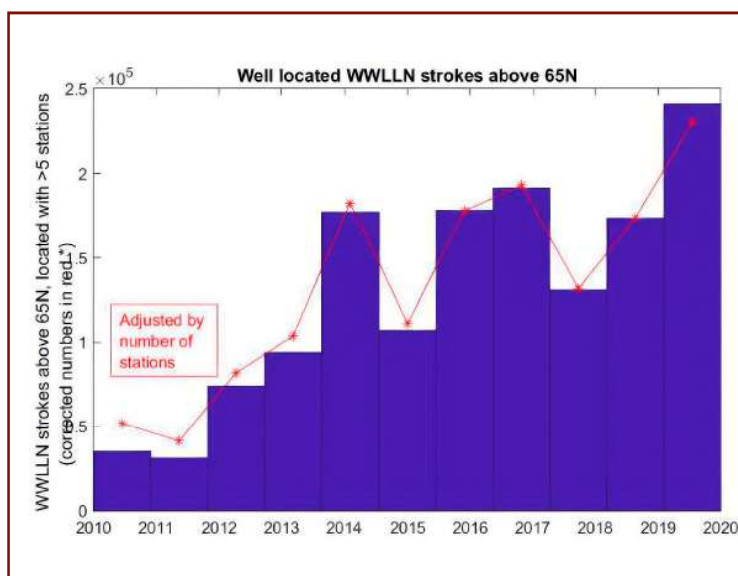


³³ Sherstyukov, B. G. (2023). Global warming and its possible causes. Journal of Hydrometeorology and Ecology, 70, 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

Povećanje količine munja

Znanstvena zajednica sve je zabrinutija zbog porasta grmljavinskih oluja i udara munja na Arktiku. Broj munja sjeverno od 65° N zemljopisne širine utrostručio se između 2010. i 2020. godine³⁴ (Sl. 30.). Značajno je da je većina tih udara koncentrirana u sjevernom Sibiru, dok ih gotovo nema u sjevernoj Kanadi i na Grenlandu (Sl. 31., 32.).

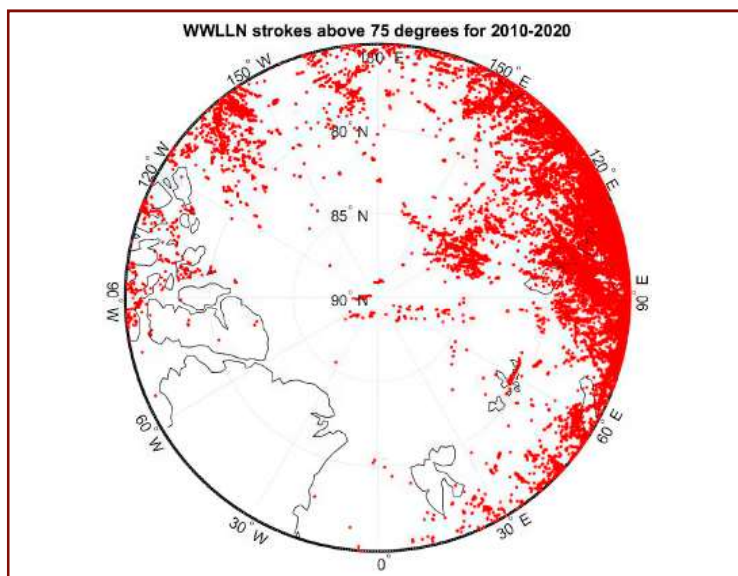
Munje napreduju prema Sjevernom polu. U kolovozu 2019. višestruki udari munje zabilježeni su samo nekoliko stotina kilometara od Pola.³⁵ Većina munja na visokom Arktiku (sjeverno od 80° N) događa se tijekom nekoliko intenzivnih grmljavinskih dana svakog ljeta. Međutim, ove oluje predstavljaju novi fenomen za regiju, budući da su grmljavinske oluje bile rijetke prethodnih godina.



Slika 30.

Ispravno zabilježena pražnjenja munja WWLLN iznad 65°N (plavo), a crveni dijagram prikazuje prilagodbu na temelju ukupnog broja WWLLN postaja. WWLLN, World Wide Lightning Location Network.

Izvor: 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>



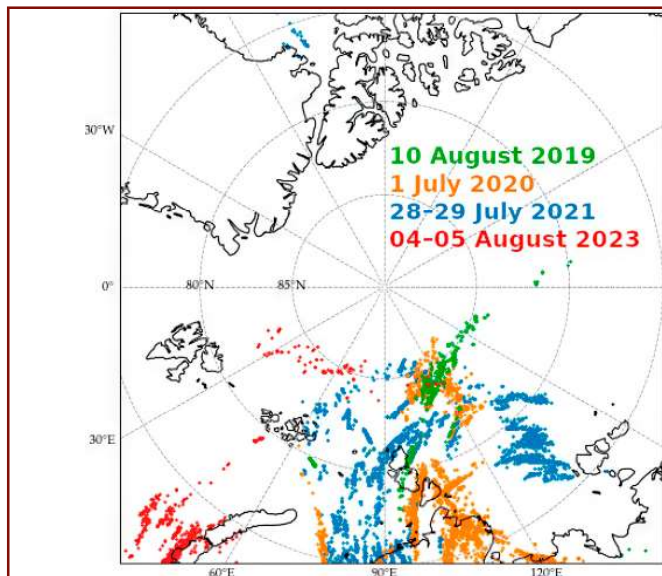
Slika 31.

Globalna distribucija WWLLN udara u lipnju srpnju i kolovozu za 2010. – 2020. iznad 75°N. WWLLN – Svjetska mreža za detekciju munja.

Izvor: 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/>



Slika 32.

Lokacije munja koje je otkrio WWLLN tijekom grmljavinskih oluja 2019.–2023. Zelena—2019, narančasta—2020, plava—2021, crvena—2023.

Izvor: 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>

Stalna lokacija ovih oluja posljednjih godina pripisuje se ekstremnim ljetnim vrućinama uočenim u sjevernom Sibiru, s temperaturama koje dosežu i do 35°C tijekom ljetnih mjeseci. Dodatno, hipoteza je da je sveukupno povećanje atmosferske ionizacije u ovoj regiji, zbog prodora magmatske perjanice, također značajan faktor koji pridonosi porastu aktivnosti munja. Ovaj proces uključuje pretvorbu toplinske energije u električnu putem Yutkinovog efekta, koji se događa tijekom eksplozivnih interakcija dubokog plašta kada tokovi magme različitih temperatura dođu u kontakt. Kao rezultat toga, ogromne količine energije oslobađaju se iz Zemljine unutrašnjosti, što dovodi do povećanja površinskog statičkog naboja, promjena površinskog potencijala, pojačane atmosferske ionizacije i, posljedično, porasta aktivnosti munja.

Osim toga, značajne količine plina oslobađaju se kroz pukotine u Zemljinoj kori. Ovaj proces može utjecati na stvaranje perjanica i lokalne vremenske uvjete. Intruzija magme ključni je čimbenik površinskog zagrijavanja, povećane atmosferske vlage i razvoja toplinskih anomalija, a sve to doprinosi stvaranju grmljavinskih oblaka i munja.

Budući da je za nastanak grmljavinske oluje i munje potrebna kombinacija hladnog zraka, toplog zraka i konvektivne nestabilnosti, položaj sibirске perjanice pruža optimalne uvjete za njihov razvoj.

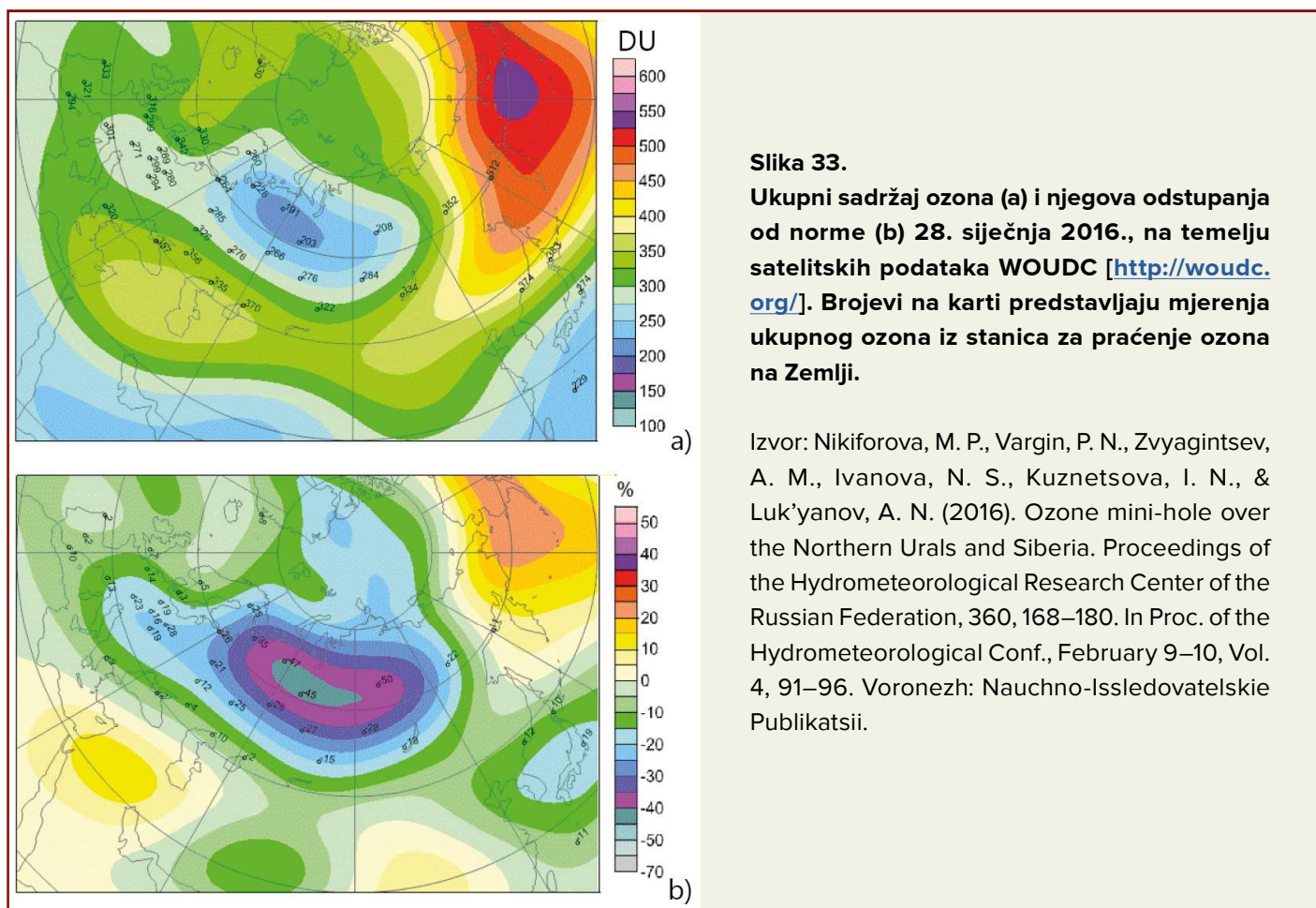
Oštećenje ozonskog omotača

Magmatsku aktivnost unutar Zemljine unutrašnjosti prati oslobađanje značajnih količina vulkanskih plinova, uključujući vodik, metan i ugljikov dioksid. Prema istraživanju V. L. Syvorotkina,³⁶ emisije vodika doprinose degradaciji ozonskog omotača. Budući da se uspinjanje magme odvija na pulsirajući način, otplinjavanje i naknadno uništavanje ozonskog omotača također će se manifestirati sporadično, odnosno kao povremeni događaji.

Anomalije ozonskog omotača opažene su iznad sjevernog Sibira od 1997. do 1998. godine, što se poklapa s pomicanjem Zemljine jezgre

prema poluotoku Taimyr. Epizode oštećenja ozona zabilježene su 2011., 2016. i 2020. godine³⁷ a najveći deficit ozona dogodio se 2016. godine.³⁸ Krajem siječnja 2016., prvi put od početka praćenja 1973. godine, otkrivena je ozonska anomalija iznad sjevernog Urala i Sibira, s mjerenjem ukupnog sadržaja ozona 190–200 DU—40–45% niže od dugoročnog prosjeka. Ova se anomalija zadržala do tjedan dana (Sl. 33).

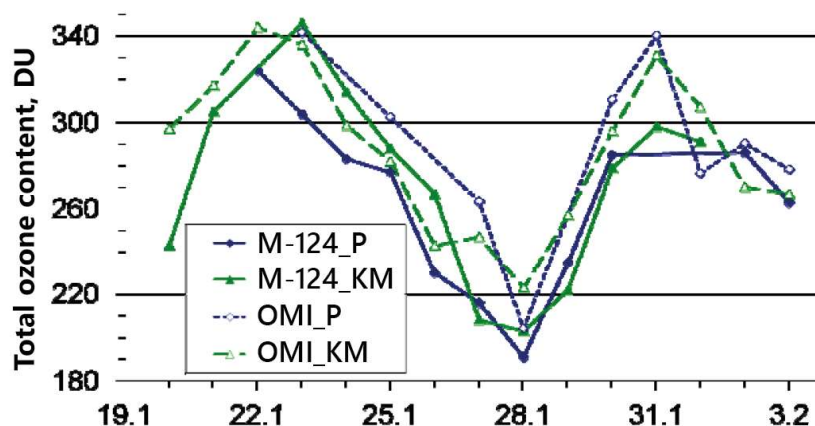
Značajno smanjenje ukupnog sadržaja ozona također je zabilježeno korištenjem instrumenta za praćenje ozona (OMI) na NASA-inom satelitu Aura (Sl. 34.).



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

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



Slika 34.

Ukupni sadržaj ozona izmjeren pomoću zemaljskog ozonometra M-124 i instrumenta OMI na satelitu Aura (SAD) na postajama Pechora (P) i Khanty-Mansiysk (KM) od 20. siječnja do 3. veljače 2016.

Izvor: 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-Issledovatel'skie Publikatsii.

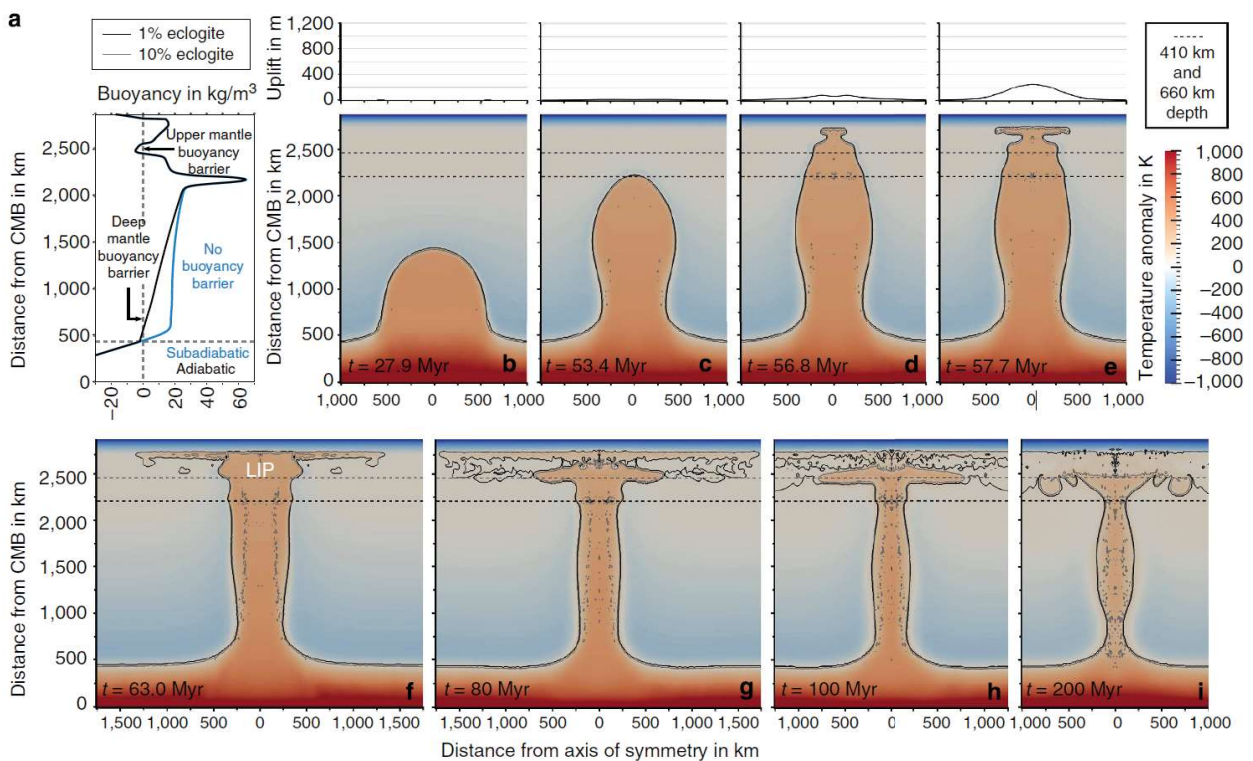
Važno je napomenuti da dugoročni sezonski ciklus ukupnog sadržaja ozona u vantarpskim geografskim širinama sjeverne hemisfere obično doseže svoj minimum u rujnu, a maksimum u ožujku-travnju. Međutim, 2016. godine degradacija ozona dogodila se neobično rano, u siječnju, dosegnuvši najniže zabilježene razine u povijesti instrumentalnih promatranja.

Stoga oštećenje ozonskog omotača nad sibirskom regijom može poslužiti kao dodatni pokazatelj emisija plinova kroz rasjede, što je rezultat uzlaznog kretanja magmatske perjanice prema površini.

Struktura, moguće dimenzije i lokalizacija magmatske perjanice, temeljeno na objavljenim i promatranim podacima

Struktura magmatske perjanice može se ugrubo vizualizirati kao gljiva. Ima rep (stabljiku) koja nosi zagrijani materijal od granice jezgra-plašt prema gore. Gornji dio, koji se širi dok se diže,

tvori glavu perjanice. Kada perjanica dosegne bazu litosfere, nailazi na refraktorni sloj čvrstih stijena, uzrokujući širenje glave horizontalno ispod litosfere, poput gljive (Sl. 35.).



Slika 35.
Prikazuje model evolucije magmatske perjanice, slične onoj koja je formirala Sibirske trape prije 250 milijuna godina.

Grafikon s lijeve strane (a) prikazuje kako se magma diže kroz različite slojeve Zemljinog plašta. Glavni dio slike (b–i) služi kao prikaz “vremenske crte”, prikazujući faze razvoja perjanice. U početku, “stup” vruće magme uzdiže se s dna plašta. Postupno, ovaj stup doseže gornji plašt, gdje se širi u “glavu nalik na gljivu”. S vremenom stup postaje tanji

i počinje se fragmentirati u odvojene strukture. Boje na dijagramu predstavljaju temperaturu: crvena i narančasta područja označavaju najtoplija područja. Plava područja predstavljaju hladnija područja.

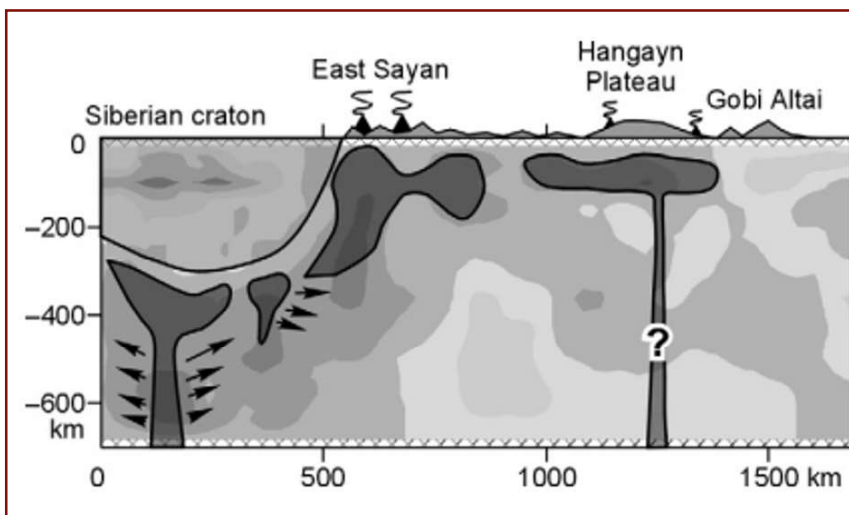
Izvor: Dannberg, J., & Sobolev, S. (2015). Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept. *Nature Communications*, 6, 6960. <https://doi.org/10.1038/ncomms7960>

Prema istraživačkim podacima, kako se perjanica približava litosferi, njen radijus se udvostručuje dok teče, a brzina uspona značajno opada.³⁹ Uzlazni vrući materijal iz repa perjanice vrši pritisak i probija litosferu, formirajući pukotine. U slabim područjima tada se formiraju sekundarni stupovi — gornje magmatske komore unutar Zemljine kore. Takve komore postoje, na primjer, ispod Yellowstonea, Campi Flegrei-a i drugih supervulkana. Te komore su mjesta gdje može doći do proboja kore i masivnih erupcija magme.

Važno je napomenuti da, prema postojećim modelima, uspon magmatske perjanice na površinu može trajati desetke milijuna godina. Međutim, ove kalkulacije temelje se na teorijskim pretpostavkama, dok praktična opažanja trenutnih geodinamičkih procesa sugeriraju drugačije. Opažanja u Sibiru ukazuju da se uspon perjanice može dogoditi u roku od nekoliko desetljeća.

Prema literaturi,⁴⁰ poznato je da je slična magmatska superperjanica, koja je uzrokovala brojne bazaltne erupcije u Euroaziji (u Sibiru) na granici permskog i trijaskog razdoblja (prije 250 milijuna godina), imala sljedeće dimenzije: 4000 km od zapada prema istoku i 3000 km od sjevera prema jugu. Pretpostavlja se da je glava perjanice imala promjer od 1000 do 2000 km.

Poznato je da je Zapadnosibirska ploča mlađa i tanja, s debljinom od 35 do 40 kilometara. Suprotno tome, Istočnosibirska ploča (ili platforma), poznata kao Sibirski kratonski blok, starija je, deblja i hladnija, s debljinom od 40 do 45 kilometara. Prema podacima seizmičke tomografije⁴¹ znanstvenici pretpostavljaju da se trenutno ispod Istočnosibirske platforme opažaju mala magmatska žarišta. Ta se žarišta šire lateralno ispod Sibirskog kratonskog bloka zbog hladnije prirode ploče (Sl. 36.).



Slika 36.

Prikazuje dijagram iz članka, koji ilustrira kako mala magmatska žarišta (prikazana strelicama s lijeve strane) teku oko Sibirskog kratonskog bloka.

Izvor: 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>

³⁹ 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.

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

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

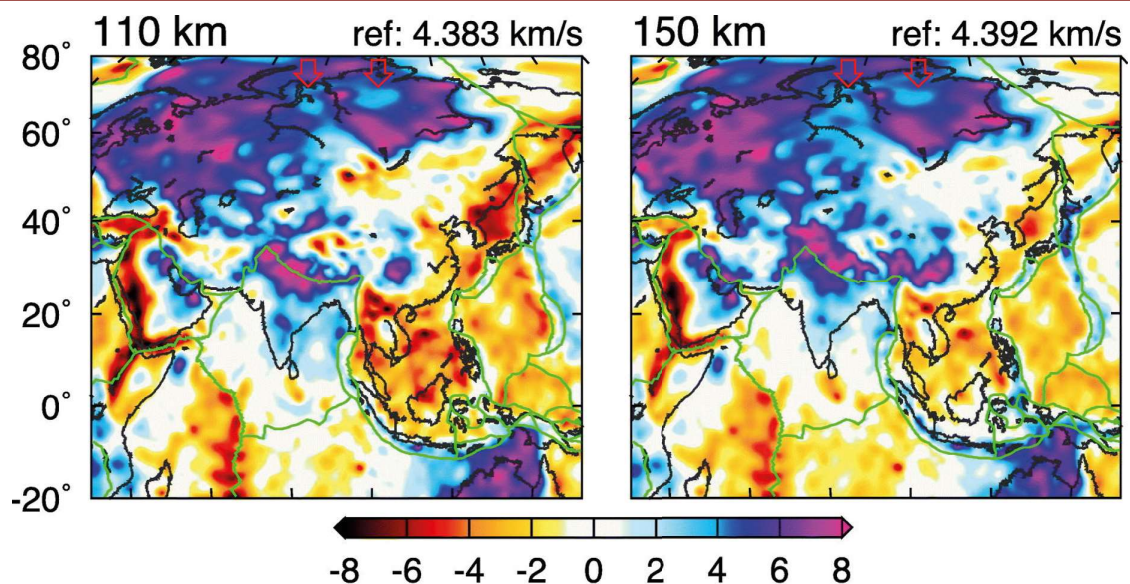
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012>

Prema hipotezi, moderna sibirska perjanica trenutno se širi ispod osnove Istočnosibirske ploče i djelomično ispod Zapadnosibirske ploče. Smatra se da se ovo širenje događa na dubinama od 50–60 km (31–37 milja), pri čemu se “rep” perjanice najjasnije opaža na dubinama od oko 100 km (62 milje). Sekundarne intruzije plina vjerojatno se već događaju na dubinama od otprilike 40 km (25 milja).

Neki seizmotomografski modeli otkrivaju anomalije niske brzine⁴² (koje ukazuju na veću količinu rastopljenog materijala na dubinama od 110–150 km (68–93 milje), što je u skladu

s tekućim plašnim područjem ispod područja južno od poluotoka Gydan i Taimyr (Sl. 37.). To je vidljivo na kartama brzina, prema radu objavljenom u kolovozu 2024. godine. Te anomalije se vjerojatno mogu povezati s dva dotjecanja magmatskog materijala, odnosno “repovima” perjanice (Sl. 38.).

Ako je ovaj model točan, promjer svake perjanice koji se uzdiže ispod Istočnosibirskog kratona je približno 600–700 km (373–435 milja).



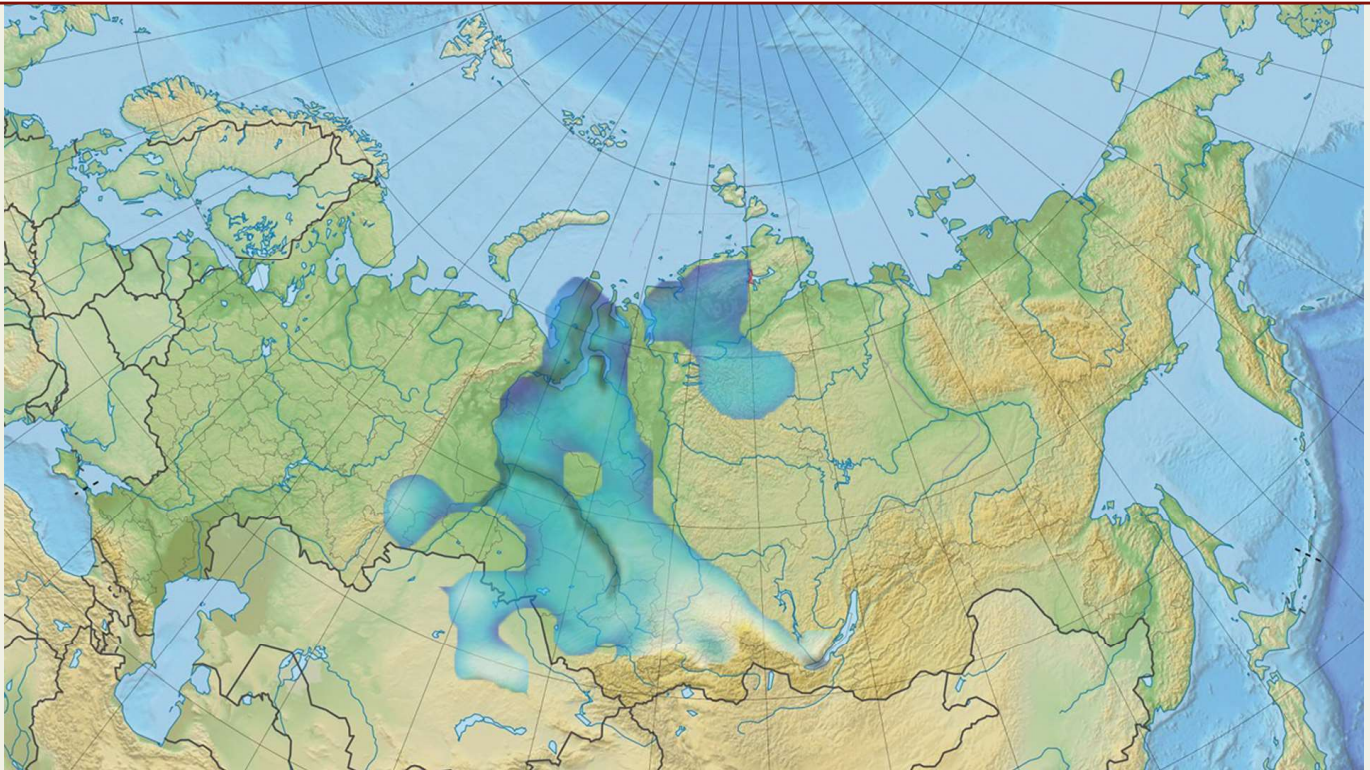
Slika 37.

Prikazuje kartu koja pokazuje regije s visokim brzinama propagacije seizmičkih valova, prikazane ljubičastom bojom, koje odgovaraju čvršćim i gušćim stijena, dok plava područja označavaju zone smanjenih brzina, sugerirajući prisutnost duktilnijeg ili rastopljenog materijala. Anomalije seizmičkih valova niske brzine koje odgovaraju zonama s većim udjelom tekućeg plašta istaknute su s dvije crvene strelice.

Izvor: 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*, 255, 104841.

<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104841>

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>

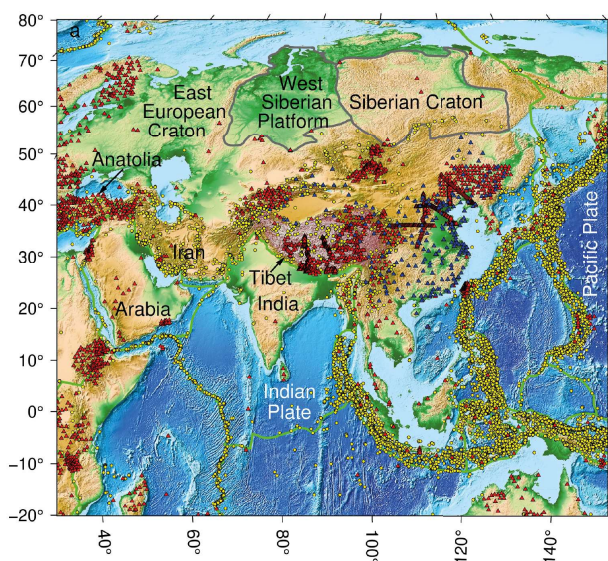


Slika 38.

Fizička karta Rusije koja prikazuje i prilagođava anomalije niskobrzinskih seizmičkih valova na temelju podataka Dou i sur., 2024. god.

Važno je napomenuti da se seizmotomografska analiza prikazana u studiji Dou i sur. (2024) za Sibir oslanjala na podatke s manje od 10 seizmičkih senzora (Sl. 39.), koji su svi postavljeni duž granica ploča, s gotovo nikakvom pokrivenošću unutar zapadnog i istočnog Sibira. Analiza je koristila

podatke iz svih javno dostupnih širokopojskih zapisa o potresima od 1994. do 4. rujna 2023. Za usporedbu, crveni trokuti na karti označavaju senzore korištene u analizi za Aziju, kojih ima tisuće.



Slika 39.

Prikazuje lokaciju senzora (crveni trokuti) korištenih u seizmičkoj tomografskoj analizi.

Izvor: 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>

Kineski istraživači u studiji iz 2023. godine potvrđuju da magmatska aktivnost trenutno topi i stanjuje koru ispod Sibira (Sl. 40.). Ovaj kontinuirani proces smanjuje čvrstoću litosferske ploče. Autori predstavljaju model električne vodljivosti plašta za sjevernu Aziju, izveden iz geomagnetskih podataka, koji naglašava veliku anomaliju vodljivosti unutar prijelazne zone plašta ispod Sibirskih trapa tijekom njihove erupcije. Ova anomalija se tumači kao toplinska nepravilnost s tragovima otopljenog materijala, povezana s permskom anomalijom u regiji (Sl. 41.).

Sveukupno, seizmotomografski modeli koji istražuju dubine od 40 do 110 km u Istočnosibirskom kratonu pokazuju različite

rezultate. Postoji jasan nedostatak seizmoloških podataka za Sibir, što ograničava točnost ovih modela.

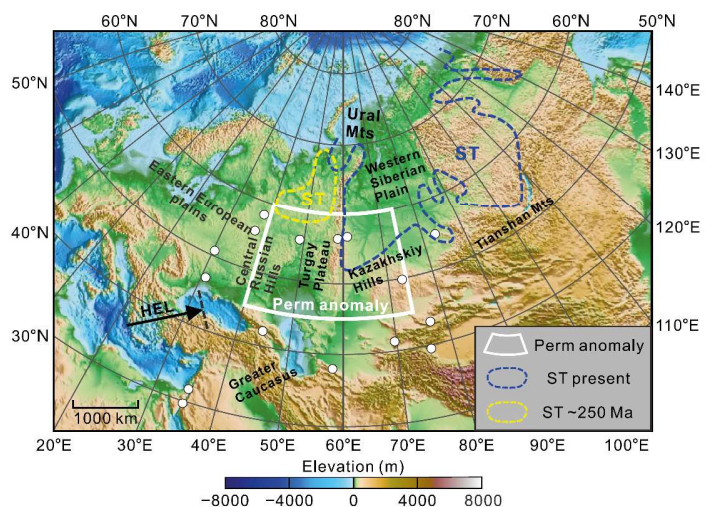
Moderni tomografski modeli temelje se na seizmičkim podacima prikupljenim tijekom dugog razdoblja—otprilike 30 godina. Iz perspektive klasičnih koncepata evolucije perjanica plašta, koja obuhvaća milijune godina, vremenski okvir od 30 godina smatra se izuzetno kratkim. Međutim, postojeći podaci ukazuju na to da su se tijekom ovog razdoblja dogodile značajne strukturne promjene u sibirskoj perjanici. Ova opažanja naglašavaju potrebu za revizijom trenutnih shvaćanja brzina razvoja perjanice plašta i metodologija koje se koriste za njihovo proučavanje.

Slika 40.

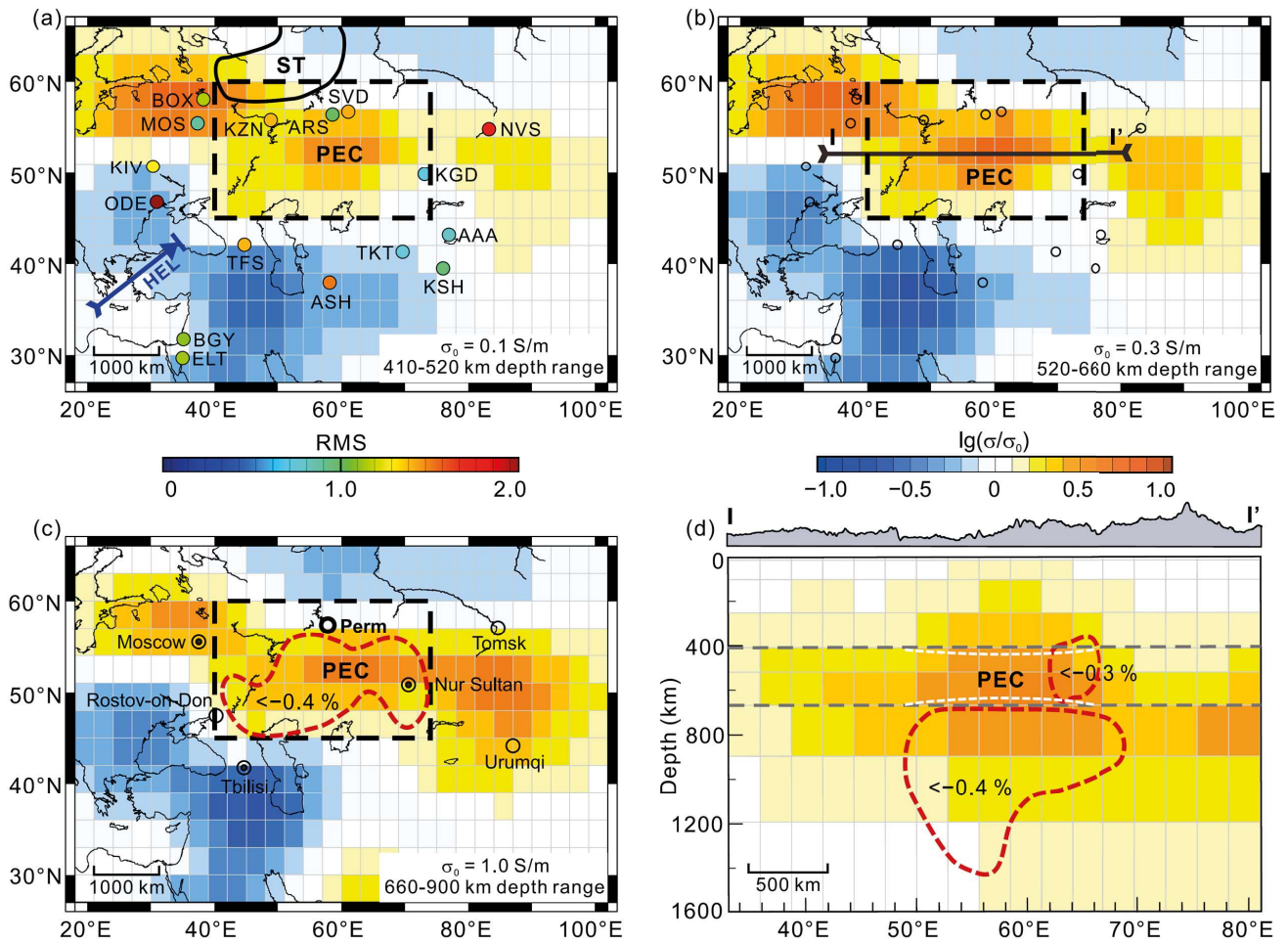
Bijele točke označavaju stanice čiji su C-odgovori korišteni u ovoj studiji. Raspon permske anomalije prikazan je kao zona označena bijelim linijama. Trenutna lokacija Sibirskih trapa označena je plavom bojom, dok su prethodne pozicije označene žutom bojom, s isprekidanim linijama.

Izvor: 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>



Slika 41.

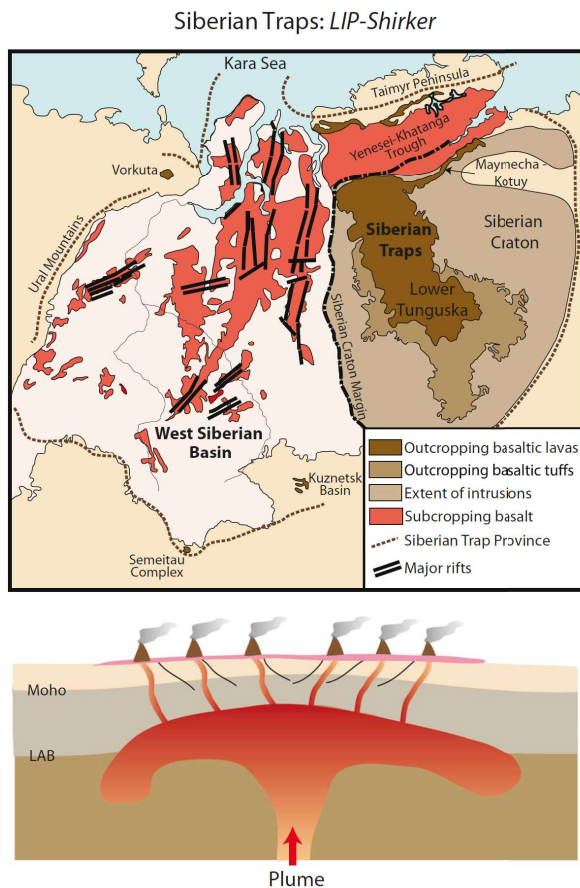
Znanstvenici s Jilinskog sveučilišta i Sveučilišta Shijiazhuang Tiedao koristili su geomagnetske podatke s 16 stanica u sjevernoj Aziji za izračunavanje električne vodljivosti plašta na različitim dubinama.

Otkrili su primjetno povećanje vodljivosti u odnosu na svjetski prosjek vodljivosti u regiji ispod Sibirskih trapa (žuta i smeđa područja na dijagramima). Istraživači su utvrdili da su ta područja na dubinama od 400 do 900 km u prosjeku 250 stupnjeva toplija od okolnog plašta. U tim područjima postoji udio rastopljenog plašta.

Izvor: 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>

Vrijedi napomenuti da su se prethodne erupcije prije 250 milijuna godina, na granici permskog i trijaskog razdoblja, također dogodile u ovoj regiji. Epicentar je bio

smješten ispod Istočnosibirskog kratona (ispod Putoranske visoravni), s izljevima koji su obuhvaćali i zapadni i istočni Sibir (Sl. 42.).



Slika 42.

Sibirske trape kao primjer Velike magmatske provincije.

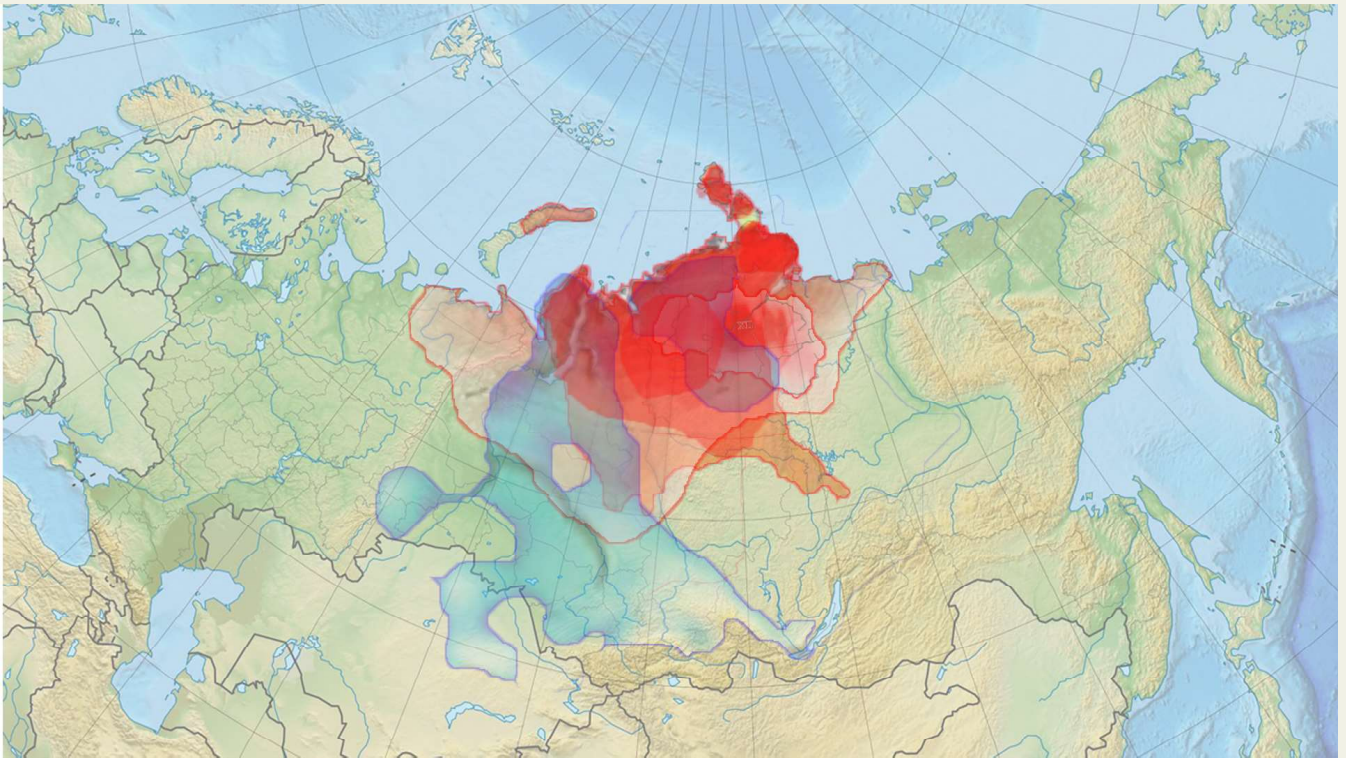
Karta prikazuje erupcije u zapadnom Sibiru (crveno) i trape u istočnom Sibiru (smeđe), koje su eruptirale prije 250 milijuna godina. Vrući materijal iz perjanice plašta se uzdigao i raširio ispod granice litosfere-as-tenosfere, formirajući strukturu u obliku gljive. To je dovelo do opsežne magmatske aktivnosti na području od otprilike 5 milijuna km². Utjecaj perjanice rezultirao je formiranjem zapadnosibirskog rascjepnog sustava, čija je aktivnost prestala otprilike 10 milijuna godina kasnije tijekom srednjeg trijasa.

Izvor: 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>

Lokalizacija magmatske perjanice

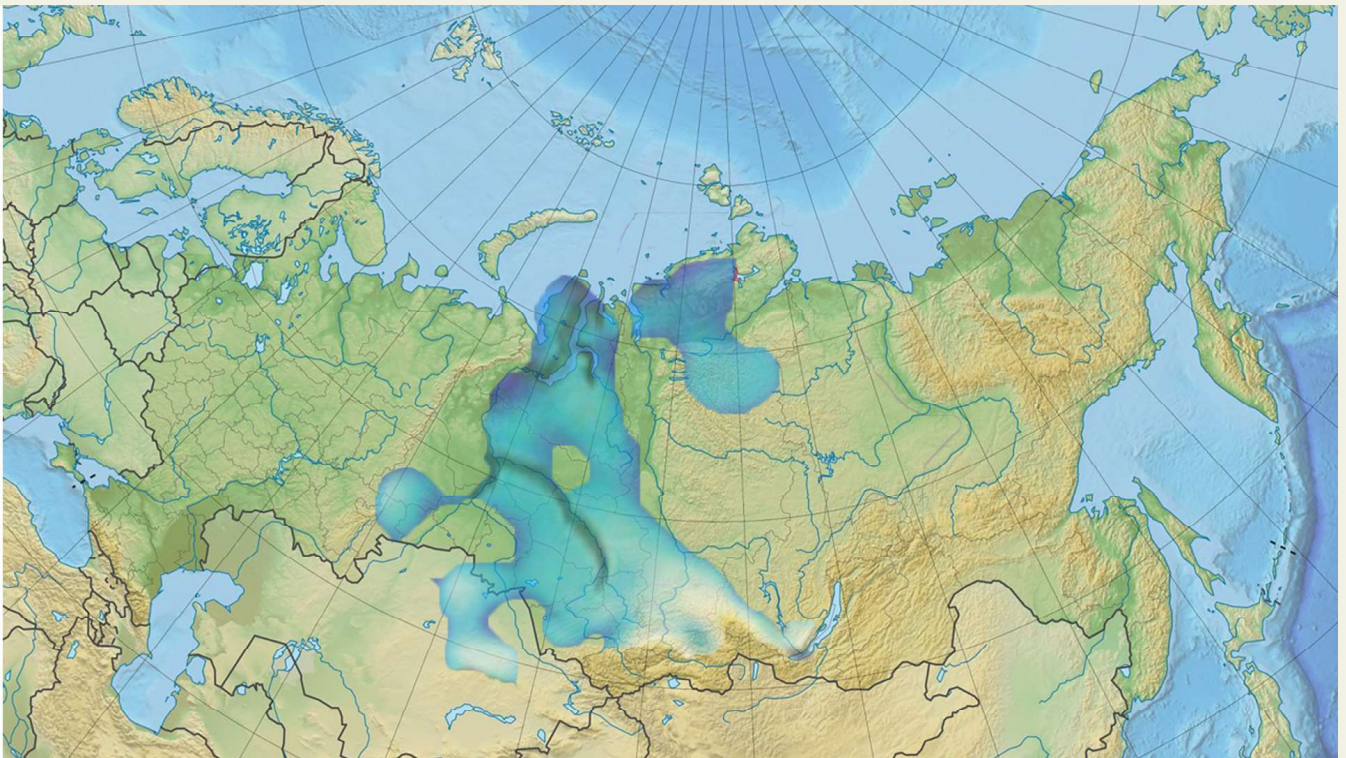
Sintezom analize anomalija temperature tla, dubine otapanja permafrosta, anomalija temperature u blizini površine, anomalija seizmičkih valova niske brzine u plaštu i

magnetske anomalije, moguće je identificirati trenutnu lokaciju i dimenzije sibirske perjanice (Sl. 43.).



Slika 43.

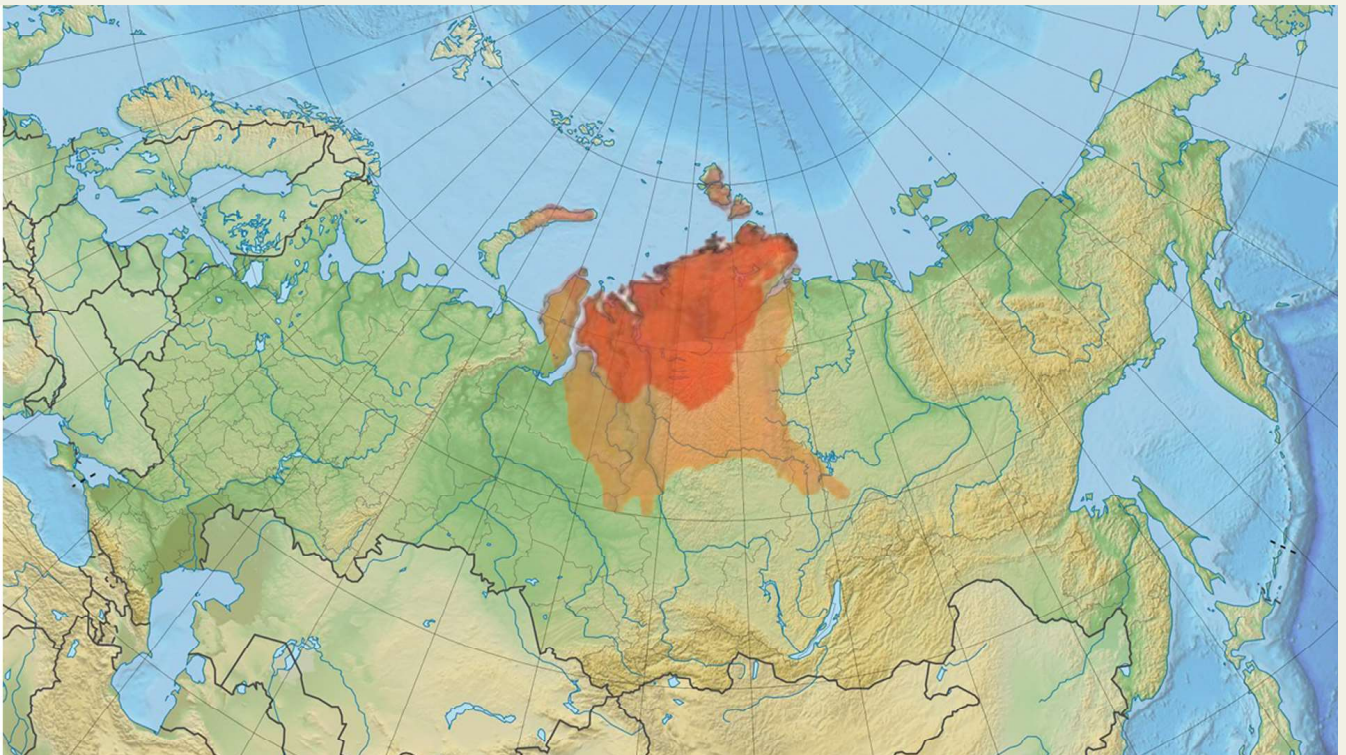
A. Kompozitna karta koja prikazuje ključne anomalije preko više parametara, detaljno opisane u nastavku:



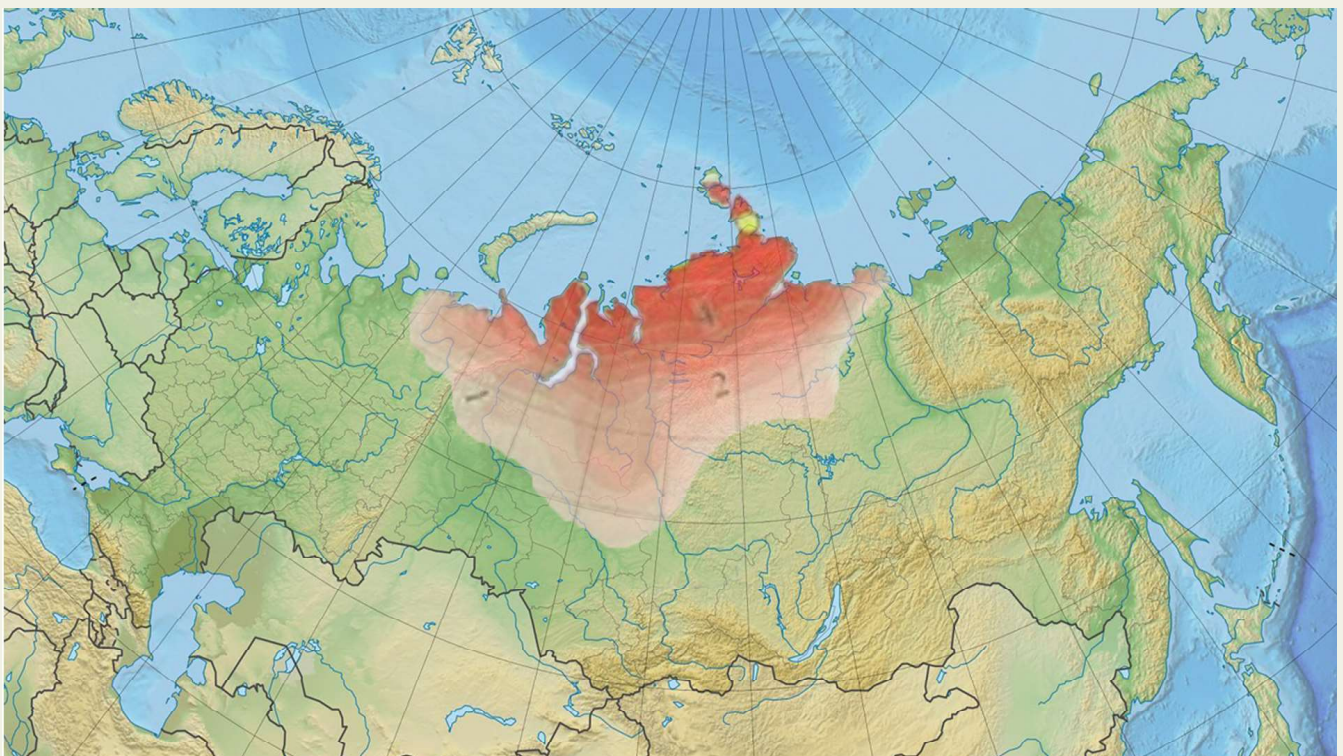
B. Karta anomalija niske brzine (indikativnih za više otopljenog materijala) na dubini od 110 km, temeljena na seizmičkoj tomografiji prema Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023)



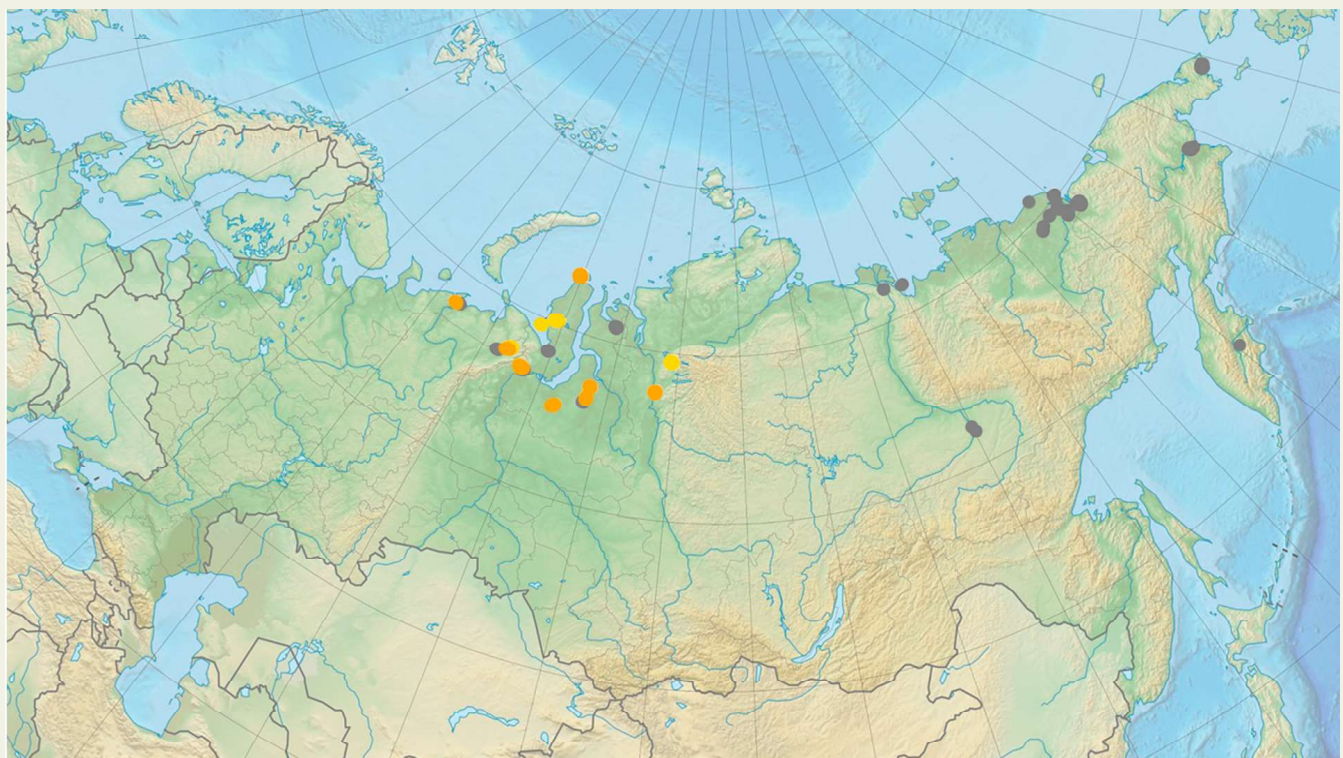
C. Nova anomalija zagrijavanja tla pri usporedbi trendova za razdoblja 1976.–2021. i 1976.–2023., prema podacima Roshydrometa, (2021, 2023).



D. Linearni trend prosječnih mjesečnih temperatura zraka za siječanj u razdoblju 2001.–2021., prema Sherstyukovu (2023).



E. Prosječna mjesečna temperatura od prosinca 2023. do veljače 2024.godine, prema Roshydrometu, (2024.)



F. Područja povećanja dubine sezonskog odmrzavanja u sloju permafrosta. Izvor podataka: <https://permafrost.su/>

Prema hipotezi, uzlazni dio perjanice nalazi se južno od poluotoka Gydan i Taimyr i ima više grana. Promjer glave perjanice procjenjuje se na 1.200–1.500 km, dok zona širenja magmatskog toka može doseći 2.500–3.000 km. Ovo područje obuhvaća strukture Zapadnosibirske ploče i Istočnosibirskog kratona.

Trenutno glava perjanice utječe na osnovu Istočnosibirskog kratona, šireći magmatske tokove ispod njegovog teritorija. Ovaj proces vjerojatno doprinosi povećanju seizmičke

aktivnosti uz rubove ploča, uključujući područja kao što su Bajkal i čak Ural. Uzrok takvih anomalija specifično u marginalnim dijelovima ploča je destabilizacija ploča zbog omekšavanja podloge astenosfere i blagog uzdizanja središnjeg dijela sibirskog bloka Zemljine kore, tj. tektonskih struktura Zapadnosibirske ploče i Istočnosibirskog kratona, zajedno s tektonskom strukturom Verkhoyansk-Chukotka naboranog sustava.

Povećanje Seizmičke Aktivnosti kao Pokazatelj Destabilizacije Tektonskih Ploča Zbog Aktivnosti Sibirske Magmačke Perjanice

Metodologija analize seizmičke aktivnosti uključivala je preuzimanje i posebnu obradu podataka dobivenih s web stranice Međunarodnog seizmološkog centra (ISC). Budući da podaci sadrže različite izvore iz različitih zemalja i istraživačkih instituta, kao i različite tipove magnituda (M_w, M_s, M_b, M_L, M_D, itd.), izveden je određeni algoritam obrade podataka za odabir odgovarajuće vrste magnituda iz različitih izvora (vidi Prilog 1). Glavna ideja algoritma obrade bila je odabrati srednju vrijednost među najčešćim vrstama magnituda za svaki od događaja, budući da su za svaki događaj različiti izvori prijavili različite tipove magnituda i vrijednosti u ISC bazu podataka. U prosjeku, ova obrada dovodi do malog smanjenja magnitude u odnosu na maksimalnu prijavljenu vrijednost, ali, kako je pokazalo iskustvo, algoritam temeljen na medijani proizvodi rezultate koji se dobro slažu s Gutenberg-Richterovim zakonom i drugim

obrascima, te se dobro slaže s podacima iz drugih seizmoloških izvora kao što su IRIS i USGS.

Podaci dobiveni putem algoritma filtrirani su prema vrstama događaja u ISC bazi podataka (vidi Dodatak 1) kako bi se isključili događaji uzrokovani ljudskim aktivnostima tijekom rudarskih operacija: eksplozije, sumnjive eksplozije, pucanja stijena itd. Također, budući da postoji mnogo rudarskih poduzeća diljem Rusije, ISC baza podataka je uspoređena s podacima iz Jedinствене геофизичке службе Руске академие знаности⁴⁴ od siječnja 2025. godine, koja navodi sve poznate eksplozije i pucanja stijena u Rusiji. Ovi događaji su također isključeni kako bi se osiguralo da rezultirajući skup podataka ne sadrži događaje koji se mogu pripisati eksplozijama.

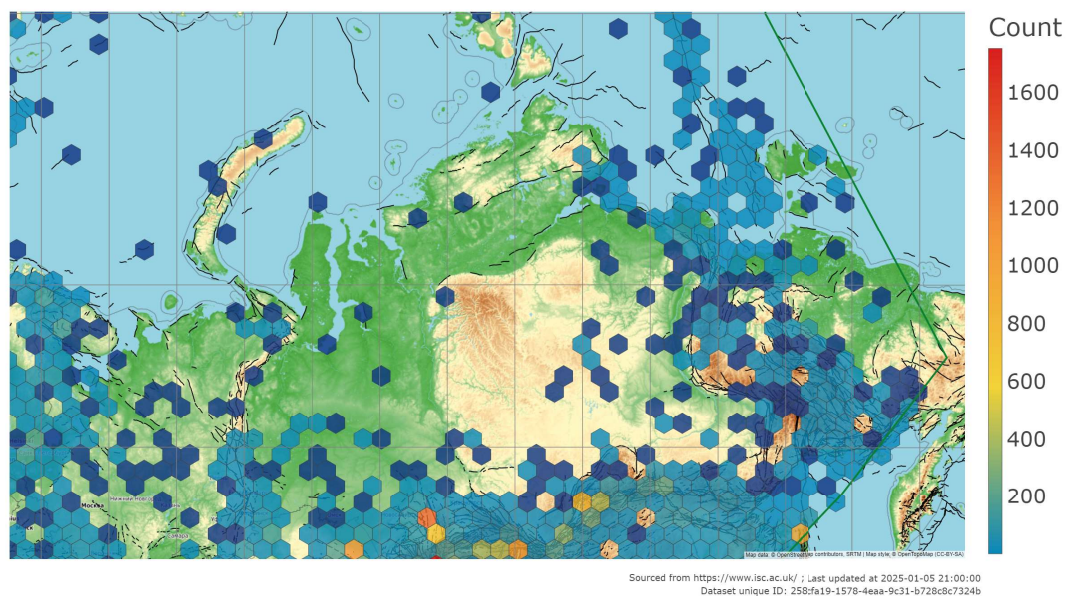
⁴⁴Federal Research Center, Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences <http://www.ceme.gsras.ru/zr/contents.html>

Sada razmotrimo rezultate analize podataka u regiji uzdizanja magmatske perjanice i perifernih područja glavnih tektonskih blokova koje on izravno zahvaća. Budući da se sibirski kraton smatra relativno stabilnom, aseizmičkom platformom, čak bi se i mali broj potresa unutar njegovih granica smatrao anomalijom.

Na Sl. 44. prikazana je gustoća raspodjele potresa na teritoriju Rusije. U području Sibira najveća koncentracija potresa uobičajeno se

opaža u naboranim područjima: Verhojanskog grebena na istoku, duž grebena Gakkela na sjeveru, Uralskih planina na zapadu, u Altajsko-Sajanskoj regiji na jugu. Pojedinačni događaji prisutni su i na samom teritoriju Sibira: nekoliko potresa magnitude oko 4,0 zabilježeno je južnije od poluotoka Taimyr. Razmotrimo detaljnije dinamiku potresa na lokalnim područjima u regiji sibirske perjanice i susjednim regijama.

Gustoća potresa M3+ na teritoriju Sibira

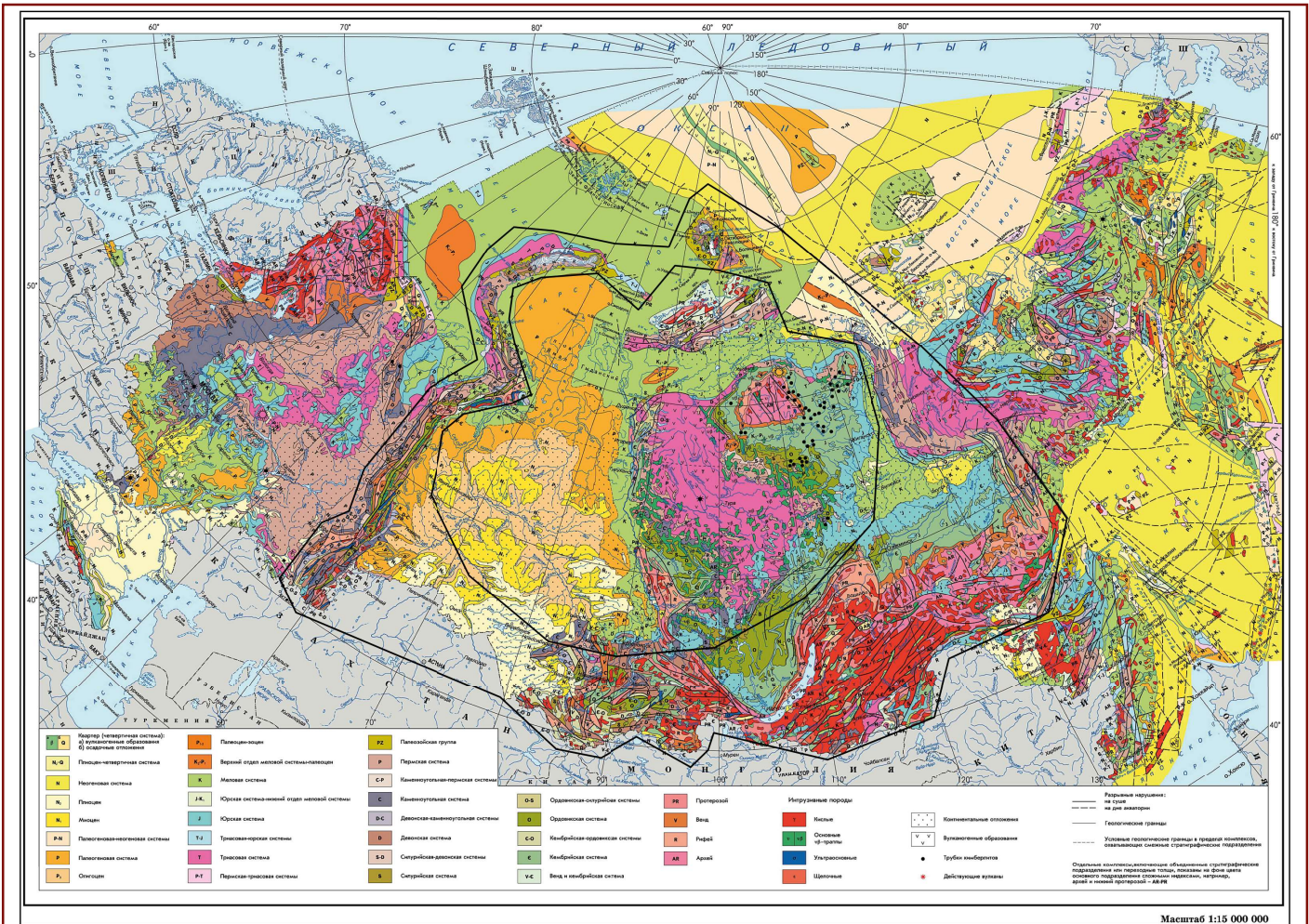


Slika 44.
Gustoća potresa magnitude M3+ u Sibiru od 1990. do 2024.

Izvor: ISC baza

Na temelju geoloških struktura, identificirana su područja u kojima perjanica plašta može imati različite utjecaje (Sl. 45.). Odabrano je područje same perjanice, gdje učinak može biti povezan s intruzijom i pritiskom magme te fluidne faze

(magnatski plinovi). Na rubnim dijelovima istočnosibirske platforme i zapadnosibirske ploče, utjecaj perjanice na seizmičnost vjerojatno je uzrokovan destabiliziranim položajem gustih blokova Zemljine kore.



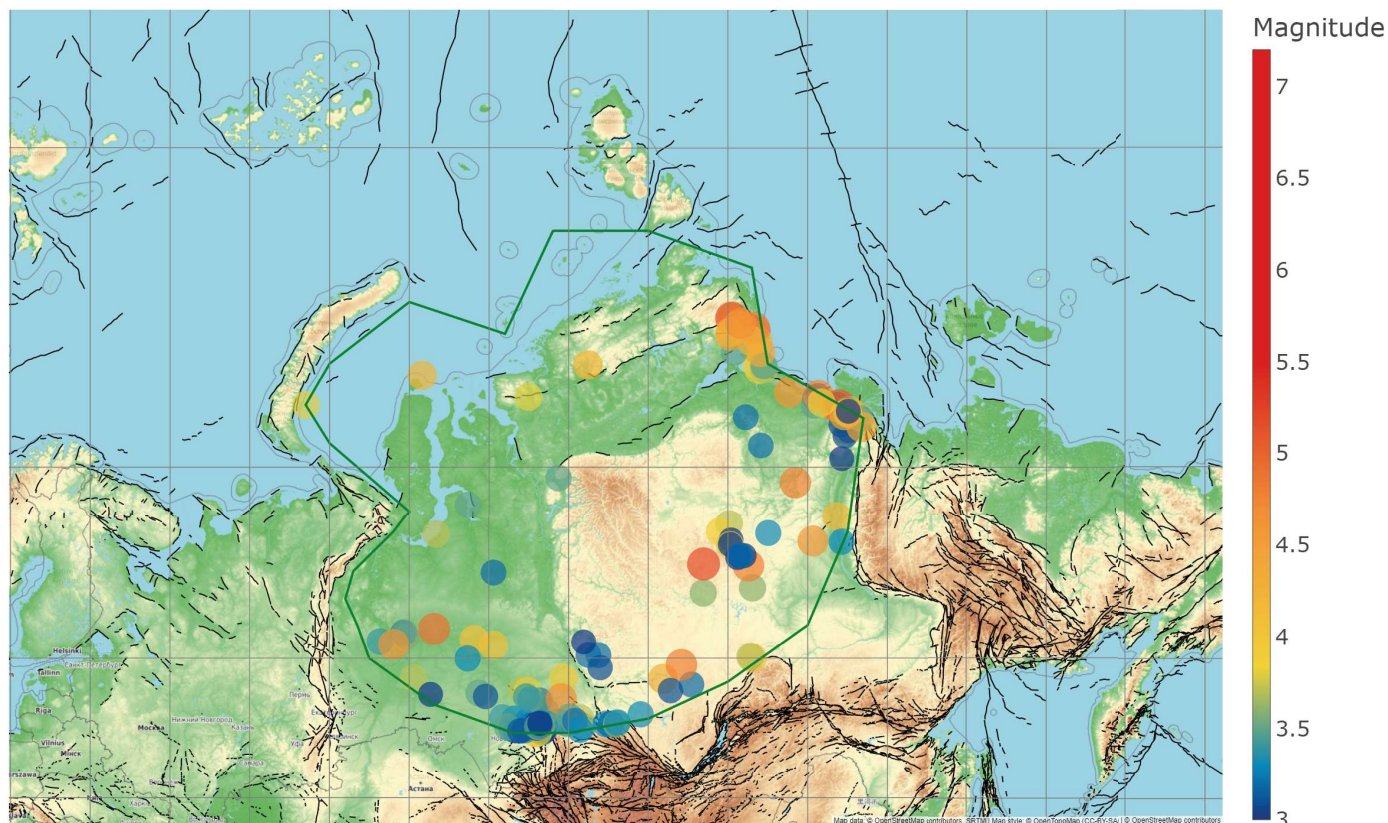
Слика 45.

Područje ocrtno geološkim strukturama u području intruzije i lateralnog širenja sibske perjanice (unutarne crno područje) za analizu seizmičnosti. Vanjsko crno područje odgovara području marginalnih učinaka pritiska sibske perjanice na ploče.

Detaljnije ćemo ispitati potrese u središnjoj regiji sibske perjanice. Sl. 46. prikazuje kartu koja prikazuje distribuciju potresa magnitude 3.0 i više. Potresi su zabilježeni u južnom području poluotoka Taimyr. Posebno zabrinjavaju dva nedavna potresa koja su se dogodila u ovoj regiji u kolovozu i rujnu 2024. godine, s magnitudama od 3.5 i 3.8. Slične magnitude zabilježene su u južnom dijelu poluotoka Gydan

(M3.5) i na poluotoku Yamal (M3.7 i M4.2) na dubini od 10 km. Ovi potresi zabilježeni su u zoni koja odgovara lokalizaciji glave sibske perjanice, što je alarmantni trend koji će biti dalje objašnjen.

Potresi M3+, područje sibirske perjanice



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

Slika 46.

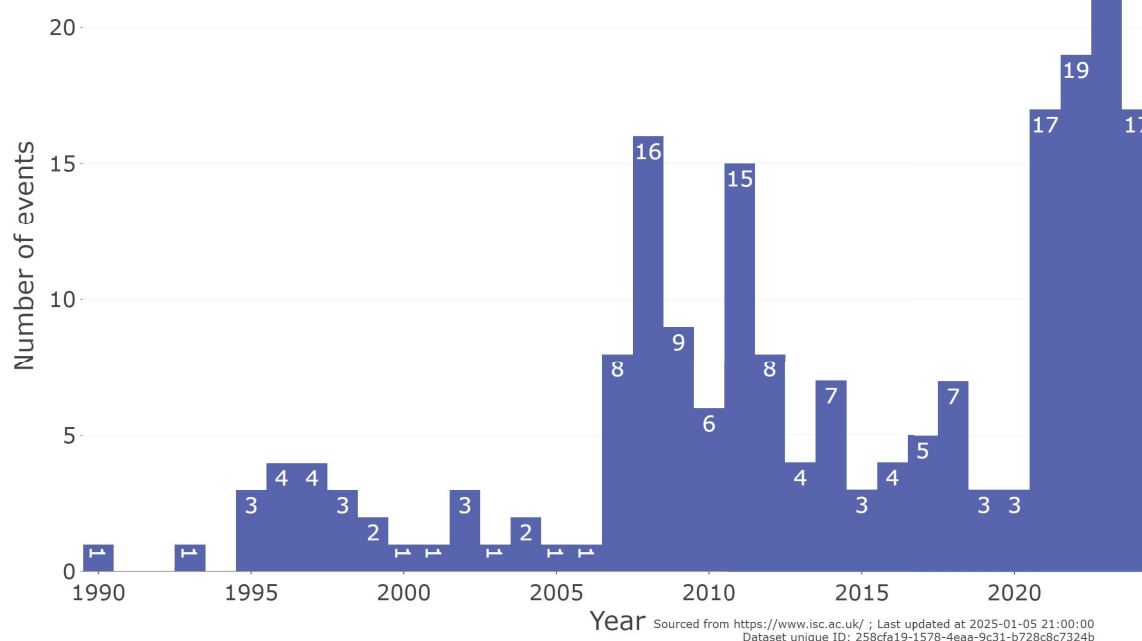
Karta potresa magnitude M3.0+ u području sibirske perjanice od 1990. do 2024.

Baza podataka: ISC.

U istaknutom području sibirske perjanice zabilježeno je ukupno 205 potresa magnitude M3.0+ u razdoblju od 1990. do 2024. Povećanje broja potresa zabilježeno je 1995. godine (Sl. 47.), u skladu s globalnim trendom povećane seizmičke aktivnosti 1995. godine povezane s rastućom magmatskom aktivnošću. Od 2007. godine došlo je do značajnog porasta broja potresa, nakon čega je uslijedio postupan

pad seizmičke aktivnosti. Od 2021. godine broj potresa ponovno je naglo porastao, nadmašivši prethodne godišnje razine. Tako se u području sibirske perjanice primjećuje valoviti rast seizmičke aktivnosti. Posljednjih godina zabilježeno je znatno više događaja nego što je to bilo uobičajeno za ovo područje u prošlosti.

Potresi M3+, područje sibirske perjanice



Slika 47.

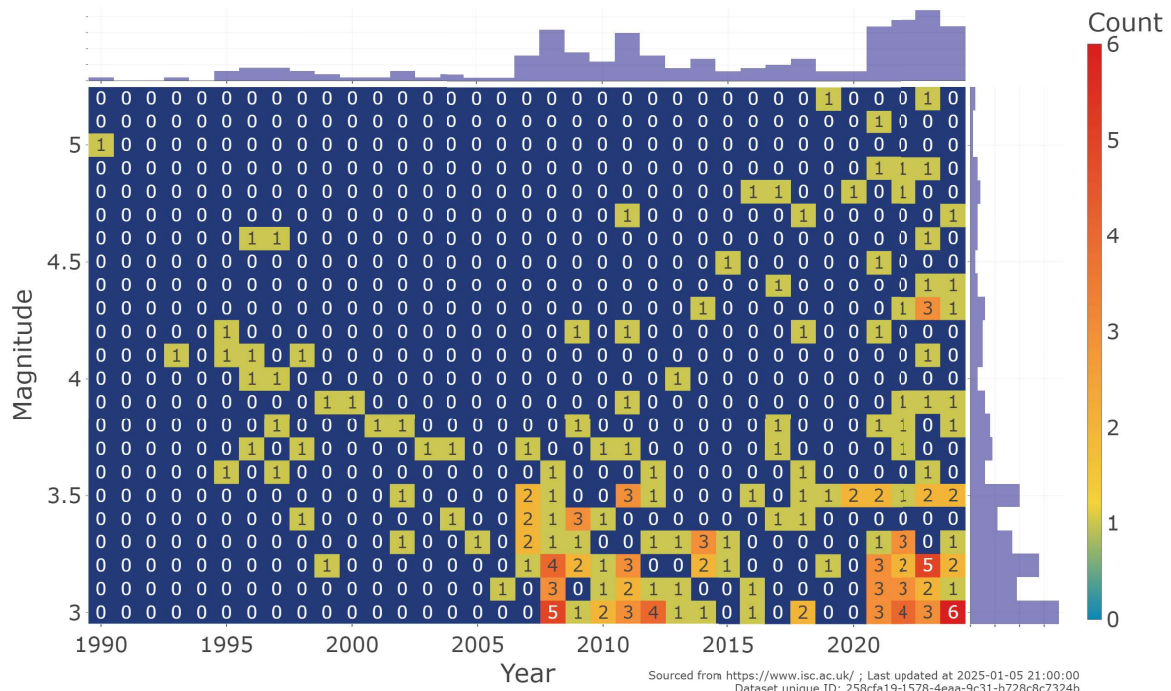
Broj potresa magnituda M3.0+ u području sibirske perjanice od 1990. do 2024.

Baza podataka: ISC.

Nakon potresa magnituda M5.0 iz 1990. godine, zabilježen je postupni pad magnituda i broja potresa (Sl. 48.). U razdoblju od 1990. do 2007. registrirana su samo tri potresa magnituda iznad M4.5. Od 2007. godine došlo je do postupnog porasta magnituda potresa. Po prvi put u povijesti zabilježeni su potresi

magnituda M5.1 i M5.2 počevši od 2019. godine. Svi potresi magnituda M4.5+ nalaze se na periferiji perjanice (Sl. 49.), pri čemu su neki zabilježeni u stabilnim područjima gdje ne postoje poznati rasjedi.

Potresi M3+, područje sibirske perjanice

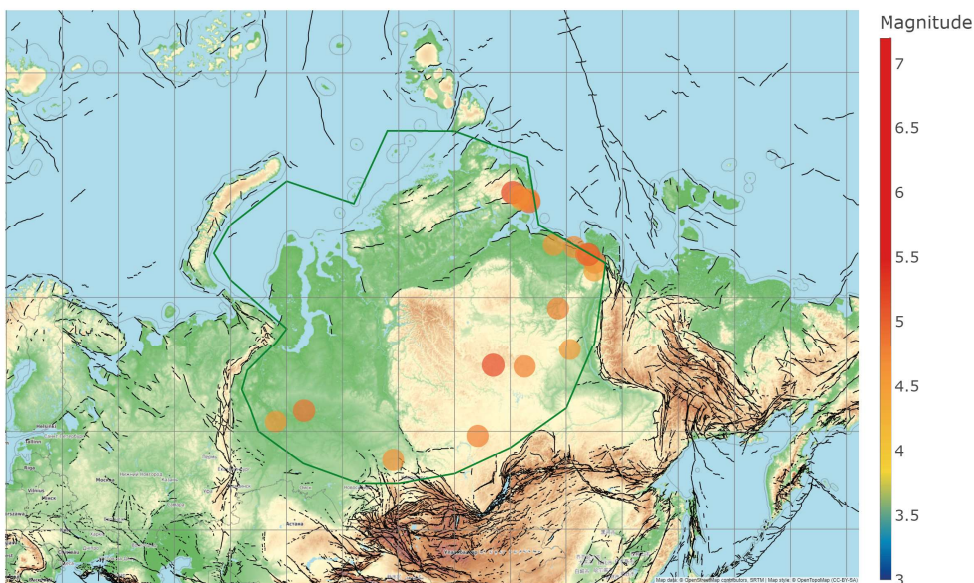


SI. 48.

Distribucija potresa koji su se dogodili u području sibirske perjanice od 1990. do 2024. prema magnitudi.

Izvor podataka: ISC.

Potresi M4.5+, područje sibirske perjanice



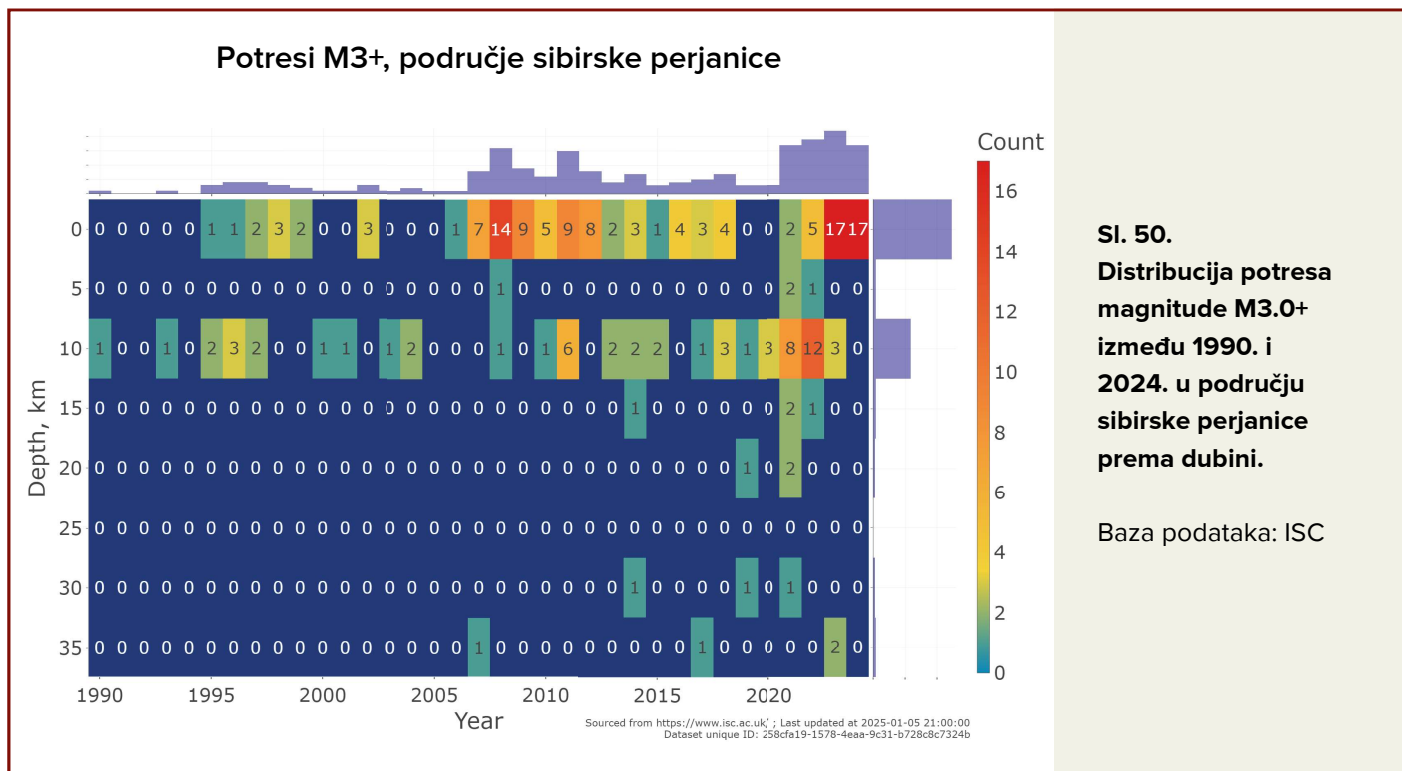
SI. 49.

Karta potresa magnitute M4.5+ u području sibirske perjanice od 1990. do 2024.

Izvor podataka: ISC.

Iste godine, 2007., po prvi put je zabilježen potres magnitude 3.7 na dubini od 33 km blizu Moho granice (Sl. 50.). Nakon 2014. godine, potresi u bazi kore, na dubinama od 30–35

km, počeli su se događati značajno češće, s magnitudama blizu 5.0. Svi ovi potresi nalaze se duž periferije pretpostavljene perjanice.



Sl. 50.
Distribucija potresa
magnituda M3.0+
između 1990. i
2024. u području
sibirske perjanice
prema dubini.

Baza podataka: ISC

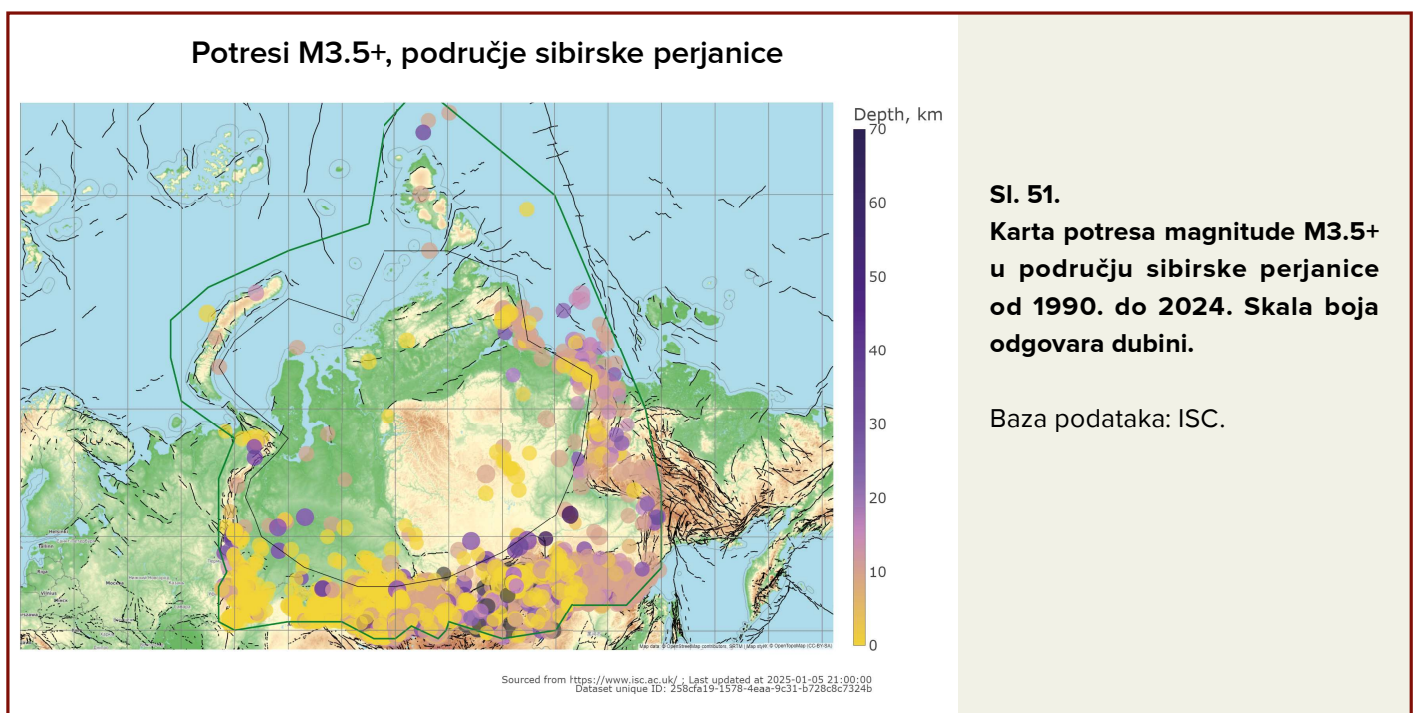
Analiza potresa u području pretpostavljene sibirske perjanice pokazuje valovito povećanje seizmičnosti: broj potresa raste, njihove magnitude se povećavaju, a događaju se na većim dubinama. To ukazuje na deformacijske procese ploče pod ogromnim pritiskom magme odozdo. Progresija ovih procesa neizbježno će dovesti do erupcije sibirske perjanice u bliskoj budućnosti iz sljedećih razloga.

Temelj istočnosibirskog kratona cementiran je magmatskim i metamorfnih stijenama, tvoreći gustu, monolitnu koru oblikovanu erupcijama koje su se dogodile prije 250 milijuna godina.

Pojava jakih potresa s magnitudama od 7.0 i više u ovoj regiji ukazivala bi na to da platformne strukture sibirskog kratona prolaze kroz deformacije koje prelaze granice čvrstoće stijena. Da bismo ilustrirali kako bi se monolitni sibirski kraton mogao slomiti pod pritiskom perjanice, zamislite kako staklo počinje pucati neposredno prije nego što se potpuno razbije. Stoga, pojava jakih potresa u ovoj regiji mogla bi signalizirati početak prodora perjanice na površinu u doslovno jednom danu.

Trenutno, kako bi se razumjela stvarna situacija s napredovanjem perjanice i čvrstoćom Zemljine kore u području sibirске magmatske perjanice, izuzetno je važno instalirati dodatne seizmičke senzore, po mogućnosti u bušotinama nekoliko kilometara dubokim. To će omogućiti detaljnu seizmičku tomografsku analizu Zemljine kore i plašta te omogućiti kontinuirano praćenje položaja i aktivnosti perjanice (vidi odjeljak „Planirano i kontrolirano otplinjavanje”).

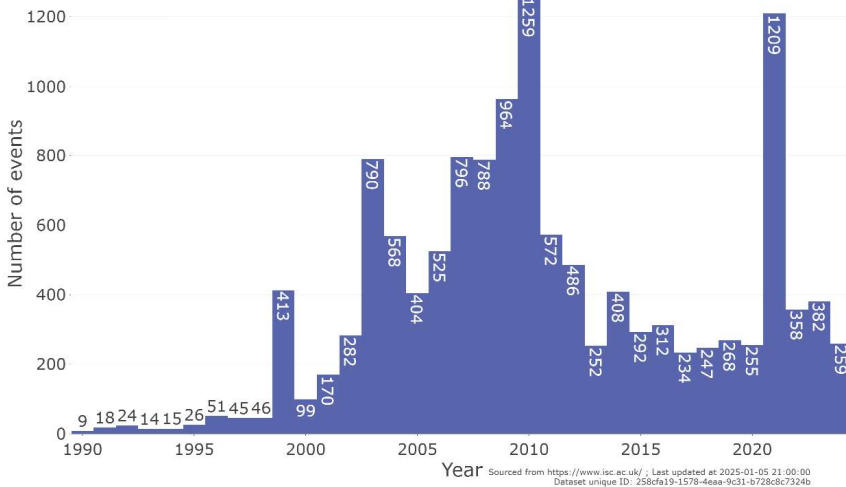
Pažnja treba biti posvećena distribuciji potresa prema dubini u području sibirске perjanice i njezinim perifernim zonama (Sl. 51.). Potresi na dubinama blizu Moho granice (više od 30 km) i u plaštu uglavnom se javljaju u naboranim regijama, i očito ocrtavaju pretpostavljenu lokaciju sibirске perjanice.



Razmotrimo seizmičku aktivnost posebno u perifernim dijelovima sibirске perjanice. Geološki, ova područja pripadaju naboranim pojasevima i seizmički aktivnim regijama, gdje seizmičnost može biti uzrokovana i tektonskim pokretima i utjecajem magmatske perjanice. Grafikon broja potresa pokazuje mješovitu sliku preklapanja čimbenika seizmičnosti (Sl. 52.). Značajni skokovi u seizmičkoj aktivnosti vidljivi su u nekim godinama. Za bolje razumijevanje prirode ovih procesa, svaku regiju treba razmatrati pojedinačno.

Analiza Verhojanskih naboranih struktura i rasjednih zona na dnu Laptevskog mora (Sl. 53.) otkriva značajne poraste broja potresa magnitude M3+ tijekom godina 2013. i 2021.-2022. (Sl. 54.). Takvi skokovi karakteristični su za faze intruzije magme, koje uzrokuju značajne poremećaje u integritetu Zemljine kore i oslobađanje tekućeg sadržaja kroz pukotine u stijenama i obližnje rasjede. Ovi fenomeni često su praćeni porastom broja potresa niske magnitude, pojavom rojeva potresa i ponekad čak serijom rojeva.

M3+ potresi u rubnim dijelovima sibirске perjanice

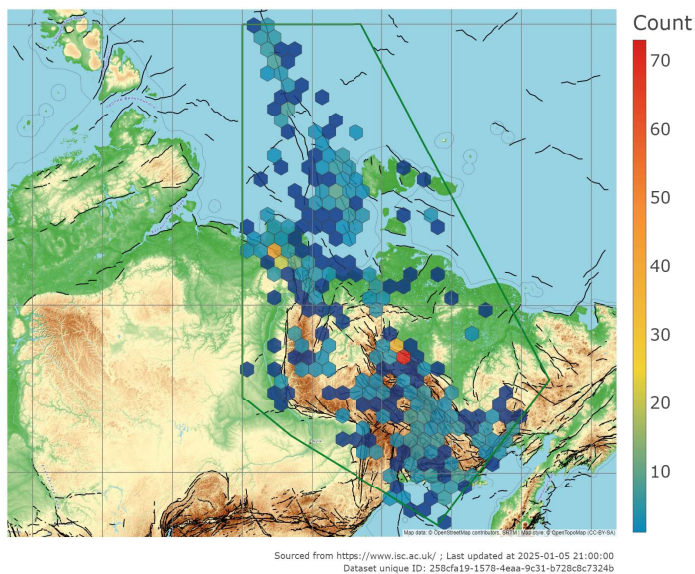


Slika 52.

Broj potresa magnitude M3.0+ u perifernim područjima sibirске perjanice od 1990. do 2024. Potresi unutar perjanice su isključeni (Sl. 47.).

Izvor podataka: ISC.

Potresi M3+ u rubnim dijelovima sibirске perjanice

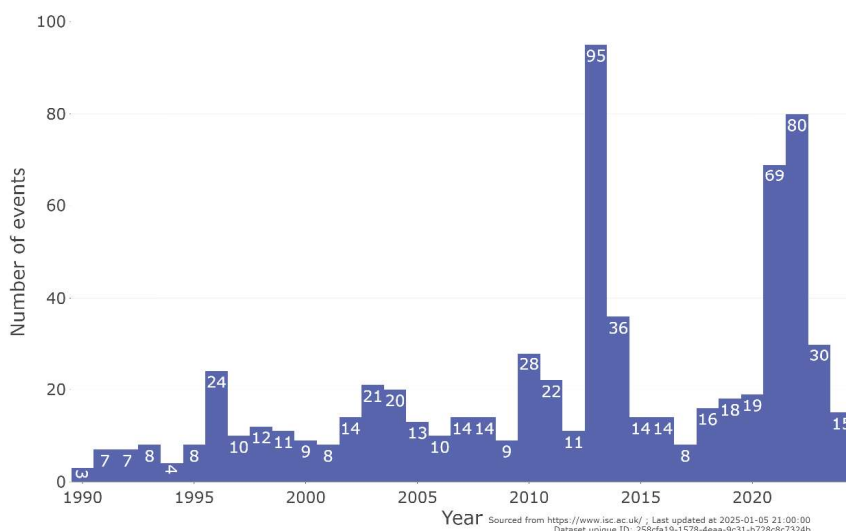


Slika 53.

Gustoća potresa M3+ u odabranom dijelu na sjeveroistočnom rubu sibirске kore od 1990. do 2024. Linije rasjeda označene su crnom bojom.

Izvor: ISC baza podataka.

Potresi M3+ u rubnim dijelovima sibirске perjanice



Slika 54.

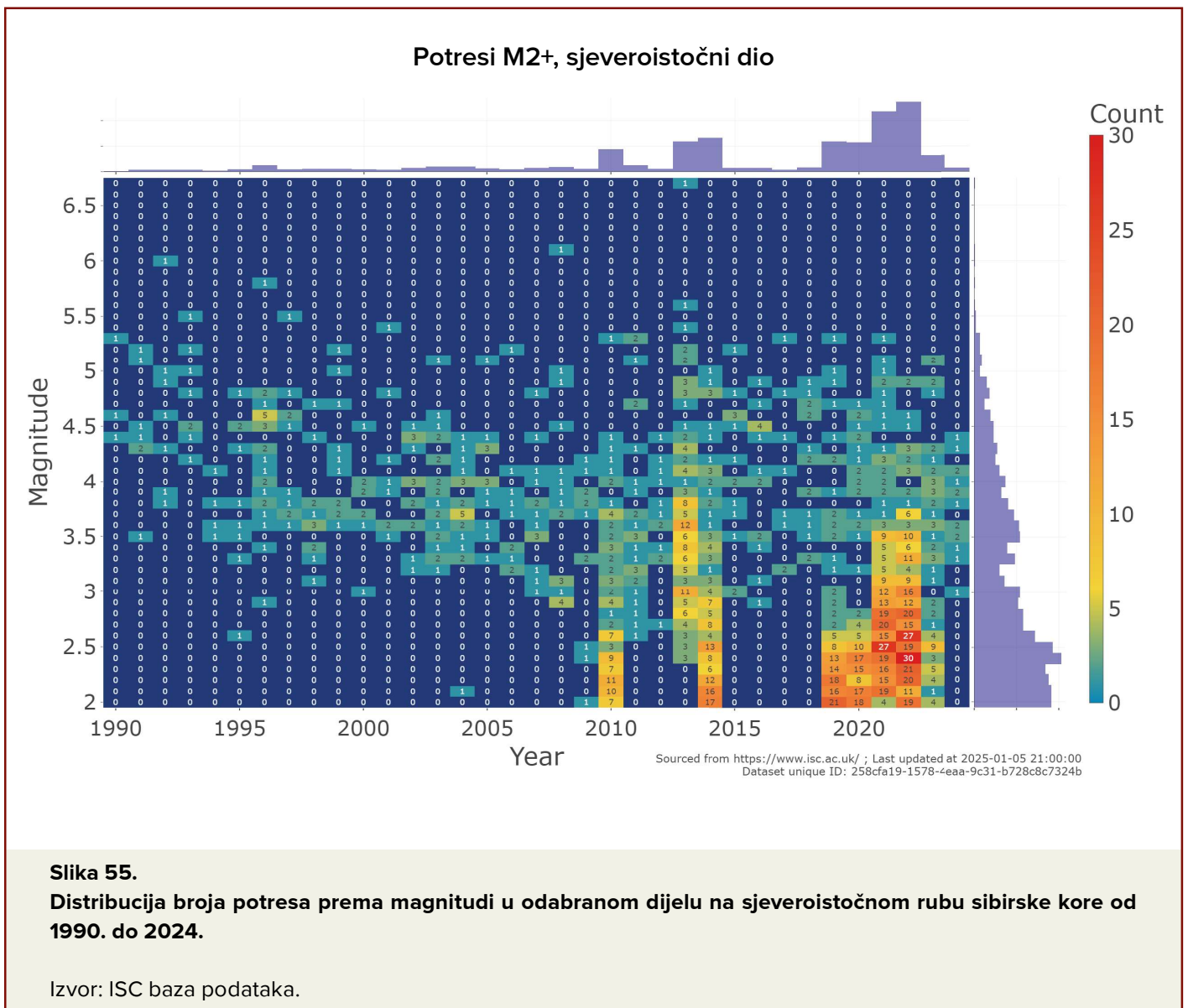
Grafikon broja potresa magnitude M3+ u odabranom dijelu na sjeveroistočnom rubu sibirске kore od 1990. do 2024.

Izvor: ISC baza podataka.

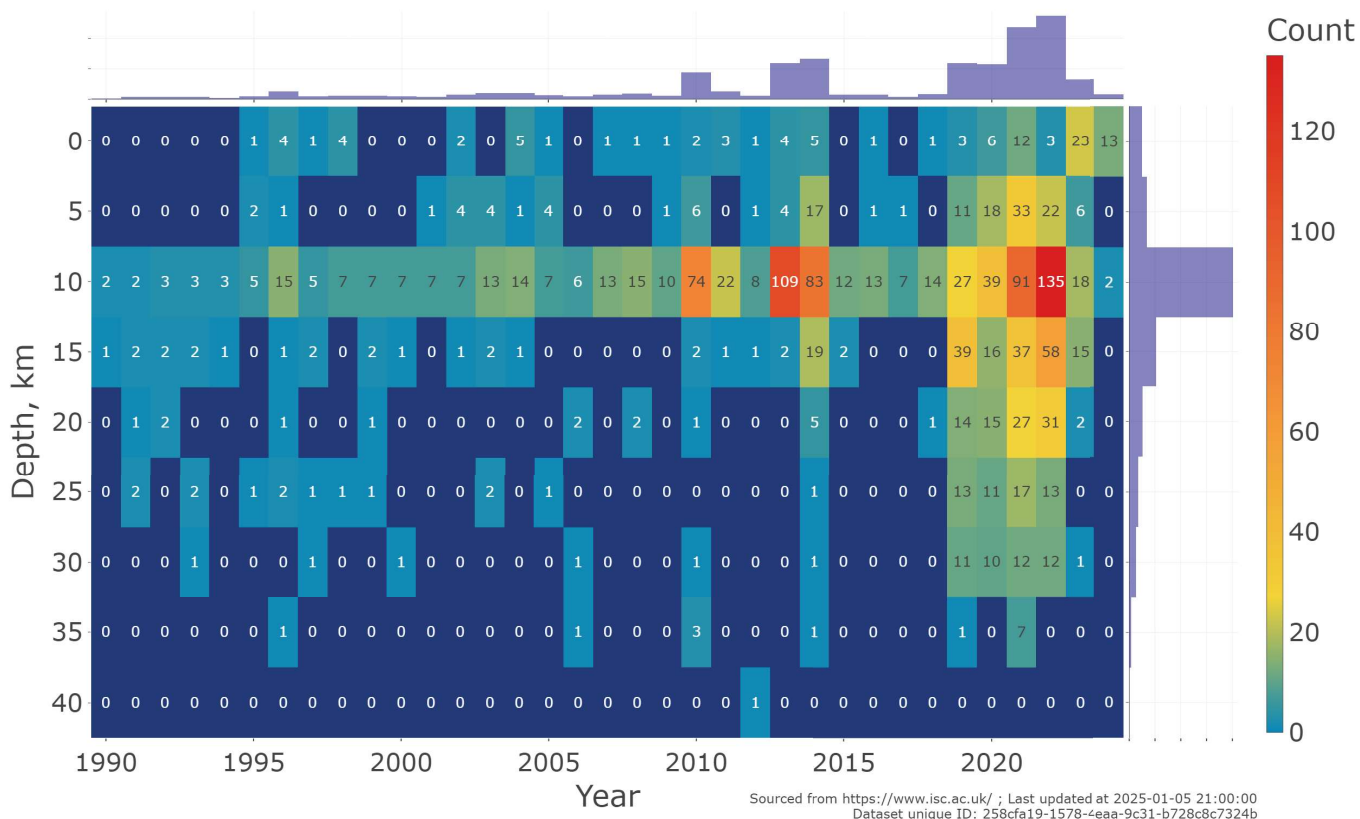
Analiza magnituda potresa u ovoj zoni otkriva skok broja potresa s magnitudama od 2 do 3.5 u 2010., 2013.-2014. i značajan porast od 2019. nadalje (Sl. 55.). Od 2019. godine također je zabilježen značajan porast broja potresa koji pogađaju Zemljinu koru gotovo do njene baze, na dubinama do 35 km (Sl. 56.). U 2013. godini, regija je doživjela svoj prvi potres magnitude

6.7, što jasno ukazuje ili na produženu fazu nakupljanja pritiska ili oslobađanje nakupljenih magmatskih fluida.

Grupa potresa u jugoistočnom smjeru od poluotoka Taimyr (Sl. 57.) trebala bi se pregledati zasebno.



Potresi M2+, sjeveroistočni dio

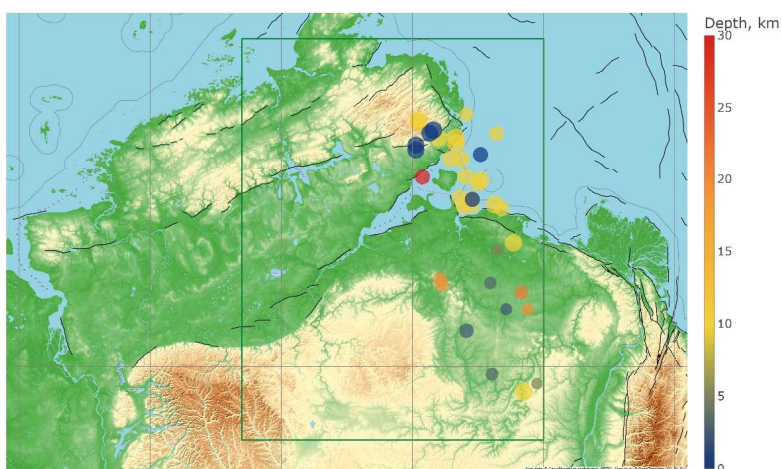


Slika 56.

Distribucija potresa magnitude M2+ prema dubini u odabranom dijelu na sjeveroistočnom rubu sibirske kore od 1990. do 2024.

Izvor: ISC baza podataka.

Potresi M2+, sjeveroistočno od poluotoka Taimyr



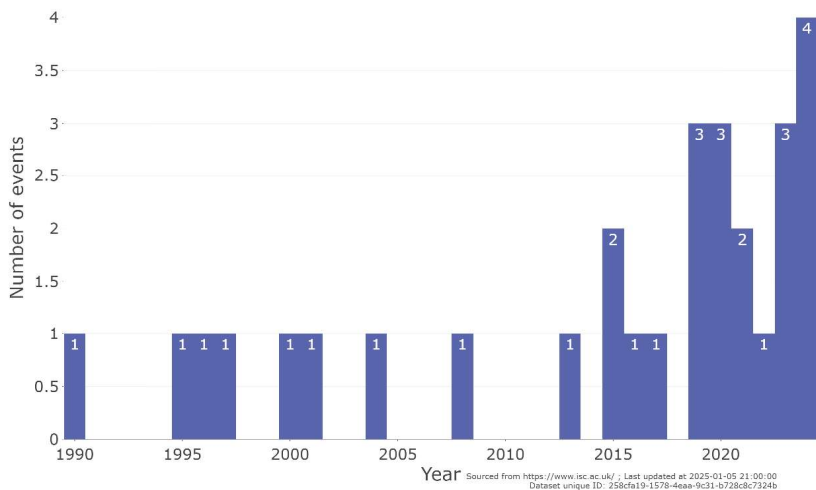
Slika 57.

Karta distribucije potresa magnitude M2+ u odabranom području sjeveroistočno od poluotoka Taimyr od 1990. do 2024.

Izvor podataka: ISC

U razdoblju 2019.-2020. ovo područje također je doživjelo porast seizmičke aktivnosti niskih do umjerenih magnituda (Sl. 58., 59.).

Potresi M3+, sjeveroistočno od poluotoka Taimyr

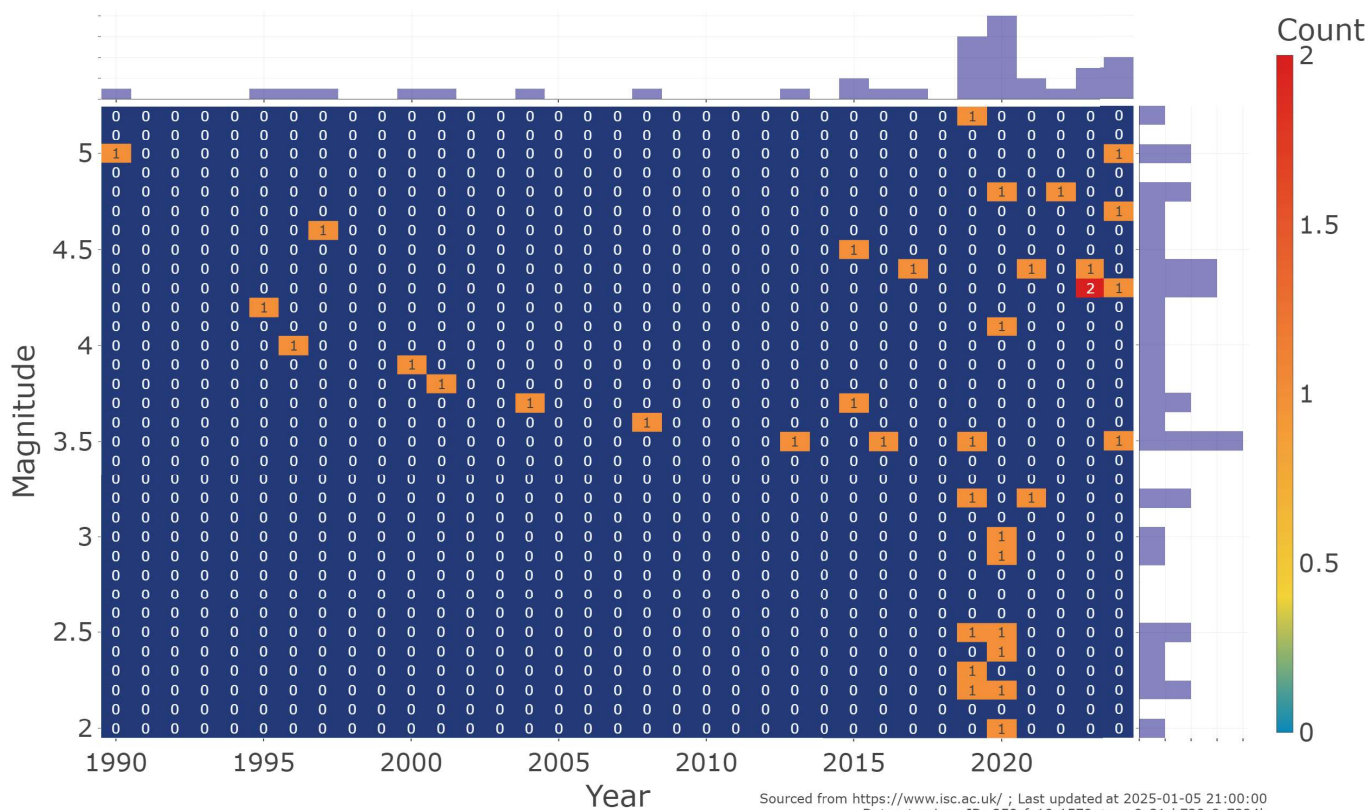


Slika 58.

Grafikon broja potresa magnitude M3+ u odabranom području sjeveroistočno od poluotoka Taimyr.

Izvor podataka: ISC.

Potresi M2+, sjeveroistočno od poluotoka Taimyr



Slika 59.

Distribucija broja potresa prema magnitudi u odabranom području sjeveroistočno od poluotoka Taimyr od 1990. do 2024.

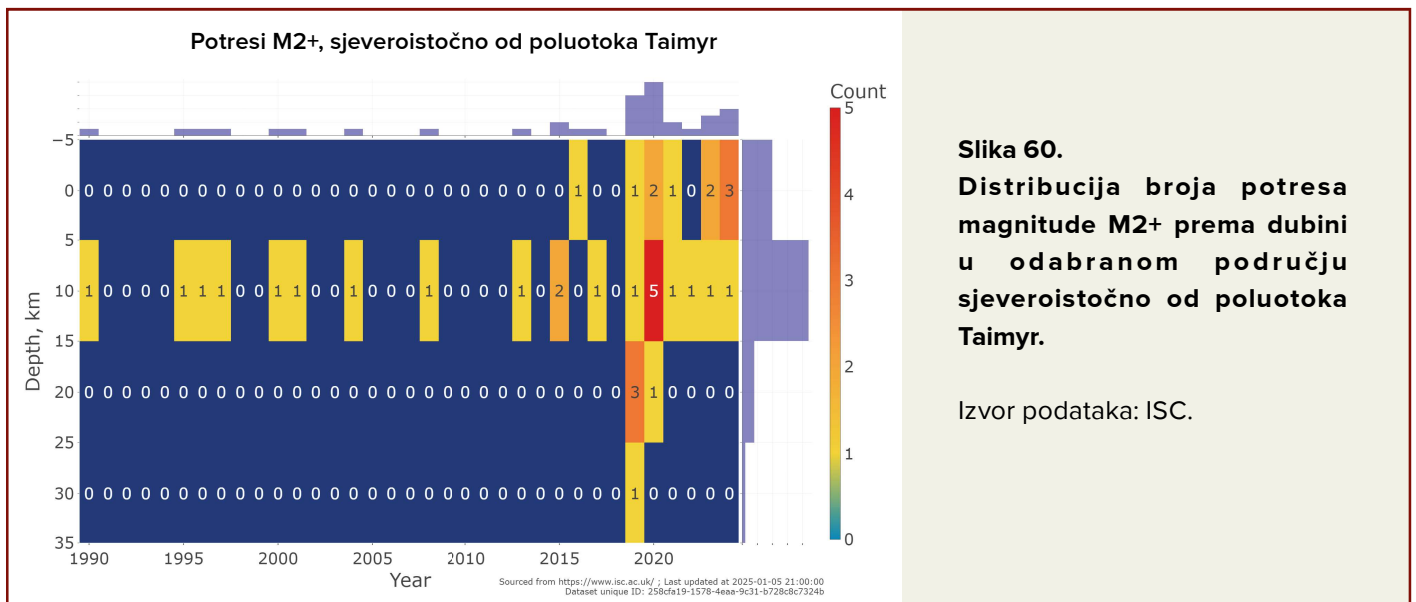
Izvor podataka: ISC

Između 2019. i 2020. primjetan je porast dubine potresa koji dosežu dno kore (Sl. 60.) tijekom istih razdoblja kao i kod područja Verhojanskih naboranih struktura.

Treba naglasiti da je ova zona pod utjecajem vrha sibirske perjanice. Unatoč relativno malom broju potresa, područje pokazuje sličan trend povećanja dubine i učestalosti potresa kao kod Verhojanskih naboranih struktura, ali počevši

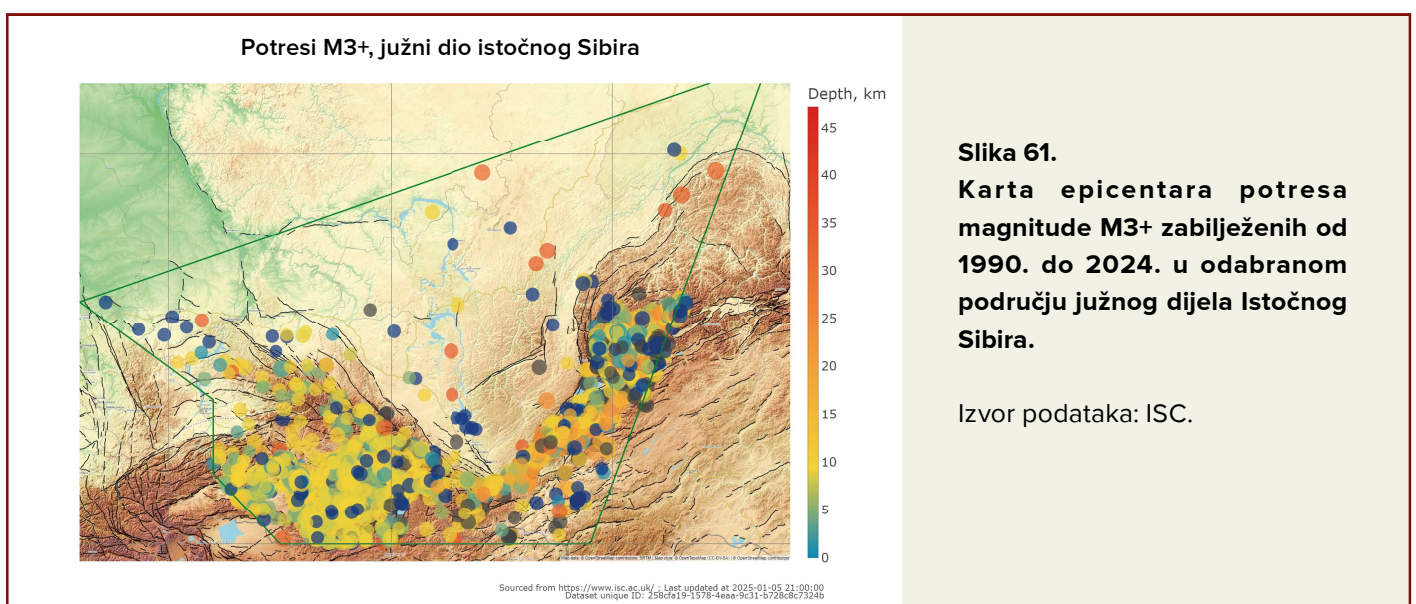
od 2019. godine.

Južni dio ispitivanog teritorija uključuje područje Altai-Sayan nabora i područje Bajkala (Sl. 61.). Ovo je tektonski mobilna i seizmički aktivna regija. Vrhunci seizmičnosti zabilježeni su 1999. i 2021. godine (Sl. 62.). Magnitude potresa počele su rasti 2007. godine, dosegnuvši M6.8 u 2021. godini (Sl. 63.).



Slika 60.
Distribucija broja potresa magnitude M2+ prema dubini u odabranom području sjeveroistočno od poluotoka Taimyr.

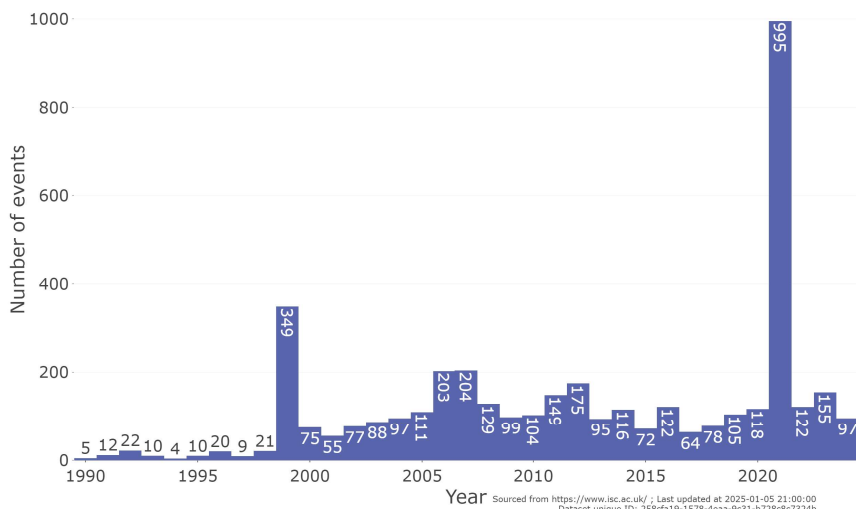
Izvor podataka: ISC.



Slika 61.
Karta epicentara potresa magnitude M3+ zabilježenih od 1990. do 2024. u odabranom području južnog dijela Istočnog Sibira.

Izvor podataka: ISC.

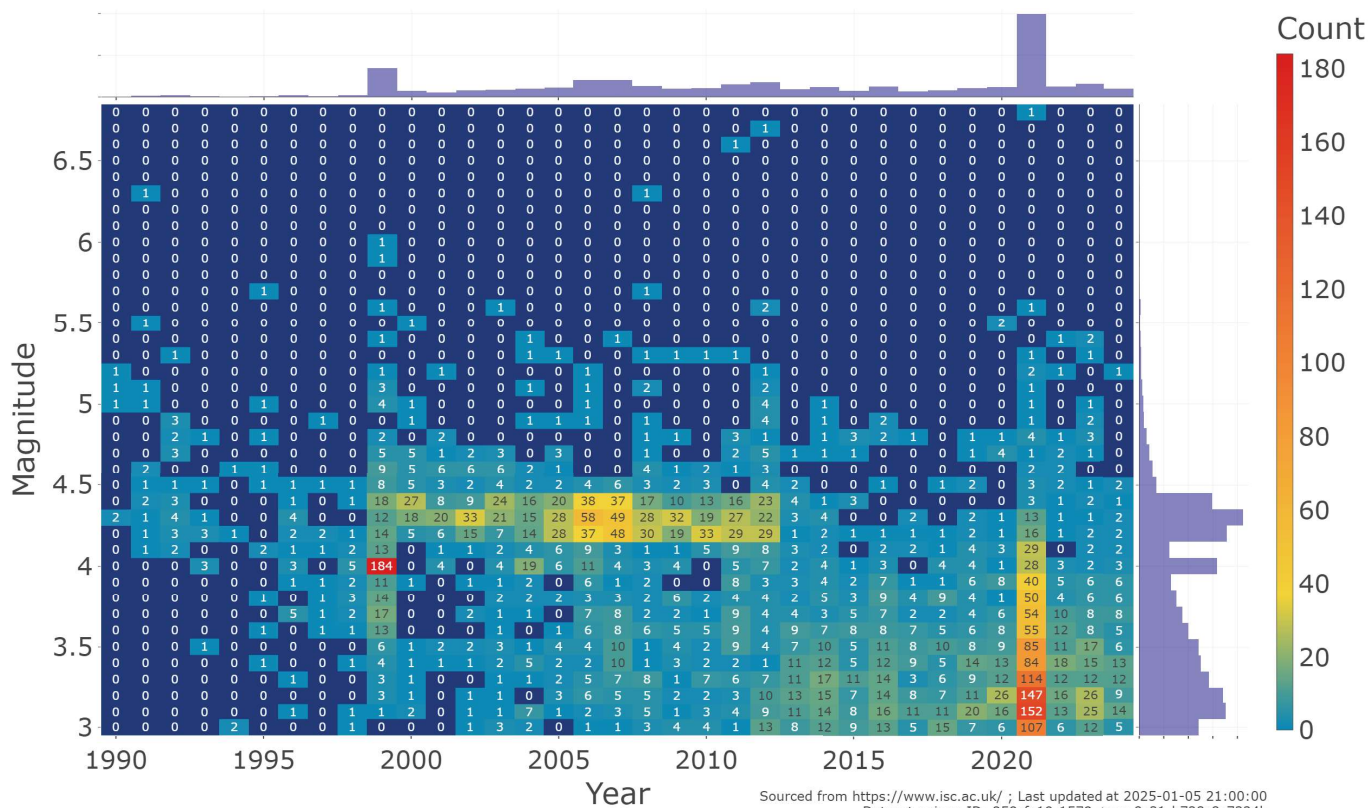
Potresi M3+, južni dio istočnog Sibira



Slika 62.
Broj potresa magnitude M3+ u južnom dijelu Istočnog Sibira.

Izvor podataka: ISC

Potresi M3+, južni dio istočnog Sibira



Slika 63.
Distribucija potresa prema magnitudi u odabranom području južnog dijela Istočnog Sibira od 1990. do 2024.

Izvor podataka: ISC.

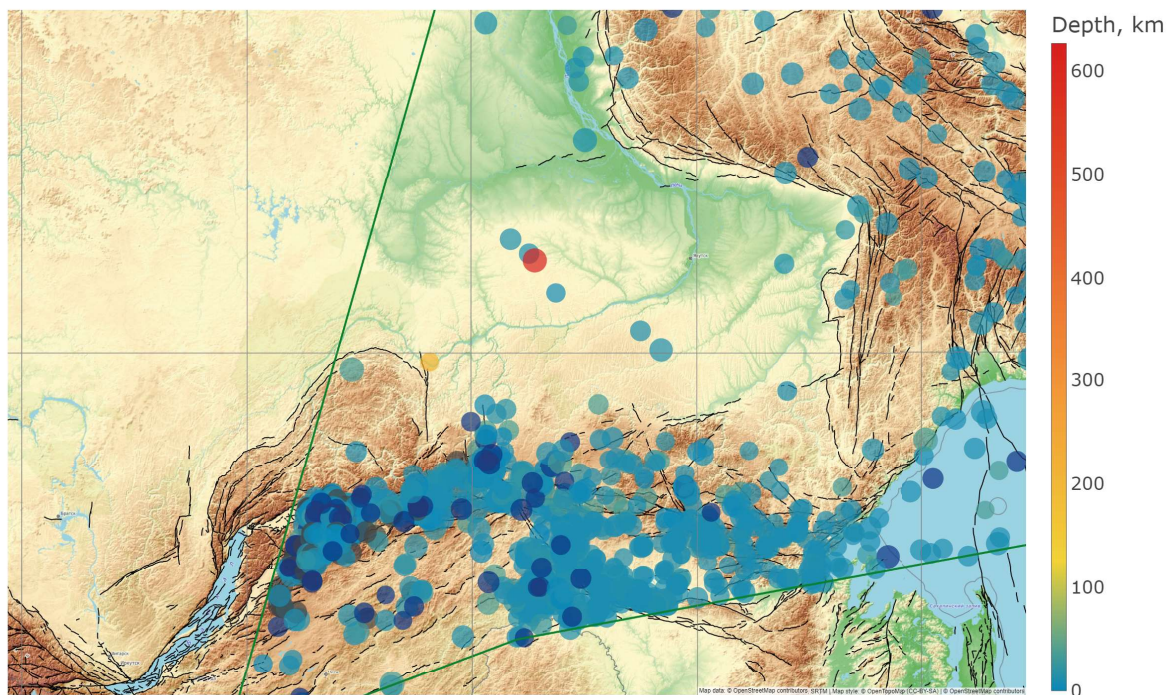
Važno je napomenuti pojavu potresa u plaštu ispod sibirskog kratona. Već 1998. godine zabilježen je potres magnitude 3.3 na dubini od 211 km u području Vilyuy Syncline. Ovo je bilo neočekivano otkriće, no još jedinstveniji događaj bio je značajan potres magnitude 5.1 na dubini od 627 km u istoj regiji 2023. godine (Sl. 64.).

Sama manifestacija seizmičnosti dubokog žarišta ispod stabilnog kratonskog bloka Zemljine kore izniman je događaj. Tradicionalno se pretpostavlja da se takvi potresi u plaštu događaju u takozvanim subdukcijskim zonama; međutim, najbliža subdukcijska zona nalazi se tisućama kilometara daleko i ne može utjecati na ovo područje.

Autori ovog izvješća sugeriraju da su uzroci

ovih potresa dubokog žarišta unutarplaštne eksplozije ogromne snage, koje se događaju kada relativno topliji tokovi magme dolaze u kontakt s relativno hladnijima. Prema seizmotomografskom modelu, anomalije u brzinama seizmičkih valova opažene su na mjestima oba potresa dubokog žarišta. Te anomalije odgovaraju područjima relativno viskoznijih i fluidnijih tokova, što vjerojatno odražava njihove temperaturne razlike. Dakle, ova dva potresa u plaštu dogodila su se na granici između relativno hladnih i relativno toplih tokova plašta (Sl. 65.), oslobađajući značajne količine energije koje su stvorile akustične valove detektirane seizmičkim sensorima kao potresi. Ovo jasno ukazuje na značajnu aktivnost tokova magme u plaštu u ovom području.

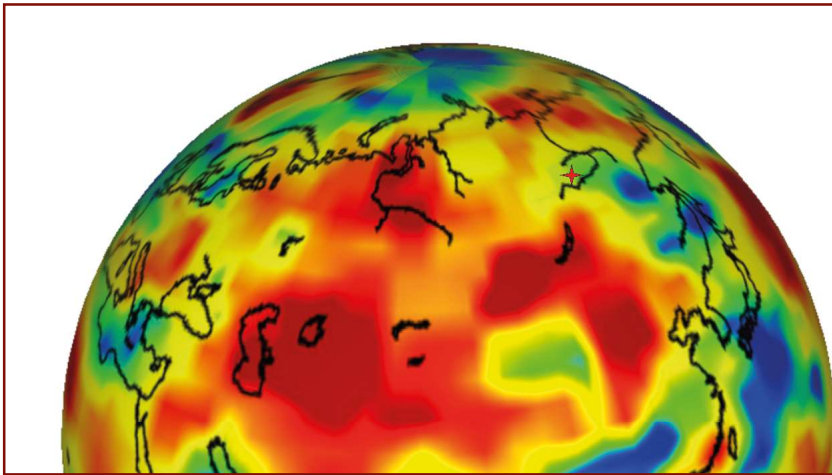
Položaj dubokih potresa u Sibiru



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

Slika 64.

Karta označava epicentar potresa s dubokim žarištem magnitude **M5.1** na dubini od 627 km ispod Sibirske platforme u 2023. godini, te potresa magnitude **M3.3** na dubini od 211 km (označeno žutom bojom)

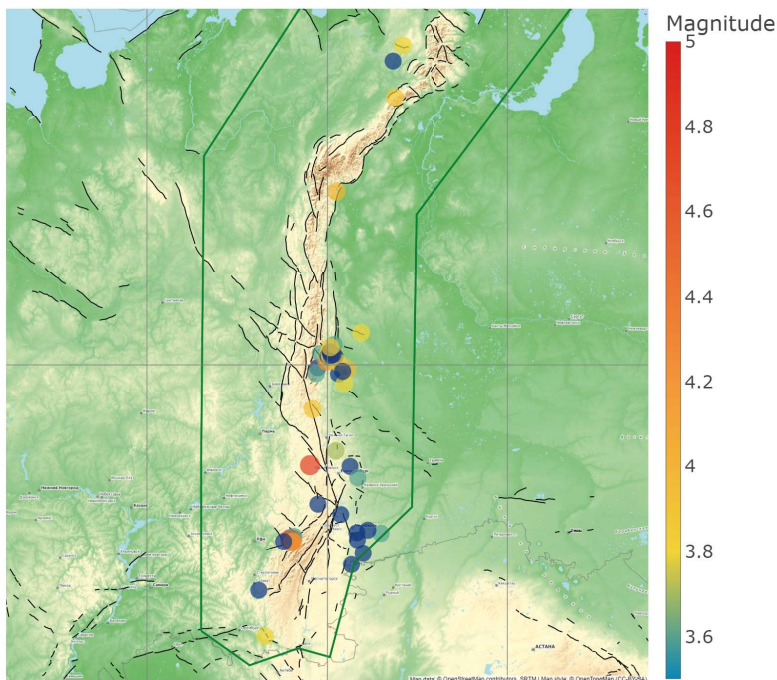


Slika 65.
Područja smanjenih brzina prolaska seizmičkih valova u plaštu na dubini od oko 600 km. Hipocentar potresa magnitude 5,1 u 2023. godini pada u područje susreta relativno toplih i relativno hladnih dijelova plašta.
Izvor: <https://members.elsi.jp/~hiroki.ichikawa/gst/gallery/gallery.html>

Ljuljanje rubnih dijelova Sibirske ploče uzrokuje porast seizmičke aktivnosti u Uralskoj regiji. Podaci za analizu filtrirani su uzimajući u obzir udare uzrokovane rudarskom djelatnošću. Također je odabrana magnituda od 3,5 kako

bi se točno garantiralo isključivanje događaja povezanih s ljudskom djelatnošću (Sl. 66., 67.). Slijedom toga, opaženo valovito povećanje seizmičnosti odražava prirodne procese.

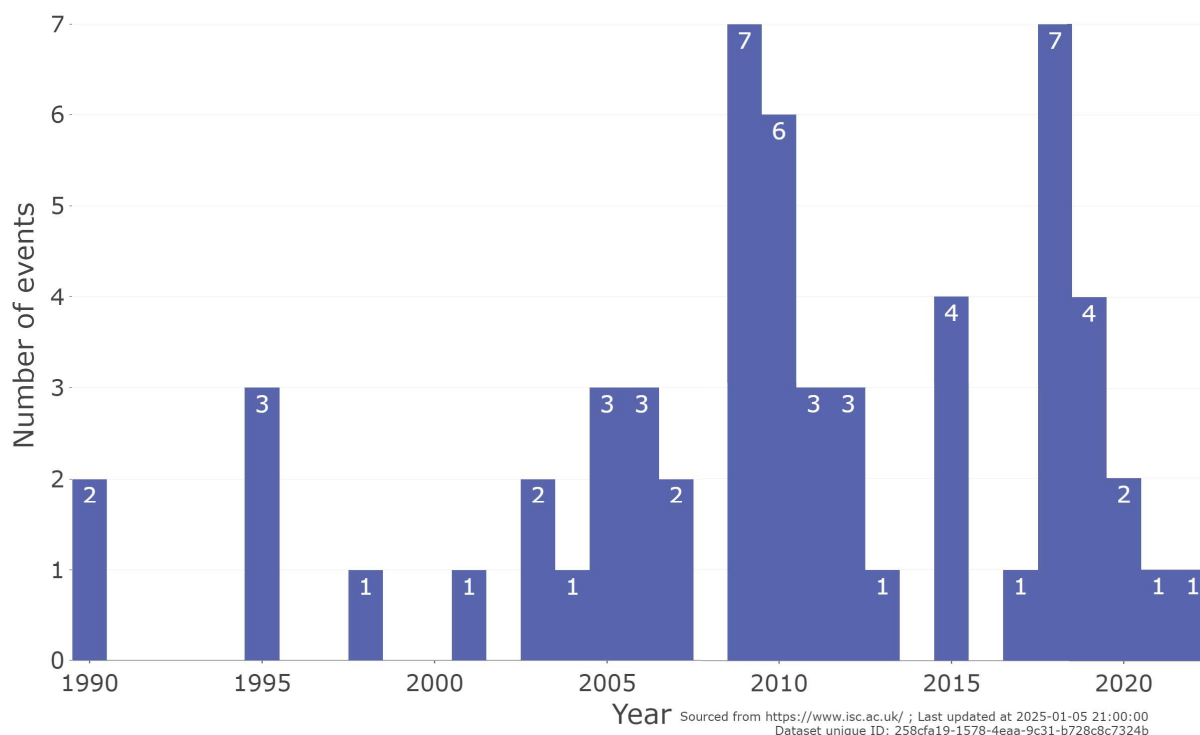
Potresi M3.5+ na Uralu



Slika 66.
Karta epicentara potresa magnitude M3.5+ zabilježenih u uralskoj regiji od 1990. do 2022. godine.

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

Potresi M3.5+ na Uralu

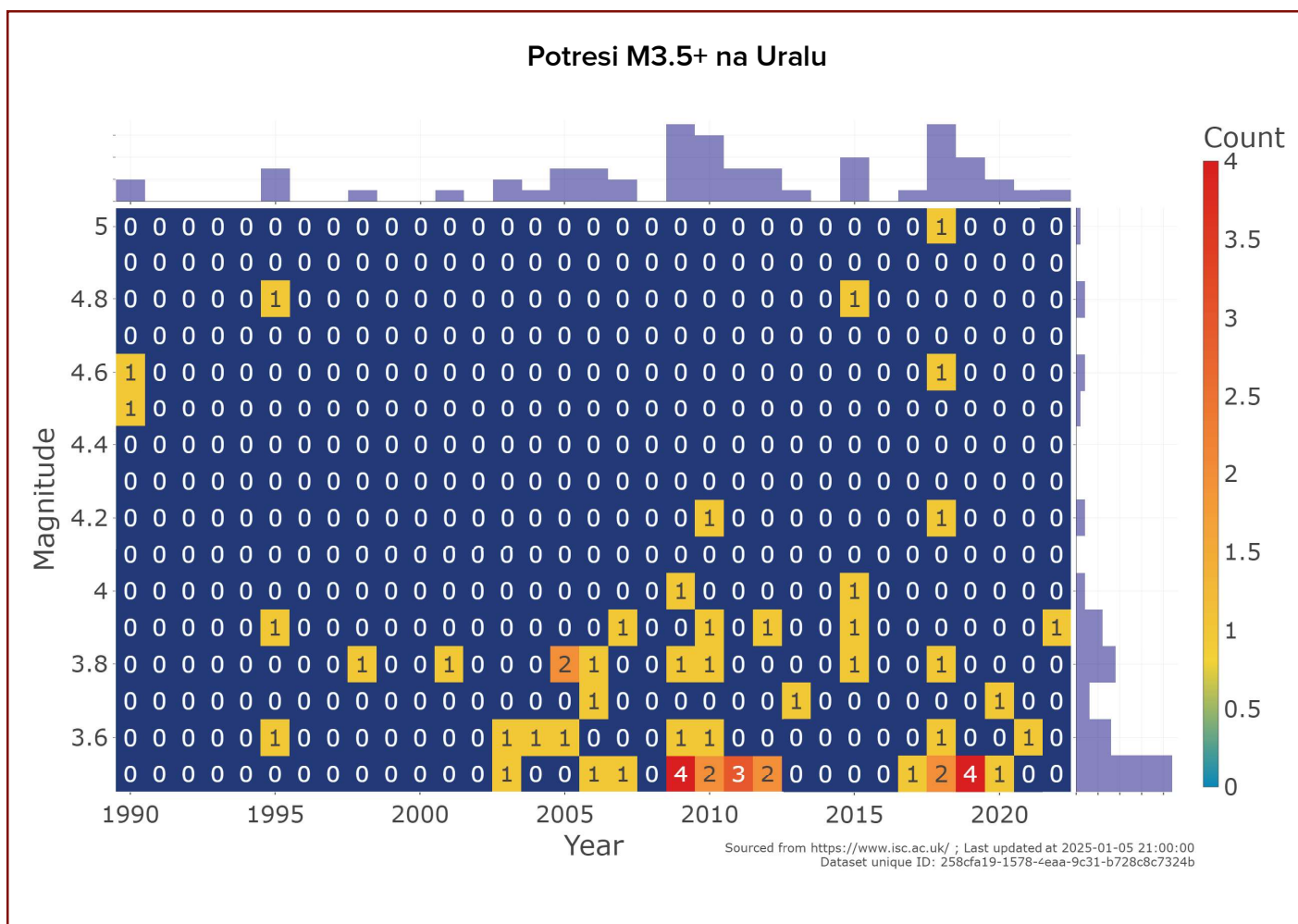


Slika 67.

Broj potresa magnitude M3.5+ zabilježenih u uralskoj regiji od 1990. do 2022. godine.

Dodatno, potresi s magnitudama u rasponu od 4.0 do 5.0 pojavili su se u regiji, što služi kao daljnji dokaz prirodnog povećanja seizmičke

aktivnosti (Sl. 68.). Porast seizmičnosti u uralskoj regiji ne događa se stalno, već u valovima, što je prirodan obrazac.



Slika 68.

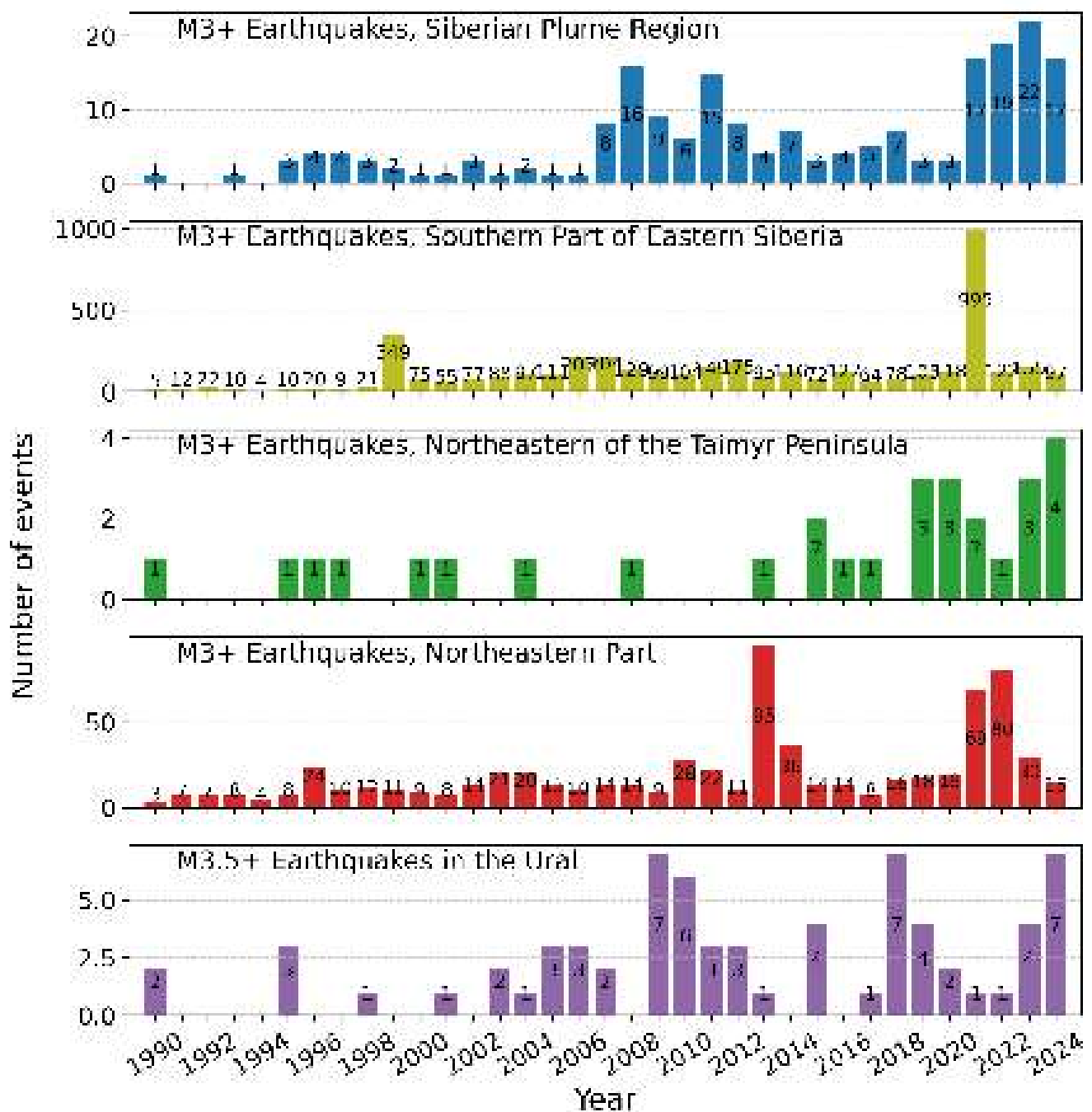
Distribucija potresa zabilježenih u uralskoj regiji od 1990. do 2022. godine prema magnitudi.

Izvor podataka: ISC

Prikazan je grafikon (Sl. 69.) za usporedbu vremena vrhunaca seizmičke aktivnosti u različitim dijelovima područja sibirске perjanice i njene periferije. U 2021. godini seizmička aktivnost povećala se u svim ispitivanim regijama, osim u Uralu. Primjećujemo da aktivnost raste u svim regijama, a posljednjih godina povećava se valovito, ‘pulsirajućim’ valovima u različitim regijama. Istovremeno, opaža se određeni obrazac koji podsjeća na postupno osciliranje ploče od zapada prema istoku i od sjevera prema jugu.

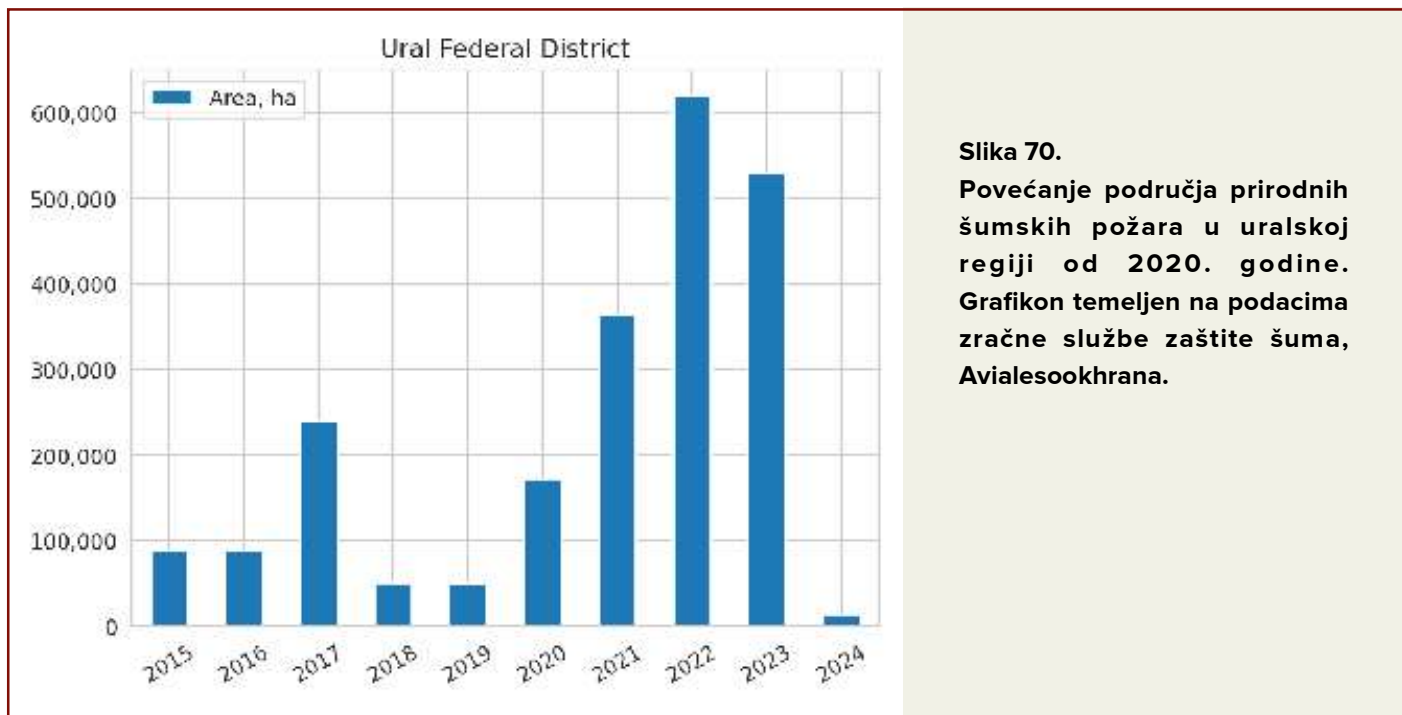
Treba uzeti u obzir i pojavu šumskih požara

na određenim lokacijama. Povećanje površine zahvaćene požarima u ovoj regiji ukazuje na povećanu podzemnu aktivnost, jer požari često nastaju u zonama rasjeda gdje izlaze zapaljivi plinovi. Ovi požari su teško ugasivi i vrlo se brzo šire na velike površine. U uralskoj regiji došlo je do naglog povećanja površine zahvaćene prirodnim požarima od 2020. godine (Sl. 70.). Grafikon se temelji na podacima zračne službe zaštite šuma (Avialesookhrana).



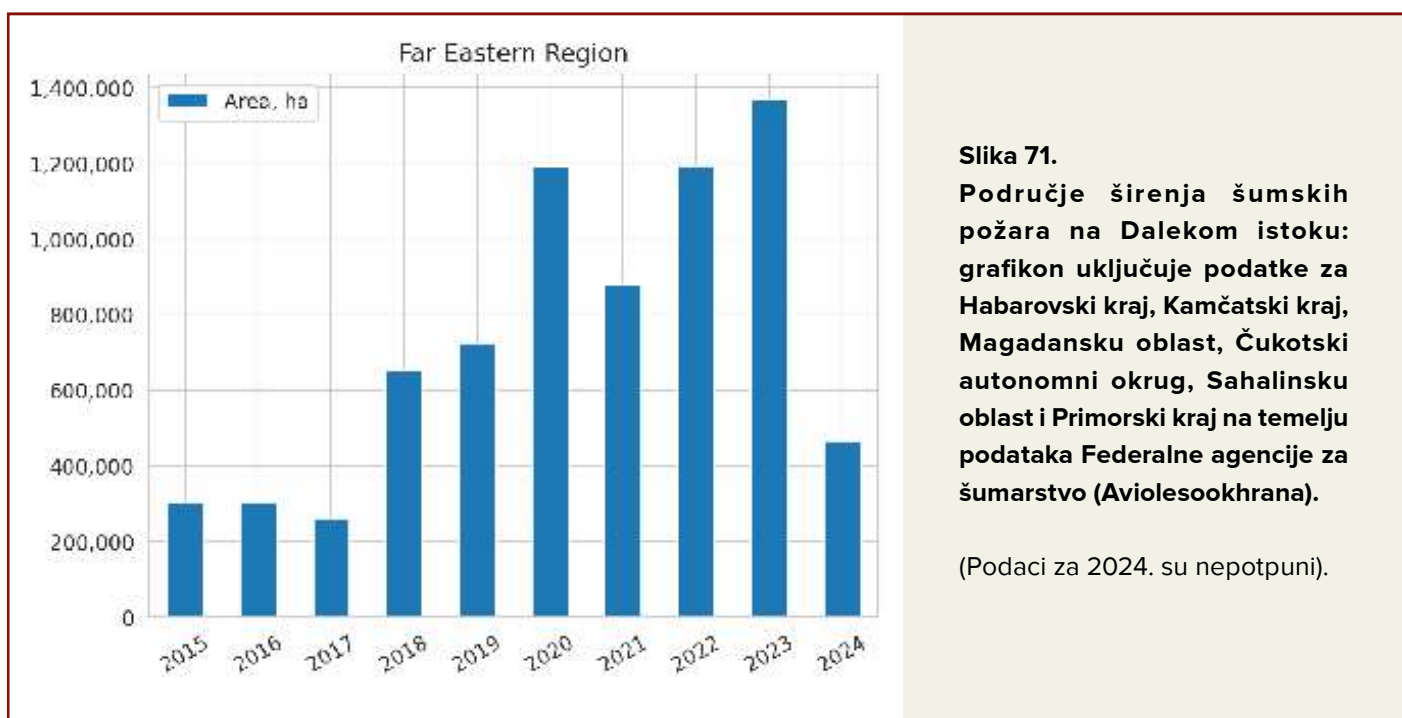
Slika 69. Distribucija vrhova seizmičke aktivnosti u regiji Verhojansk (istočno od Sibirske platforme), južnom dijelu Istočnog Sibira, uralskoj regiji (zapadno od Sibirske platforme) i središnjem Sibiru (uključujući Zapadnosibirsku ploču i Istočnosibirsku platformu) po godinama. Potresi magnitude M3+.

Izvor podataka: ISC.



Slika 70.
Povećanje područja prirodnih šumskih požara u uralskoj regiji od 2020. godine. Grafikon temeljen na podacima zračne službe zaštite šuma, Avialesookhrana.

Područje zahvaćeno požarima u regiji Dalekog istoka također eksponencijalno raste, što je jasno prikazano na grafikonu (Sl. 71.).



Slika 71.
Područje širenja šumskih požara na Dalekom istoku: grafikon uključuje podatke za Habarovski kraj, Kamčatski kraj, Magadansku oblast, Čukotski autonomni okrug, Sahalinsku oblast i Primorski kraj na temelju podataka Federalne agencije za šumarstvo (Avialesookhrana).

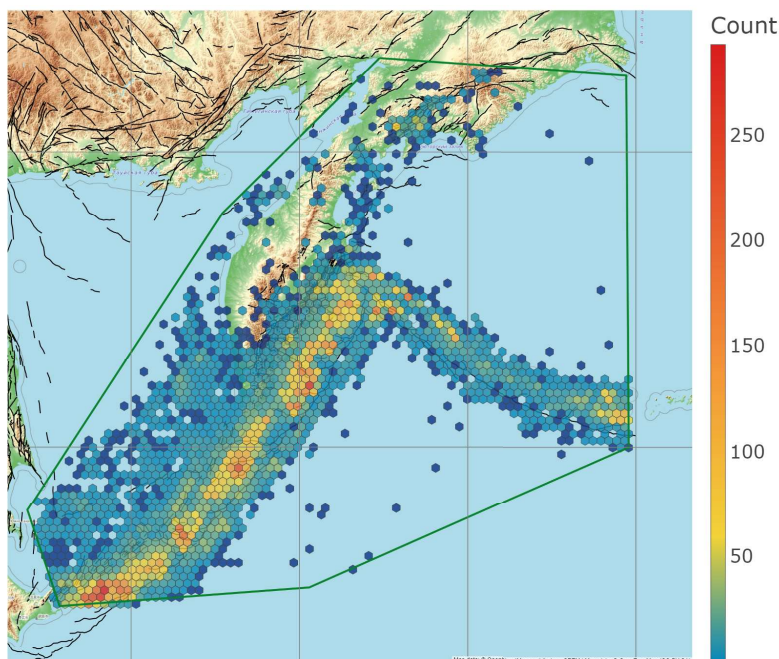
(Podaci za 2024. su nepotpuni).

Dakle, slični procesi povećane seizmičnosti i šumskih požara javljaju se na suprotnoj strani Sibirske i Dalekoistočne kore, duž granice s Pacifičkom pločom.

Pretpostavlja se da pojava sibirske perjanice također utječe na Kurilsko-Kamčatsku regiju kao završnu regiju kontinentalnog bloka kore pod pritiskom perjanice. Analiza seizmičkih podataka u regiji Kamčatke i Kurilskih otoka

pokazuje primjetan porast potresa magnitude M4.0+ (Sl. 72., 73.). Regija je dio pacifičkog vatrenog prstena (Sl. 74.) i pokazuje trend povećane seizmičnosti prema obrascima ove tektonske strukture. Međutim, većina vrhunaca seizmičnosti su neovisni. To može ukazivati na to da sibirska perjanica ima vlastiti utjecaj na regiju Kamčatke i Kurilskih otoka.

Gustoća potresa M4+ na poluotoku Kamčatka i Kurilskim otocima

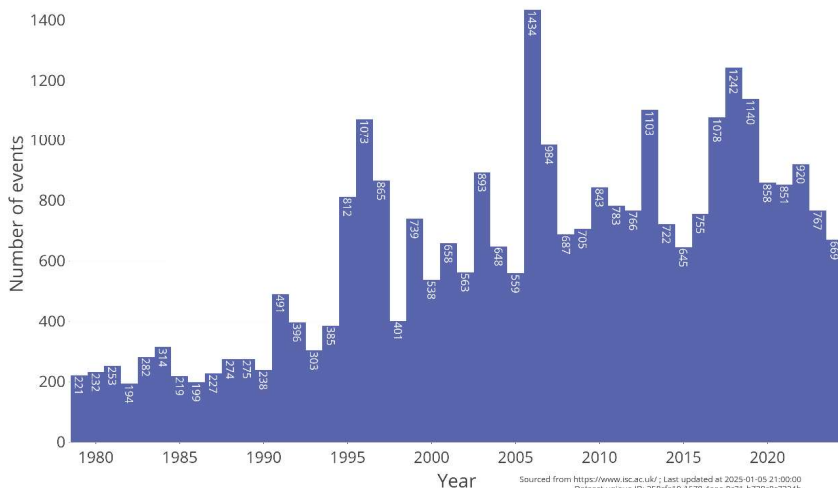


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

Slika 72.
Gustoća potresa magnitude M4+ na poluotoku Kamčatka i području Kurilskih otoka od 1979. do 2024. godine.

Izvor podataka: ISC

M4+ potresi na poluotoku Kamčatka i Kurilskim otocima

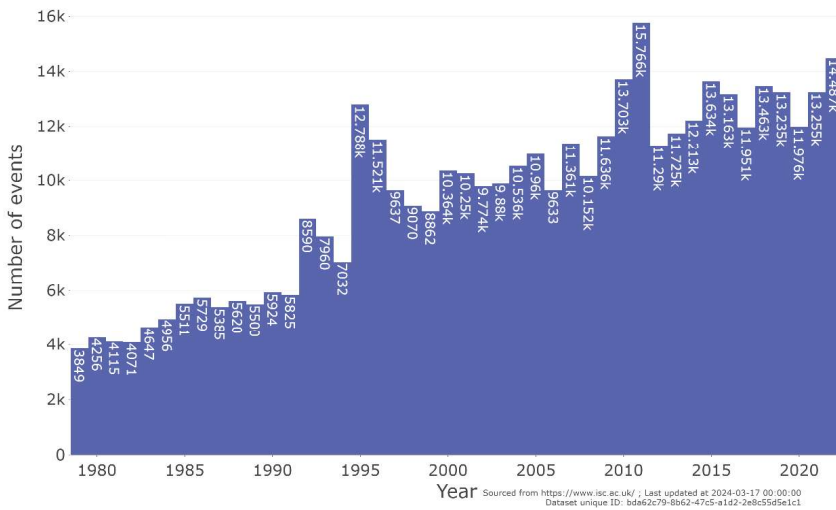


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

Slika 73.
Povećanje broja potresa magnitude M4+ na poluotoku Kamčatka i području Kurilskih otoka od 1979. do 2024. godine.

Izvor podataka: ISC.

M4+ potresi u Vatrenom prstenu 1979. - 2022. god.



Slika 74.

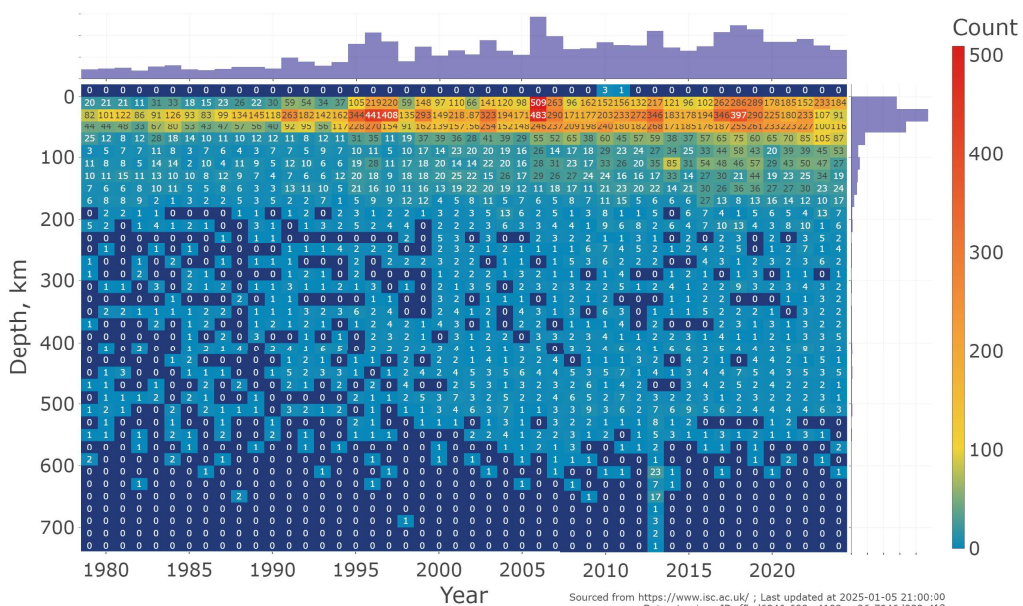
Povećanje broja potresa magnitude M4+ u području Vatrenog prstena od 1979. do 2022. godine.

Izvor podataka: ISC

Zanimljivo, dubina potresa u regiji Kuril-Kamčatka također se povećava (Sl. 75.). To ukazuje na to da interakcija između litosferskih ploča postaje dinamičnija zbog utjecaja perjanice sibirskog plašta. Očekuje se porast vulkanske aktivnosti u regiji Kuril-Kamčatka, zajedno s pojavom anomalija u brzom izdizanju

duboke magme i brzim promjenama sastava tijekom vulkanskih erupcija prema više mafičkim magmama. Slična promjena u sastavu prema dubljim izvorima demonstrirana je kod vulkana Bezmyanny tijekom erupcije 2017. godine.⁴⁵

M4+ potresi na poluotoku Kamčatka i Kurilskim otocima



Slika 75.

Raspodjela potresa magnitude M4+ zabilježenih u odabranom sektoru poluotoka Kamčatka i regije Kurilskih otoka od 1979. do 2024. prema dubini. Izvor podataka: ISC.

⁴⁵V.O. Davydova, V.D. Shcherbakov, P.Yu. Plechov, I.Yu. Koulov, Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezmyanny 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>

Povećanje seizmičke aktivnosti, požara i anomalija vulkanske aktivnosti rubni su učinci podizanja sibirskog bloka Zemljine kore, koji trpi pritisak uslijed intruzije sibirske perjanice.

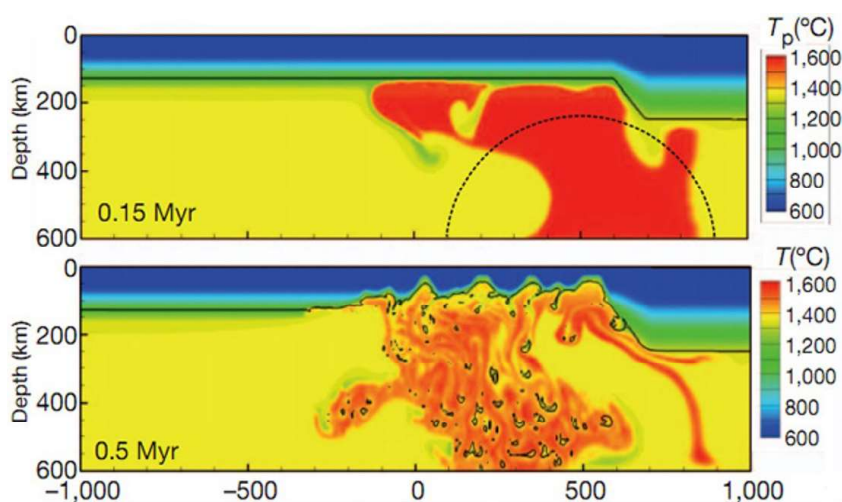
Porast seizmičke aktivnosti ne samo u Sibiru nego posebno duž rubova zapadnosibirske ploče i istočnosibirskog kratona sugerira da je započelo uzdizanje ploče zbog pritiska perjanice plašta koja se nalazi ispod. To ukazuje na značajan i široko rasprostranjen utjecaj magmatske perjanice na ploču.

Tradicionalni modeli pretpostavljali su da se, kako se perjanice plašta podižu i zagrijavaju litosferu iznad sebe, stvara značajno podizanje površine visine do 2 kilometra prije nego što magma probije. Međutim, geološki dokazi o

takvom dramatičnom podizanju ne postoje u regiji Sibirskih trapa, koje su nastale uslijed intruzije magmatske perjanice prije 250 milijuna godina.

Na temelju proučavanja magmatskih stijena iz Sibirskih trapa, znanstvenici iz instituta u Rusiji, Njemačkoj i Francuskoj su utvrdili da,⁴⁶ umjesto da se diže kao mjehur, perjanica postupno erodira litosferu odozdo (Sl. 76.).

Kada je erozija na kontaktnoj zoni između rastaljenog materijala perjanice i stijena gornjeg plašta dosegla dubinu od 50 kilometara (oko 31 milju), započeli su veliki izljevi lave i erupcije na površini.



Slika 76.

Rekonstrukcija početnih faza formiranja Sibirskih trapa.

Okomita os pokazuje dubinu (u km). Različite boje označavaju temperaturu stijene. Početni položaj vrha perjanice plašta prikazan je isprekidanom polukrugom. Perjanica se približava donjoj granici litosfere—prikazana kao puna crna linija—i “širi se” ispod nje. Na dnu: zbog erozije od strane vrha perjanice—vidljivi su fragmenti litosfere koji tonu u dubinu—probijen je put kroz gornji plašt prema Zemljinoj kori. To odgovara početku glavne faze magmatizma povezanog s Trapama.

Izvor: Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutskaya, 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.

⁴⁶ Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutskaya, 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

Sadašnja aktivnost perjanice vjerojatno slijedi isti mehanizam. Stoga, značajno lokalizirano podizanje površine na jednoj točki gdje vrh perjanice prodire nije očekivano. Međutim, ovaj mehanizam ne isključuje široko regionalno podizanje cijele istočnosibirske platforme u manjoj mjeri. Prema tektonofizikalnom modeliranju, čak i takvo malo podizanje bilo bi dovoljno za izazivanje proboja magme, oslobađanje rastaljenog materijala pod visokim

tlakom i izazivanje katastrofalnih događaja.

Pretpostavljeno središte vrha perjanice nalazi se u regiji sjeverno od visoravni Putorana, približno 225 km sjeveroistočno od Norilsk. Osim toga, prodori bi utjecali na cijelu tanku zapadno-sibirsku ploču, gdje će se vjerojatno ponovno otvoriti stari nabori i procjepi te duboki rasjedi u Zemljinoj kori.



Dokazi o neizbježnosti erupcije sibirске perjanice

Visok rizik od prodora magme iz suvremene sibirске perjanice u sadašnjem razdoblju uzrokovan je sljedećim uvjetima:

Tijekom posljednjih 30 godina Zemlja je doživjela postupno povećanje geofizičkih anomalija, koje su izravna posljedica vanjskih sila koje pojačavaju toplinsku energiju u blizini jezgre planeta. Međutim, trenutna situacija znatno se razlikuje od prethodnog razdoblja.

Do kraja 2024. planet će ući u fazu pojačanog energetskog utjecaja na svoju jezgru. Izračuni pokazuju da ćemo do 2030. dosegnuti vrhunac te faze.

Kritični faktor koji dodatno pogoršava situaciju jest globalno onečišćenje oceana uzrokovano antropogenim utjecajem, uključujući ugljikovodike, mikroplastiku i nanoplastiku. Ovo onečišćenje značajno je promijenilo toplinsku vodljivost oceanske vode, smanjujući njezinu sposobnost učinkovitog raspršivanja topline iz unutrašnjosti Zemlje. Povijesno gledano, ocean je djelovao kao glavni toplinski regulator planeta, no sada je izgubio značajan dio svoje toplinske vodljivosti. Kao rezultat toga, dolazi do abnormalnog nakupljanja toplinske energije u plaštu, što dovodi do njegovog topljenja brzinom neviđenom u povijesti Zemlje.

Geofizičke studije ukazuju na dramatičan porast broja potresa dubokog žarišta, koji su izravni pokazatelji aktivnog topljenja plašta. Povećani volumen rastaljene magme stvara ogroman pritisak na Zemljinu koru. Ovaj proces

može se usporediti s napuhavanjem balona – na kraju će pritisak premašiti čvrstoću kore, što će dovesti do njezina pucanja.

Sibirска regija posebno je osjetljiva na ove procese zbog svoje jedinstvene geološke strukture, budući da se ispod tog područja uzdiže snažna magmatska perjanica – uzlazni tok rastaljenog materijala iz plašta. Ova perjanica aktivirana je pomakom Zemljine jezgre u tom smjeru tijekom 1997.–1998. godine. Rastuće temperaturne anomalije u Sibiru ukazuju na to da volumen magme ispod Sibirskog kratona eksponencijalno raste. Na temelju geoloških podataka i nedavnih opažanja, postoji visok stupanj sigurnosti da je sibirска perjanica ušla u kritičnu fazu spremnosti za erupciju.

Posebno zabrinjavajuće je istovremeno kritično stanje u Marijanskoj brazdi, najdubljij točki oceanskog dna, gdje je kora najtanja i najosjetljivija. Ova regija također doživljava uspon rastaljene magme, praćen značajnim porastom seizmičke aktivnosti. Prijetnja proboja oceanske kore u ovom području predstavlja realan scenarij planetarne destrukcije.

Mogu se razviti dva potencijalna scenarija. Prvi uključuje erupciju sibirске perjanice, koja bi se mogla dogoditi u bilo kojem trenutku zbog rastućeg pritiska magme. Drugi scenarij uključuje proboj u Marijanskoj brazdi, koje bi moglo prethoditi sibirskoj katastrofi. Sibirска perjanica ne bi doživjela erupciju ako prvo dođe do proboja u Marijanskoj brazdi.

Geološka povijest Marsa pruža jasan primjer posljedica takvog scenarija—Marinerova dolina služi kao tiho svjedočanstvo slične katastrofe, gdje je erupcija perjanice ispod oceana dovela do katastrofalnih posljedica za cijeli planet.

Prema izračunima temeljenim na trenutnim trendovima geofizičke aktivnosti, kritična točka proboja Marijanske brazde mogla bi biti dosegnuta do 2036. godine. Međutim, važno je priznati da je ovaj vremenski okvir uvjetovan. Zemljina kora u Sibiru mogla bi popustiti rastućem pritisku mnogo prije toga. S obzirom na trenutni razvoj događaja, proboj sibirске perjanice ili Marijanske brazde čini se neizbježnom posljedicom procesa

koji se događaju duboko unutar Zemlje. Jedina nesigurnost leži u točnom vremenu i mjestu katastrofe, a ne u sigurnosti njenog približavanja.

Razmotrimo tri potencijalna scenarija za razvoj situacije po pitanju sibirске perjanice. Prvi scenarij uključuje iznenadni, jednokratni prodor sibirске perjanice. Drugi scenarij uključuje sporo i postupno izbacivanje lave u Sibiru, slično formiranju Sibirskih trapa. Treći scenarij odvija se ako čovječanstvo poduzme potrebne mjere za otplinjavanje sekundarnih magmatskih vrućih točaka sibirске perjanice unutar Zemljine kore.

Scenarij 1:

Trenutna jednokratna erupcija sibirске perjanice

Komparativna analiza povijesnih geoloških događaja može se koristiti za procjenu potencijalne štete od iznenadne erupcije sibirске perjanice. Međutim, važno je uzeti u obzir da su trenutni uvjeti na Zemlji—specifično, spajanje najintenzivnijeg 24.000-godišnjeg ciklusa s antropogenim onečišćenjem osnovnog sustava hlađenja planeta, oceana—prethodno neviđeni. Zbog toga se iznenadni prodor sibirске perjanice smatra najvjerojatnijim scenarijem ako čovječanstvo ne poduzme mjere za ublažavanje tih rizika.

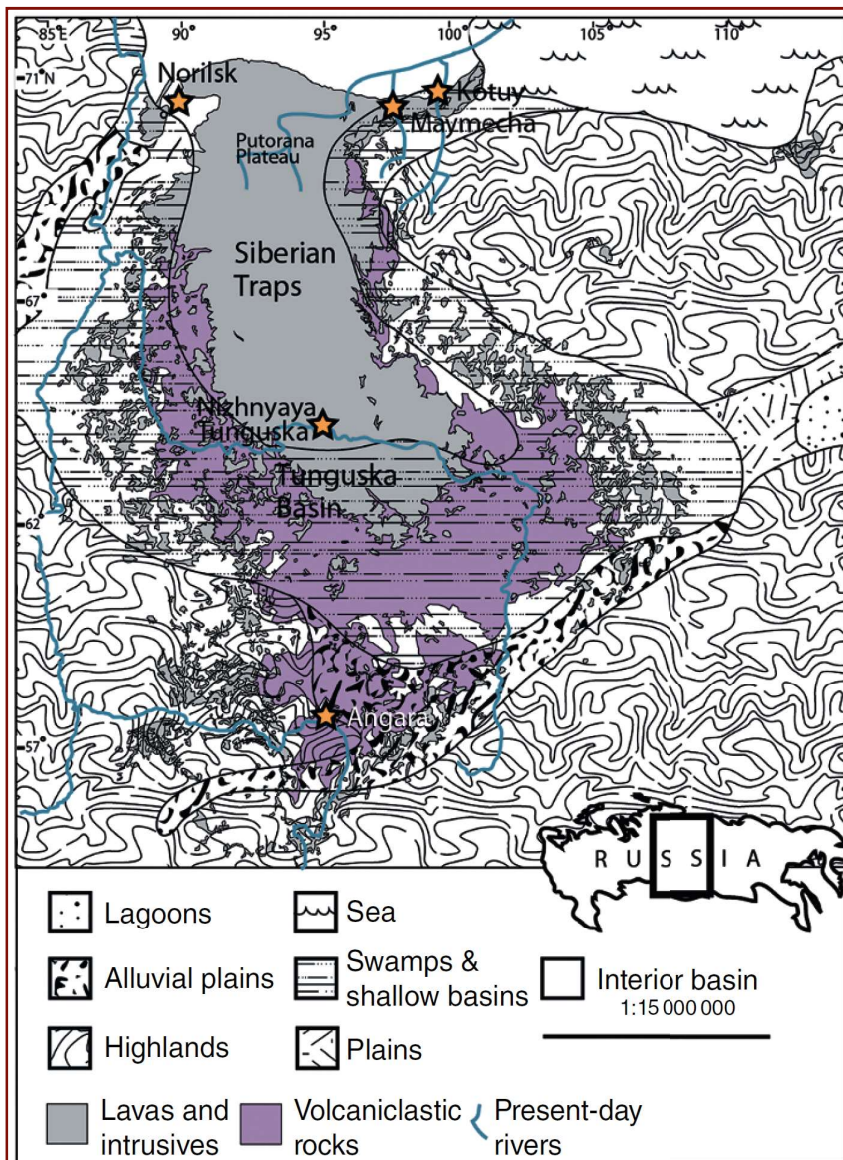
Za procjenu magnitude vulkanskih erupcija koristi se volumen izbačenog materijala. Na primjer,

tijekom jedne od najmoćnijih erupcija supervulkana Yellowstone prije 2,1 milijuna godina, volumen izbačene magme bio je približno 2.500 km³ (600 mi³), što je utvrđeno proučavanjem naslaga sedre u Sjevernoj Americi.⁴⁷ Ova erupcija izbacila je pepeo i plinove do visine od 50 kilometara (31 milja), dosegnuvši gornju granicu stratosfere. Slična razina zabilježena je u erupciji supervulkana Toba na otoku Sumatra, koja se dogodila prije oko 72.000–74.000 godina i bila je najmoćnija erupcija u posljednjih 25 milijuna godina.

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>

Prema različitim procjenama, obim izbačenog materijala tokom erupcije Sibirskih trapa prije oko 250 miliona godina kretao se od 3 do 4 miliona km³ (720.000 do 960.000 mi³) lave i sedre⁴⁸ (Sl. 77). To znači da je erupcija Sibirskih trapa bila 1.000 puta veća u pogledu izbačenog materijala od najjačih poznatih erupcija kaldere Yellowstone ili supervulkana Toba.

S obzirom na iznenadnu prirodu potencijalne erupcije sibirske perjanice, njeno aktiviranje moglo bi rezultirati događajem čija bi jačina bila 1.000 puta veća od ovih povijesnih erupcija, kao što su one kaldere Yellowstone ili supervulkana Toba.



Slika 77.

Paleogeografska karta Sibirskih trapa koja ilustrira razmjere glavnih vulkano-klastičnih izlivanja i regija povezanih sa Sibirskim trapama. Temeljena je na podacima Malich i ostali (1974), Polozov i ostali (2010) i Black i dr. (2015), uz pojednostavljenu paleogeografiju kasnog permijskog razdoblja prema Czamanske i ostali (1998).

Izvor: 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>

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>

Hipoteza je da bi iznenadni prodor sibirске perjanice rezultirao eksplozivnom erupcijom, stvarajući jednu kalderu. Prema ovoj hipotezi, kaldera stvorena prodorom sibirске perjanice pokrila bi površinu od otprilike 75.000 km² (29.000 mi²), s radijusom od oko 150 km (93 milje) ili dimenzijama 380 km x 250 km (236 x 155 milja). Tokom erupcije Sibirskih trapa prije 250 milijuna godina, područje preplavljeno lavom, kako je dokumentirano u literaturi,⁴⁹ kretalo se od 4 do 7 milijuna km² (1,5 do 2,7 milijuna)⁵⁰. Sličan odnos prekrivanja tla mogao bi biti i u ovom događaju.

Pojam da su lavinski tokovi najopasniji vulkanski fenomeni je zabluda. U stvarnosti, pepeo često postaje primarni uzrok smrtonosnih posljedica. Za supervulkane koji se odlikuju visokom eksplozivnošću, značajan dio magme ne prelazi u lavu. Umjesto toga, ona se fragmentira tijekom eksplozije, proizvodeći ogromne količine sitnog vulkanskog pepela—pepeo koji se sastoji od oštih, nazubljenih komadića stijena koji se raspršuju u atmosferu. Udisanje ovog pepela stvara smjesu nalik cementu u ljudskim plućima, što vodi neizbježnoj smrti.

Procjenjuje se da bi tijekom erupcije sibirске perjanice radijus raspršivanja takvog vrućeg pepela dosegao otprilike 9.000 km (5.592 milje), pokrivajući površinu od oko 255 milijuna km² (98,5 milijuna). S obzirom na to da ukupna površina Zemlje iznosi nešto više od 510 milijuna km² (197 milijuna), zona zahvaćena pepelom, gdje bi disanje postalo nemoguće, obuhvatila bi otprilike polovicu planeta, približno 50% površine Zemlje.

Stoga se očekuje da će iznenadni prodor

sibirске perjanice stvoriti tri životno opasne zone utjecaja.

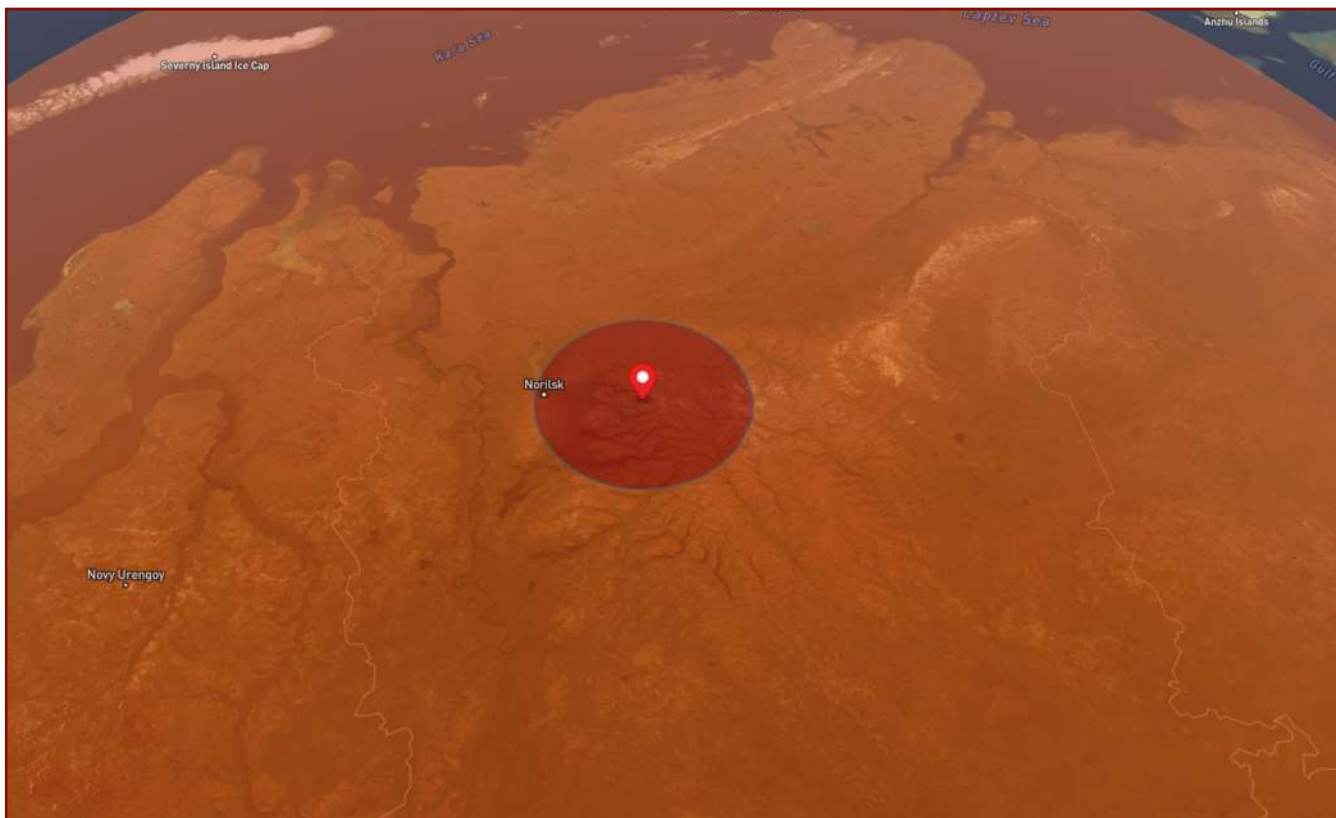
Prva (središnja) zona utjecaja je područje s radijusom od 150 km (93 milje), smješteno u sjeverozapadnom dijelu Putoranske visoravni, gdje se očekuje da će se formirati kaldera (Sl. 78). Ova zona obuhvaća gradove Norilsk, Dudinka i Talnakh u Krasnojarskom kraju. Unutar ove zone, aktivacija perjanice rezultirala bi trenutnim uništenjem svih objekata zbog udarnog vala i užarenih piroklastičnih tokova tijekom početne faze erupcije.

Druga zona utjecaja, koja se proteže na radijus od 1.500 km (932 milje) od središta, obuhvaća područje pogođeno tokovima lave i teškim vulkanskim materijalima (Sl. 79.). Ova zona pokriva ogromna područja sjevernog Sibira, uključujući Yamalo-Nenetski autonomni okrug, Tajmirski poluotok, dijelove Khanty-Mansi autonomnog okruga, sjeverni Krasnojarski kraj, zapadnu Jakutiju i sjeveroistočni europski dio Rusije. Glavni gradovi unutar ovog radijusa uključuju Igarku, Novy Urengoy, Nadym, Salekhard, Vorkutu, Naryan-Mar, Mirny, Kogalym, Lesosibirsk, Surgut, Krasnojarsk, Khanty-Mansiysk, Tomsk i Nizhnevartovsk.

Tijekom prvih sati erupcije, ovo će područje biti podvrgnuto brzom kretanju tokova užarenih plinova, pepela i lave koji putuju brzinama do 700 km/h (435 mph). Ovi tokovi uništiti će sav život i infrastrukturu, zakopavajući regiju pod debelim slojem vulkanskih materijala i prirodne resurse.

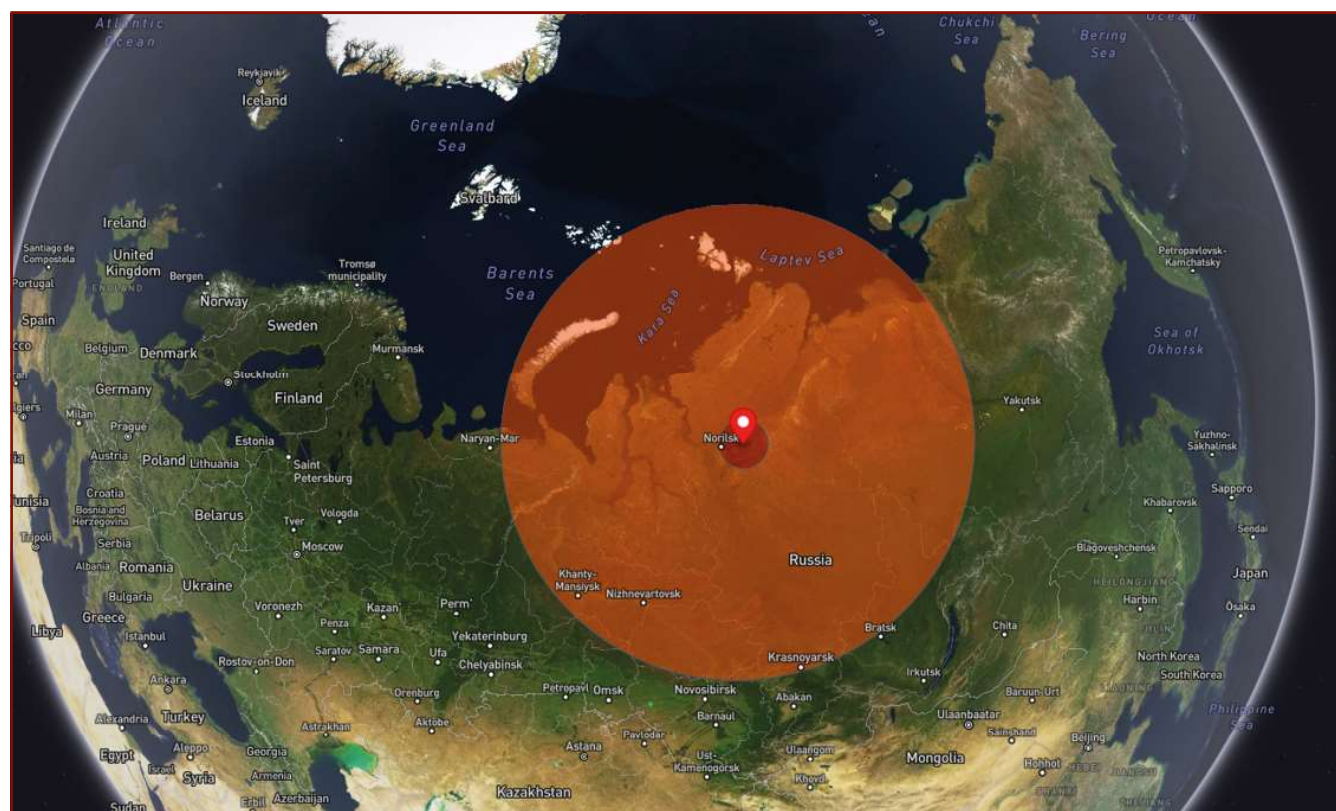
⁴⁹ Fedorenko, V. A., Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., Czamanske, G. K., Hawkesworth, C. J., Wooden, J. L., & Ebel, D. S. (1996). Petrogenesis of the Flood-Basalt Sequence at Noril'sk, North Central Siberia. *International Geology Review*, 38(2), 99-135. <https://doi.org/10.1080/00206819709465327>

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>



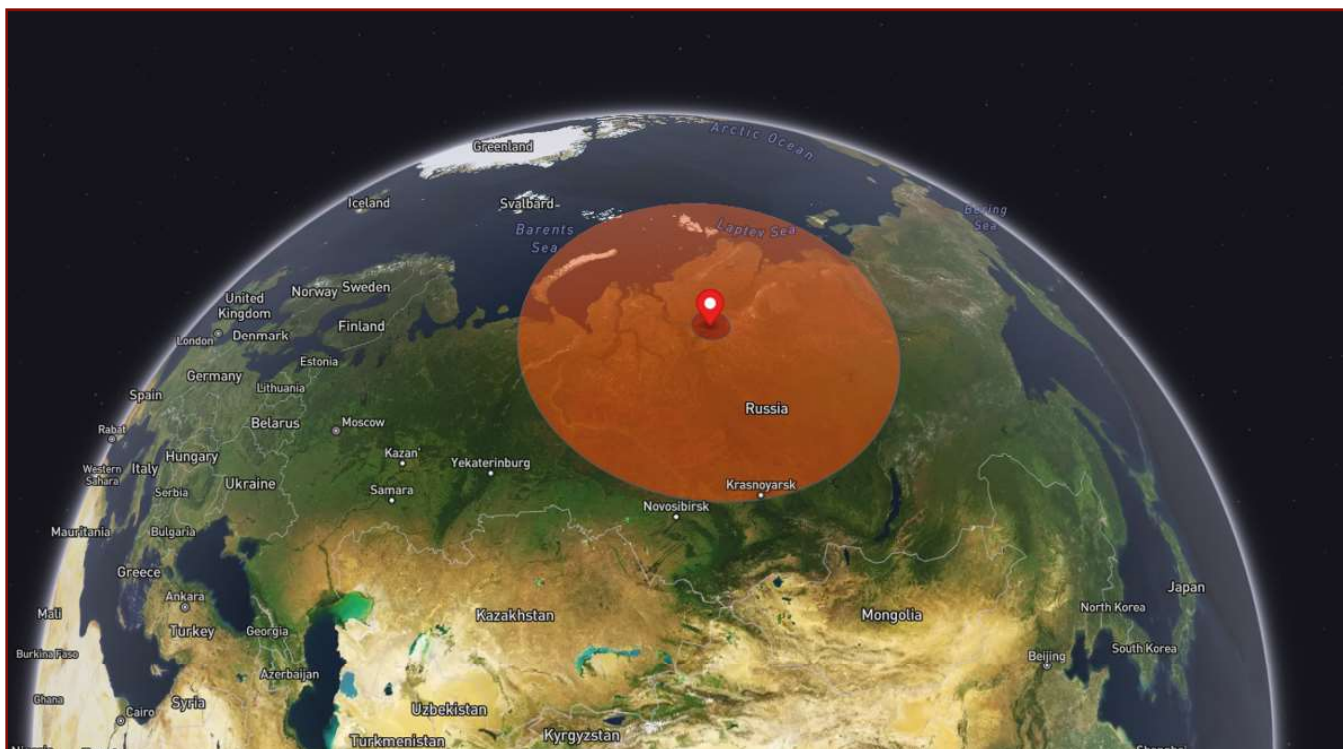
Slika 78.

Zona formiranja kaldere prikazana je crvenom bojom, s približnim radijusom od 150 km.



Slika 79.

Zona lavinskog toka i teškog piroklastičnog taloženja prikazana je narančastom bojom, s približnim radijusom od 1.500 km.



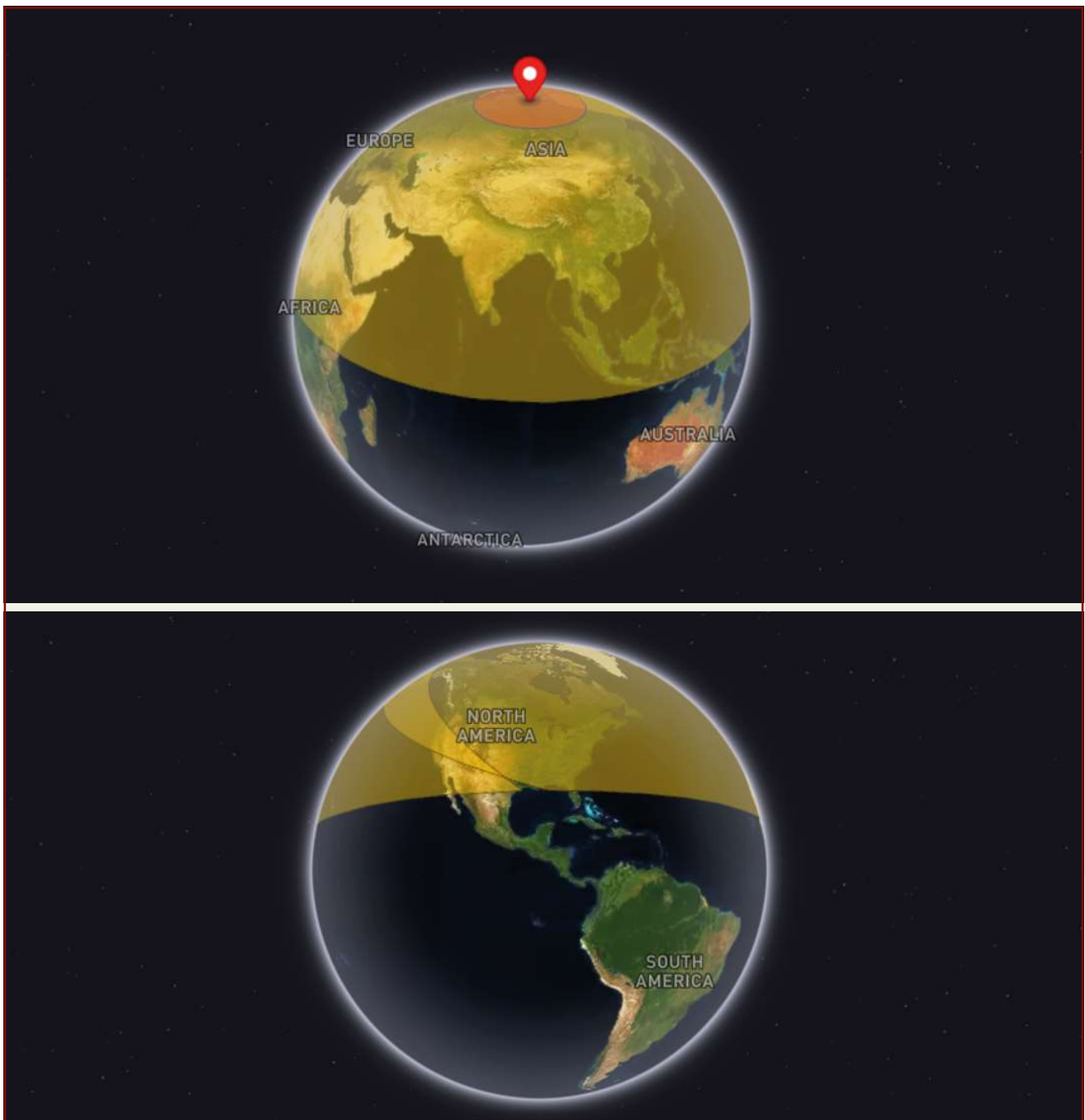
Slika 79.

Zona lavinskog toka i teškog piroklastičnog taloženja prikazana je narančastom bojom, s približnim radijusom od 1.500 km.

Treća zona utjecaja, s radijusom od otprilike 9.000 km (5.592 milje), obuhvaća područje raspršivanja finih piroklastičnih materijala i vulkanskog pepela, pokrivajući otprilike 50% površine Zemlje (Sl. 80).

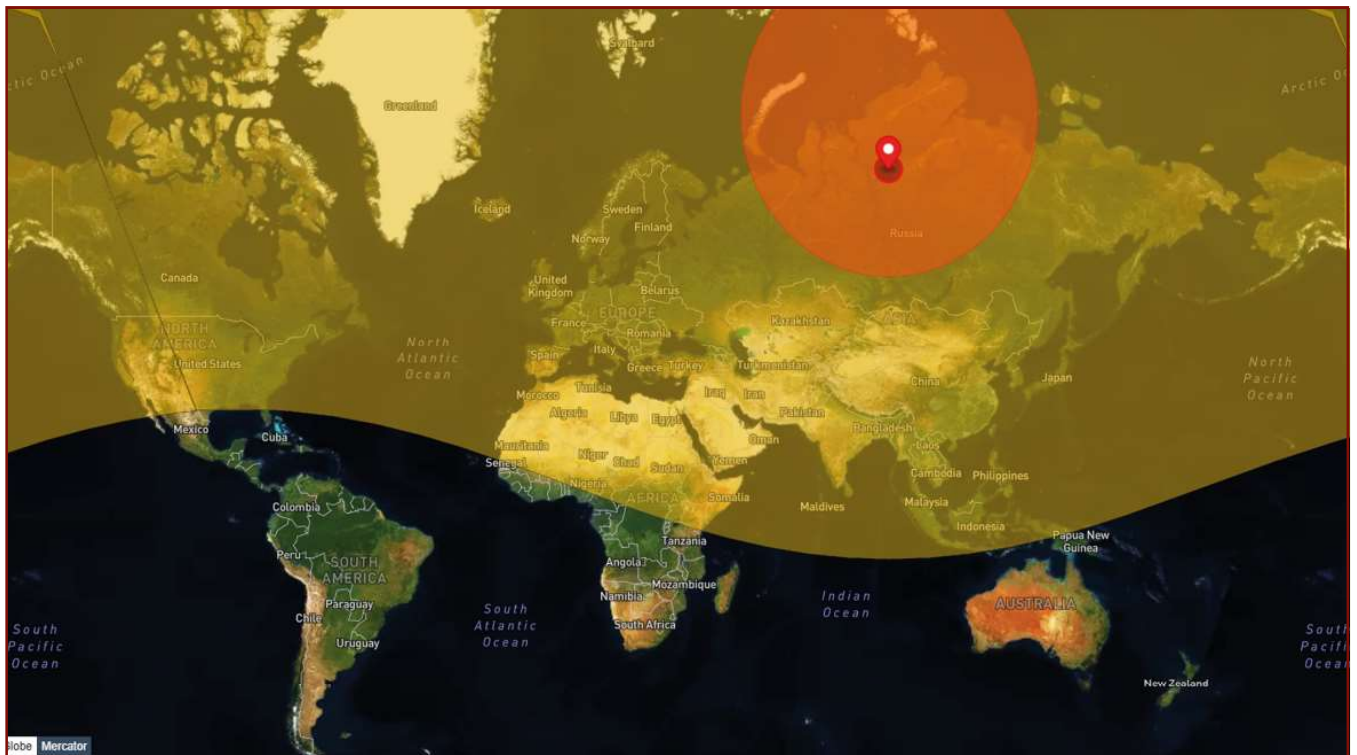
Tijekom početne faze (prvih 24 sata nakon erupcije), taloženje pepela prvenstveno će

zahvatiti teritorije Ruske Federacije, kontinentalne Azije, Europe, Arapskog poluotoka, sjevernog dijela afričkog kontinenta i Sjeverne Amerike. U narednih 7–10 dana, očekuje se da će se mase pepela proširiti na australski kontinent, Južnu Ameriku i Antarktiku.



Slika 80.

Područje raspršivanja finog vulkanskog pepela prikazano je žutom bojom, s približnim radijusom od 9.000 km.



Slika 80.

Područje raspršivanja finog vulkanskog pepela prikazano je žutom bojom, s približnim radijusom od 9.000 km.

Istraživanje geoloških procesa ukazuje na to da bi aktivacija sibirske perjanice pokrenula niz dodatnih katastrofalnih posljedica. To uključuje generiranje snažnog udarnog vala, pojavu snažnih potresa (s magnitudama oko 10), formiranje destruktivnih tsunamija i potencijalno buđenje drugih velikih vulkanskih sustava na Zemlji. Energija oslobođena tijekom erupcije mogla bi pokrenuti lančanu reakciju, aktivirajući supervulkane i velike vulkanske regije diljem

planeta. Ovi zaključci temelje se na matematičkim proračunima energetskih procesa i njihovom utjecaju na Zemljinu koru.

Sljedeće ćemo istražiti dodatne faktore rizika koji prijete čovječanstvu kao rezultat iznenadnog prodora sibirske perjanice.

Udarni val

Prema javno dostupnim podacima, erupcija supervulkana Yellowstone mogla bi osloboditi energiju ekvivalentnu otprilike 900.000 megatona i izazvati potres magnitude 11,2. S obzirom na to da je skala magnituda logaritamska (svako povećanje za cijeli broj predstavlja 32 puta veću energiju), erupcija sibirske perjanice, koja se procjenjuje da je 1.000 puta snažnija od Yellowstone-a, mogla bi rezultirati potresom magnitude 13,2. To bi bilo 350.000 puta snažnije od najjačeg potresa ikad zabilježenog—Velikog čileanskog potresa (magnituda 9,5, 1960. god.)—moglo bi nadmašiti utjecaj udara velikog asteroida.

Energija koja bi bila oslobođena, u veličini od otprilike 10^{24} džula, generirala bi izuzetno snažan udarni val na globalnoj razini. U središtu erupcije, tlak bi dosegao razine toliko ekstremne da bi stijene odmah isparile i bile izbačene u gornju atmosferu. Supersonični udarni val uništio bi

područja udaljena tisućama kilometara u nekoliko minuta, slično udaru meteorita u Tunguski, ali mnogo snažnije.

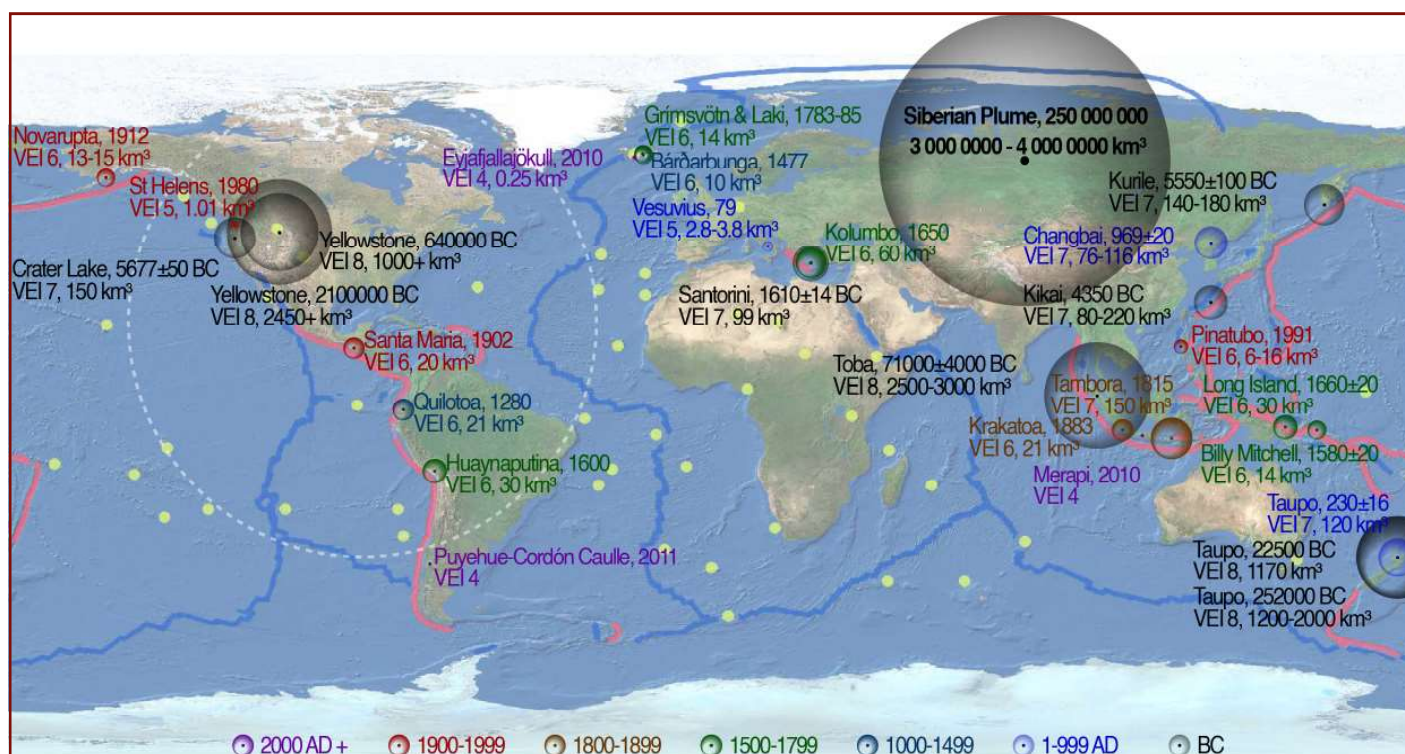
Masivni šumski požari izbili bi u sibirskoj tajgi, zatrpavajući ogromna područja debelim slojem vulkanskog pepela. Permafrost bi se brzo otopio na tisućama kilometara, oslobađajući značajne količine stakleničkih plinova. Krajolik bi pretrpio opsežna uništenja aktivacijom rasjeda Zemljine kore. Seizmički valovi širili bi se cijelim planetom, izazivajući dodatne potrese s magnitudama većim od 10.

U Arktičkom oceanu formirali bi se ogromni tsunamiji visoki stotine metara, prijeteći obalama Rusije, Kanade, Grenlanda i Skandinavije. Sekundarni tsunamiji pogodili bi obale Indonezije, Japana, Australije te Sjeverne i Južne Amerike. Globalni atmosferski poremećaji doveli bi do formiranja snažnih uragana i oluja.

Aktivacija Supervulkana i Vulkanskih sustava

Seizmički valovi koji bi nastali erupcijom sibirske perjanice širit će se ne samo kroz atmosferu i površinu Zemlje, već i duboko u unutrašnjost plašta. S obzirom na to da su svi supervulkani povezani kroz otopljene slojeve plašta, očekuje se da će seizmički valovi ove magnitude pokrenuti lančanu reakciju erupcija

unutar prvih 24 sata (Sl. 81.). Najveći vulkanski sustavi koji bi vjerojatno postali aktivni uključuju kalderu Yellowstone i Long Valley (Sjeverna Amerika), Flegrejska Polja (Apeninski poluotok), Toba (Sundski arhipelag), Aira kalderu (Japanski otoci) i Taupo vulkanski kompleks (Novi Zeland).



Slika 81.

Karta prikazuje globalnu distribuciju velikih vulkanskih erupcija, klasificiranih prema geološkim razdobljima od Prekambrija do danas.

Veličina simbola proporcionalna je volumenu izbačenog materijala (u km^3). Karta naglašava kronološki slijed erupcija s Indeksom vulkanske eksplozivnosti (VEI) ≥ 4 , ističući događaje poput Tobe (71.000 ± 4.000 pr. Kr., $2.500\text{--}3.000 \text{ km}^3$), Yellowstone (640.000 pr. Kr., $>1.000 \text{ km}^3$) i Tambore (1815. godine, 150 km^3). Slične erupcije očekuju se ako dođe do erupcije sibirske perjanice, s procijenjenim izlazom od $3\text{--}4$ milijuna km^3 . Crvene linije označavaju granice tektonskih ploča, ilustrirajući prostornu korelaciju s lokacijama velikih erupcija.

Osim supervulkana, erupcije će vjerojatno započeti na mnogim vulkanima duž Pacifičkog vatrenog prstena i drugih seizmički aktivnih zona. Postoji velika vjerojatnost ponovne aktivnosti na vulkanima poput planine Fuji (Japan), Krakatoa i Merapi (Indonezija), Vezuv i Etna (Italija), Popocatépetl (Meksiko), vulkanske skupine u Kamčatki, Andama i vulkanskim pojasima na Aljasci, kao i u subglacijalnim vulkanskim

sustavima u zapadnoj Antarktici.

Moguće je da će biti reaktivirani i uspavani vulkanski sustavi, uključujući stratovulkane Ararat (Anatolska visoravan), Kilimanjaro i Nyiragongo (istočnoafrički rift), vulkanski masiv Elbrus (Kavkaz), vulkan Laacher See (Srednja Europa) i vulkanski centri na Arapskom poluotoku.

Kisela kiša

Katastrofalno oslobađanje vulkanskog pepela i sumpor-dioksida tijekom erupcije uzrokovalo bi da oborine diljem svijeta poprimaju oblik kisele kiše. Da bismo ilustrirali razmjere emisija, možemo se referirati na erupciju supervulkana Yellowstone prije 630.000 godina, koja je u atmosferu ispuštala približno 500 megatona sumporovog dioksida. Ekstrapolirajući ovo na hipotetsku erupciju sibirske perjanice, emisije bi mogle doseći procijenjenih 1.500.000 megatona ($1,5 \times 10^{12}$ tona) sumporovog dioksida—oko milijun puta veće od emisija Tambore 1815. godine, koja je uzrokovala “Godinu bez ljeta”. Važno je napomenuti da ova procjena ne uzima u obzir emisije drugih vulkana koji bi mogli biti aktivirani lančanom reakcijom.

Takva koncentracija sumporovog dioksida dovela bi do formiranja aerosolnih čestica u stratosferi, koje bi se postupno ispirale tijekom desetljeća u obliku kisele kiše. Predviđa se da će primarno razdoblje kiselih oborina trajati od 3 do 10 godina, ovisno o klimatskim procesima i atmosferskoj cirkulaciji. Regije bliže epicentru, poput suvremenog Sibira, doživjele bi oborine s pH vrijednošću ispod 1,5, što je usporedivo s razrijeđenom sumpornom kiselinom.

Učinci bi uključivali uništavanje vegetacije,

poput korijena, lišća i grana, te ispiranje minerala iz tla, čineći ga nesposobnim za održavanje života. Vodeni ekosustavi također bi pretrpjeli ozbiljnu zakiseljenost, pretvarajući vodena tijela u otrovna kisela jezera s pH vrijednostima od 2 do 3. Ovi uvjeti bili bi fatalni za većinu oblika života.

Dodatno, infiltracija kiseline u sustave vodoopskrbe učinila bi pitku vodu neupotrebljivom bez naprednih sustava filtracije. Infrastruktura od cementa, mramora i metala bila bi podložna ubrzanom korodiranju uslijed sulfatnih spojeva.

Dok bi vrhunac intenziteta kiselih kiša nastao u prvim mjesecima nakon erupcije, oborine bi se postupno lokalizirale na specifične regije. Kako dolazi do vulkanske zime, velik dio oborina pretvorit će se u snijeg, smanjujući neposredni kiselinski pritisak na ekosustave. Međutim, do tog trenutka globalno uništenje flore i faune uzrokovano kiselom kišom bit će već nepovratno.

Šteta na ekosustavima imat će duboke posljedice na prirodne i ljudske procese znatno prije nego što globalno zahlađenje započne.

Vulkanska zima

Kumulativni učinak erupcije sibirske perjanice, pojačan istovremenim aktiviranjem brojnih vulkana, doveo bi do katastrofalne promjene globalne klime i ekoloških uvjeta. Ogromne emisije vulkanskog pepela, plinova (posebice sumporovog dioksida, SO₂) i aerosola u atmosferu formirale bi neprobojnu barijeru za sunčevo zračenje koja bi trajala desetljećima.

Visoka koncentracija sulfatnih aerosola u stratosferi reflektirala bi značajan dio Sunčevog zračenja, narušavajući energetski balans planeta. To bi dovelo do dramatičnog smanjenja topline koja dopire do površine Zemlje, što bi rezultiralo ekstremnim zahlađenjem klime—stanjem koje bi se moglo nazvati “hipervulkanskom zimom.” U takvim uvjetima, Zemlja bi nalikovala “ledenoj kugli,” s nastanjivim područjima ograničenim na male regije, prvenstveno u blizini ekvatora.

Projekcije mogućih utjecaja temelje se na povijesnim podacima iz značajnih erupcija. Primjerice, tijekom najveće erupcije Yellowstonea prije 2,1 milijun godina, globalne temperature smanjile su se u prosjeku za 3–5°C (5,4–9°F). Tijekom erupcije sibirske perjanice, čiji bi intenzitet daleko nadmašio taj događaj, procjenjuje se da bi prosječna temperatura Zemlje mogla pasti za približno 24–31°C (43,2–55,8°F).

U polarnim regijama očekuje se pad temperature od 28–36°C (50,4–64,8°F) ili više, što bi dovelo do potpunog smrzavanja ključnih vodenih površina, uključujući Sjeverni

Atlantik i značajne dijelove Tihog oceana. Temperature u srednjim geografskim širinama pale bi za 24–31°C (43,2–55,8°F), uništavajući svu vegetaciju i izazivajući masovno izumiranje organizama.

Oceanski ekosustavi pretrpjeli bi katastrofalno uništenje. Smrzavanje bi započelo na površini i duž obalnih područja, što bi dovelo do izumiranja morskog života na globalnoj razini. U ekvatorijalnim regijama predviđa se pad temperatura od 20–27°C (36,0–48,6°F), čineći čak i tropska područja prehladnima za održavanje života.

Gotovo sve kopnene površine postale bi neplodne zbog globalne hladnoće, tame i prestanka fotosinteze. Prehrambeni lanci bi se urušili, uzrokujući kolaps poljoprivrede i masovno izumiranje flore, faune te značajnog dijela čovječanstva. Održivima bi ostali samo izolirani mikrobni ekosustavi prilagođeni ekstremnim uvjetima.

Sulfatni aerosoli koji bi se zadržali u stratosferi nastavili bi blokirati sunčevu svjetlost desetljećima. Međutim, posljedice hipervulkanske zime osjećale bi se mnogo dulje. Čak i nakon što se pepeo i aerosoli slegnu, zbog zamrznutih oceana, širenja ledenjaka i radikalnih promjena u biosferi, Zemlji bi bile potrebne stotine, pa čak i tisuće godina da obnovi svoj prirodni klimatski i ekološki balans.

Zaključci o Scenariju 1: Iznenadni Proboj Sibirske perjanice

Iznenadna erupcija sibirske perjanice predstavljala bi katastrofalan geološki i klimatski događaj, pokrećući globalne promjene u atmosferi, hidrosferi i biosferi. Masivna eksplozija na visoravni Putorana trenutno bi uništila sve unutar radijusa od 150 km (93 milje), formirajući golemu kalderu. Piroklastični tokovi i lava proširili bi se na radijus od 1.500 km (932 milje), pretvarajući Sibir u spaljenu pustoš. Polovica Zemljine površine bila bi prekrivena pepelom.

Potres jačine do 13,2 stupnja, uzrokovan eksplozijom vulkanske perjanice, generirao bi razorne seizmičke valove koji bi se proširili planetom, aktivirajući rasjede, sekundarne potrese i megatsunamije visoke stotine metara, potapajući obalne zone kontinenata.

Ispuštanje 1,5 milijuna megatona sumporovog dioksida (SO₂) rezultiralo bi kiselim kišama s pH vrijednošću ispod 1,5, uništavajući tlo, vegetaciju i vodene ekosustave. Vodene površine postale bi nenastanjive, a kopno bi brzo izgubilo plodnost. Kolaps fotosinteze i prehrambenih lanaca doveo bi do masovnog izumiranja flore, faune i ljudske civilizacije.

Masivna aktivacija supervulkana, uključujući Yellowstone, Campi Flegrei i Toba, pogoršala bi globalne klimatske promjene povećanjem emisija vulkanskog pepela, sumporovog dioksida (SO₂) i aerosola. Njihovo nakupljanje u stratosferi blokiralo bi sunčevu svjetlost, uzrokujući planetarno zahlađenje ("hipervulkanska zima") i padove temperatura za desetke stupnjeva. U polarnim regijama temperature bi pale za više od 28–36°C (50,4–64,8°F); u umjerenim područjima za 24–31°C (43,2–55,8°F); a u tropima za 20–27°C (36,0–48,6°F). To bi dovelo do zamrzavanja oceana, zaustavljanja oceanske cirkulacije, kolapsa ekosustava i formiranja masivnih ledenjaka na kopnu.

Posljedice hipervulkanske zime učinile bi Zemlju praktički nenastanjivom, s prirodnim uvjetima koji bi zahtijevali tisuće do milijune godina za oporavak. Takav događaj označio bi najveće izumiranje u geološkoj povijesti planeta.

Scenarij 2:

Postupna erupcija sibirske perjanice

Drugi scenarij predviđa postupnu seriju erupcija i tokova lave kroz pukotine i oslabljena područja u Zemljinoj kori, umjesto jednog eksplozivnog događaja. Ovaj proces je usporediv s formiranjem Sibirskih trapi, u istoj regiji na kraju Permskog perioda prije 250 milijuna godina.

Formiranje provincija Sibirskih trapi označilo je najveću manifestaciju vulkanizma na zemlji. Tijekom tog razdoblja, Zemlja je doživjela najveću ekološku katastrofu u svojoj povijesti – permsko-trijasko masovno izumiranje, u kojem

je nestalo do 90% morskih vrsta i 70% kopnenih vrsta (Sl. 82., 83.).

Geološki dokazi⁵¹ ukazuju da su sibirske erupcije možda bile neuobičajeno eksplozivne (Campbell i sur., 1992), s piroklastičnim naslagama koje su dosezale debljine do 800 metara (0,5 milja) (Khain, 1985). Izuzetno eksplozivna priroda erupcija izbacivala je sedimentne stijene s dubina do 10 km (6,2 milje).



Slika 82.
Umjetnički prikaz erupcija u Sibiru tijekom Permijsko-trijaskog izumiranja.

Ilustracija: Slika Tigrana Nshanyana

Slika 83.
Umjetnički prikaz listrosaurova, preživjelih masovno izumiranje, koji dominiraju pustim krajolikom, ilustrirajući promjene ekosustava nakon permsko-trijaskog kriznog razdoblja.

Ilustracija: 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>

Vulkanska aktivnost u toj regiji odvijala se u nekoliko faza, drastično mijenjajući geološki krajolik. U početku, magma je prodrla u sedimentne slojeve, formirajući razna intruzivna tijela, poput nabora. Kasnije, stil erupcije prešao je u eksplozivan, što je rezultiralo ispuštanjem masivnih količina piroklastičnog materijala i formiranjem debelih vulkanskih naslaga. Kulminacija ovog procesa bila je erupcija kolosalnih količina bazaltne lave, mjerena u stotinama tisuća kubičnih kilometara. Ukupni volumen vulkanskih stijena, uključujući intruzije, piroklastične naslage i lave, procjenjuje se na približno 3 milijuna kubičnih kilometara. Važno je napomenuti da ovaj broj odražava samo stijene koje su preživjele do danas, a može se sigurno tvrditi da je početna veličina erupcija bila mnogo veća, no od tada su erodirane.

Formiranje Sibirskih trapa dovelo je do kolosalnih emisija ugljikovog dioksida (CO₂), sumporova dioksida (SO₂), klorovodika (HCl) i drugih hlapljivih spojeva. Ovi plinovi značajno su pojačali učinak staklenika, uzrokujući brzo zagrijavanje nakon vulkanske zime. Koncentracija CO₂ u atmosferi dosegla je 8.000 ppm, što je 20 puta više od današnje razine. Kao rezultat toga, temperatura tropskih mora porasla je s 22–25 °C na 30 °C, a oceani su se počeli zakiseljavati, što je dovelo do izumiranja organizama s karbonatnim skeletima.

Ukupna emisija sumpora iznosila je do 7.800

gigatona, klora do 8.700 gigatona, a fluora do 13.600 gigatona⁵².

Vulkanski pepeo i aerosoli blokirali su sunčevu svjetlost, ometali fotosintezu te uzrokovali masovnu deforestaciju i kolaps hranidbenih lanaca, dodatno pogoršavajući izumiranje biljnih i životinjskih vrsta.

Ekološka kriza tog razdoblja naglašava potencijalni razmjer posljedica čak i kod postupne erupcije sibirske perjanice.

Istraživanja pokazuju da je razdoblje erupcija prije 250 milijuna godina bilo potaknuto uzdizanjem perjanice plašta — masivnog toka magme koji se uspinjao iz dubine Zemlje ispod današnje visoravni Putorana. Ponovno pojavljivanje ovog scenarija danas rezultiralo bi stvaranjem golemih bazaltnih visoravni, jednih od najvećih geoloških formacija na planetu, koje bi uništile gotovo sav život unutar tisuća kilometara, uključujući Sibir i susjedne regije. Geološki zapisi otkrivaju da su se takve katastrofe, obilježene izlivanjem ogromnih bazaltnih polja⁵³, događale više puta, svaki put pokrećući masovna izumiranja velikih razmjera. (Sl. 84.).

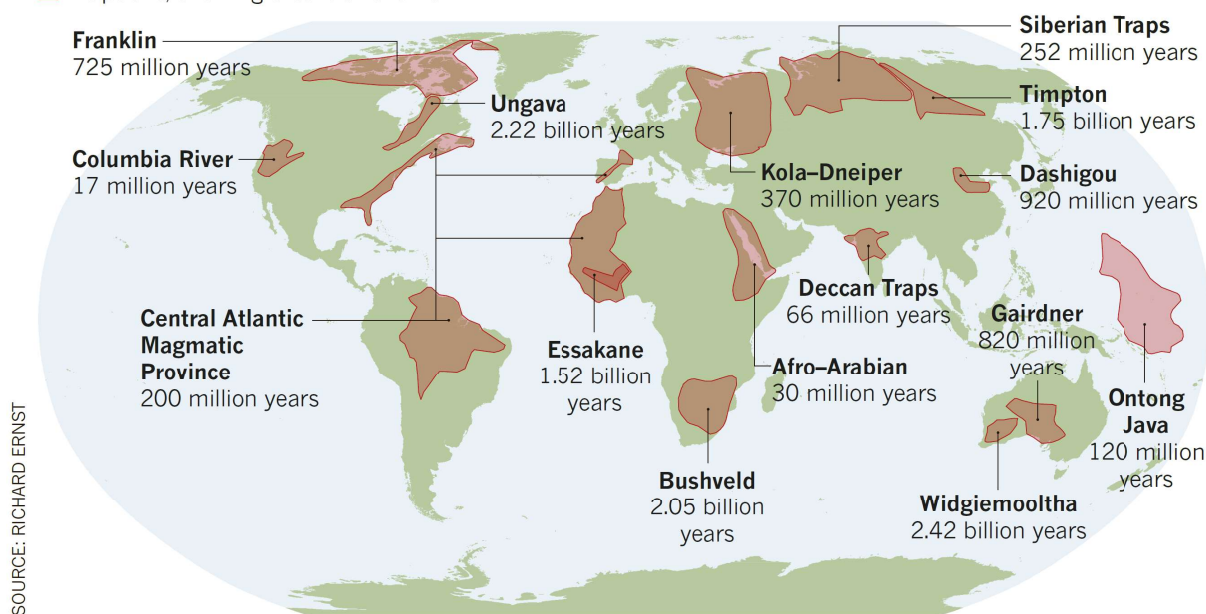
⁵²Benjamin A. Black, Linda T. Elkins-Tanton, Michael C. Rowe, Ingrid Ukstins Peate, Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps, *Earth and Planetary Science Letters*, Volumes 317–318, 2012, Pages 363-373, ISSN 0012-821X, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001>

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



SOURCE: RICHARD ERNST

Slika 84.

Karte prikazuje geografske lokacije i starosti najvećih vulkanskih erupcija u povijesti Zemlje, zajedno s pripadajućim visoravnima lave koje su formirale ove erupcije.

Ilustracija: Richard Ernst.

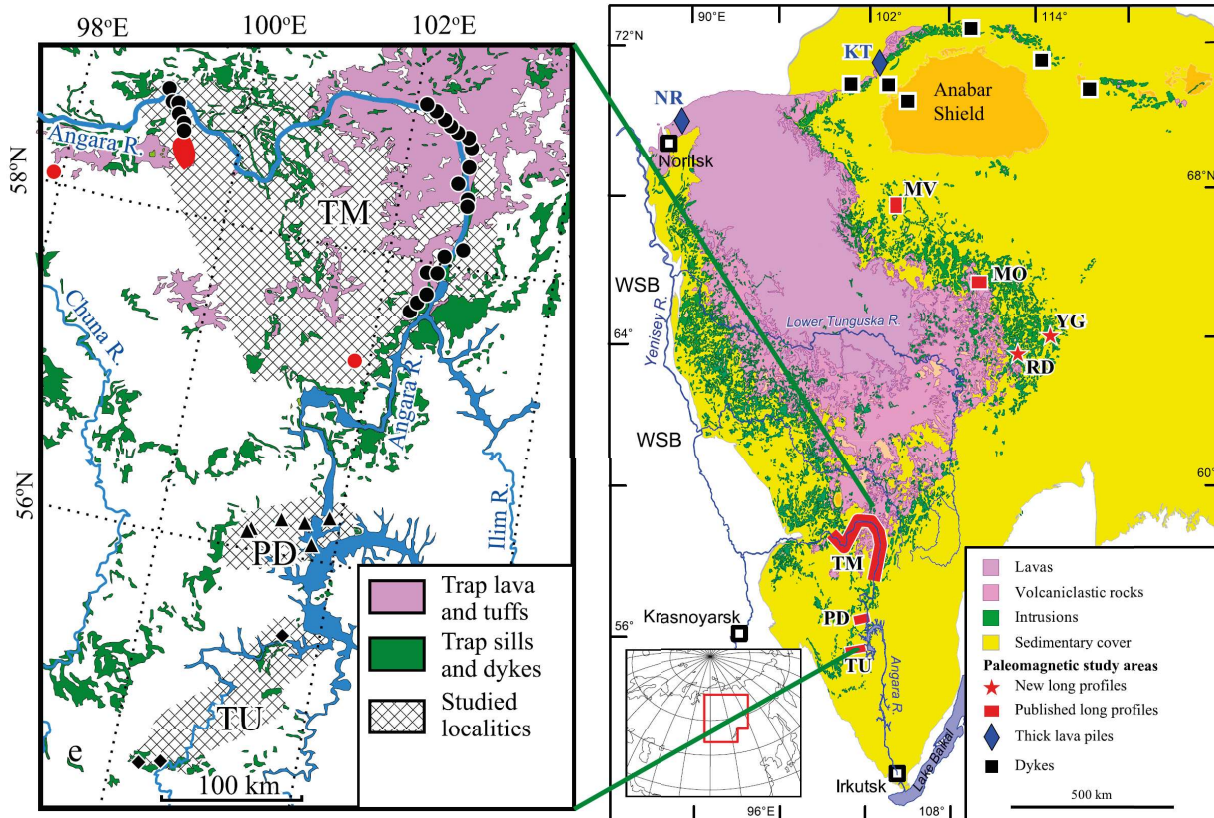
Izvor: Witze, A. (2017). Earth's lost history of planet-altering eruptions revealed. *Nature*, 543, 295-296.

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

Kao i u prethodnim geološkim epohama, magma će se uzdizati iz plašta, prodirući kroz pukotine u Zemljinoj kori, slično kao mekani materijal koji se probija kroz gusti filter. Ovaj proces dovest će do pregrijavanja površine, stvaranja brojnih intrakrustalnih magmatskih intruzija i topljenja litosfere.

Slika 85. prikazuje raspodjelu efuzivnih stijena u Sibiru: lavni tokovi su prikazani ljubičastom bojom, a magmatska tijela koja su se stvrdnula

unutar Zemljine kore označena su zelenom bojom. Zelene zone na karti ističu kako je magma erodirala Zemljinu koru, stvarajući pukotine i šireći se duž ovih oslabljenih područja. Povećani tlak magme mogao bi ponovno pokrenuti sličan proces s potencijalno katastrofalnim posljedicama.



Slika 85.

Kartica desno daje pregled provincije Sibirskih trapa (pojednostavljeno i modificirano prema Svensen i dr., 2009), s ključnim geološkim strukturama označenim različitim bojama: ružičasta za tokove lave, zelena za intruzivna tijela, i žuta za sedimentni pokrivač. Detaljna karta lijevo ilustrira raspodjelu magmatizma trapa: ljubičasta predstavlja lave i sedru, a zelena označava slojeve i nasipe.

Izvor: 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.

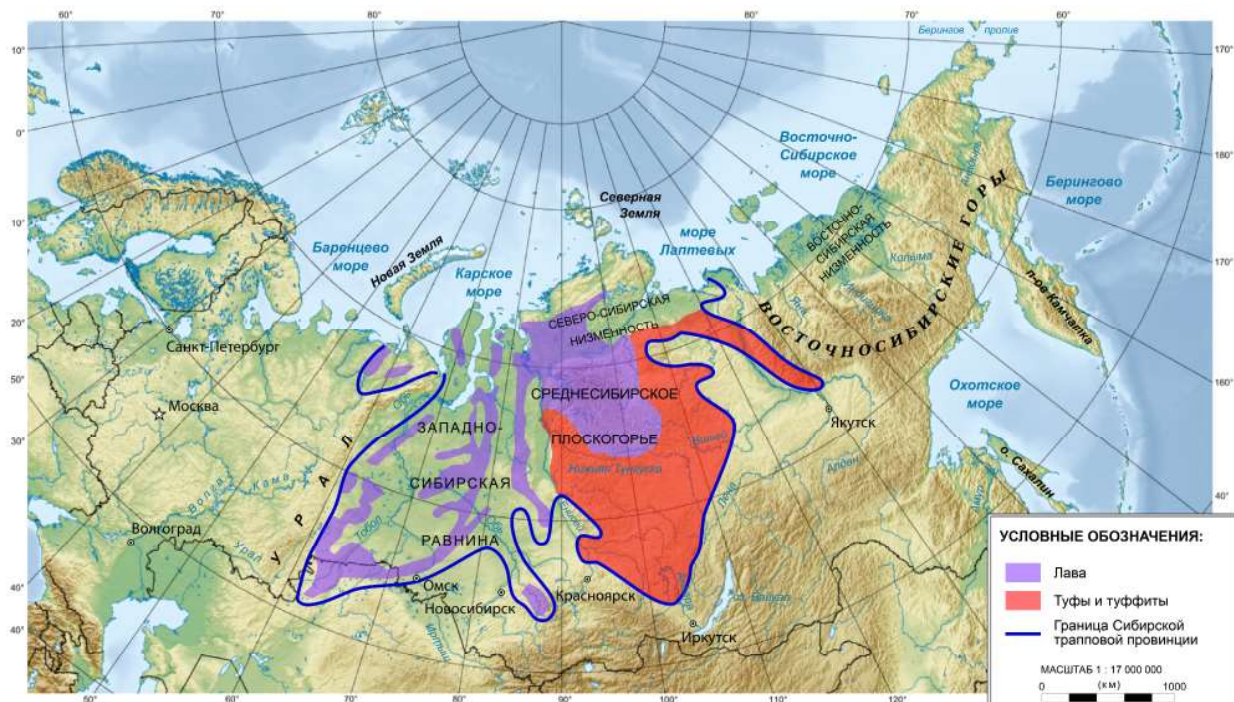
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029>

Scenarij postupnih erupcija usporediv je s iznenadnom eksplozijom sibirske perjanice ali rastegnutom kroz vrijeme. Može se zamisliti kao niz vulkana koji eruptiraju tjedno uz iznenadne pukotine koje oslobađaju bazaltne tokove lave širom Zapadnog Sibira.

Slika 86. ilustrira ove procese, pri čemu su regije lavnih tokova označene ljubičastom bojom. Lava se širila po velikim područjima u dijelu gušće, stabilnije kore Istočnog sibirskog platoa. Nasuprot tome, u Zapadnom Sibiru—koji se odlikuje tanjom, mlađom i heterogenijom korom—erupcije su se događale duž izduženih

depresija ili pukotina. Karta ističe zone tufova, prikazane crvenom bojom, koje se sastoje od cementiranih piroklastičnih fragmenata i pepela.

Erupcije u Istočnom i Zapadnom Sibiru značajno bi se razlikovale. Ispod Istočnog Sibira, magma nailazi na gusti arhejski kraton, stvarajući značajnu prepreku. Kako raste, magma se „ukopava“ u matičnim stijenama, hladi se i obogaćuje hlapljivim komponentama. To dovodi do eksplozivnih erupcija s visokim emisijama pepela i potencijalnim stvaranjem kisele, viskozne magme.



Slika 86.

Karta područja Sibirskih trapa, koja prikazuje glavne geološke strukture, uključujući područja tokova lave (ljubičasta) i tufove s tufitima (crvena). Plave linije označavaju granice područja Sibirskih trapa.

Izvor: wikipedia.org, na temelju podataka iz Masaitis, 1983.

U Zapadnom Sibiru, s njegovom tankom, mladom korom, erupcije će se uglavnom karakterizirati izlivanjem tekuće bazaltne lave.

Područje koje se očekuje da će biti prekriveno tokovima lave i tufovima iznosi približno 7 milijuna km² (2,7 milijuna) širom Zapadnog i Istočnog Sibira, što je usporedivo s veličinom suvremene Australije. Međutim, regije podložne degradaciji vjerojatno će premašiti desetke milijuna kvadratnih kilometara. Ova će područja doživjeti masivne šumske požare, eroziju uzrokovanu kiselim kišama, padanje pepela, klizišta i lahare koji nose vulkanske naslage. Sav permafrost u Sibiru bit će u opasnosti od uništenja.

Valja napomenuti da poluotok Taimyr, zapadno od Putorana platoa, sadrži najveća svjetska nalazišta nikla, bakra i metala platinske skupine, koje razvija tvrtka Norilsk Nickel. Ova nalazišta su

magmatskog podrijetla i nastala su prije otprilike 250 milijuna godina tijekom erupcija magmatske oblasti sibirske perjanice, što je omogućilo stvaranje jedinstvenih rudnih čvorova. Visoka koncentracija nikla u magmama tog vremena vjerojatno je povezana s transportom materijala iz Zemljinog jezgra prema površini.

Uspon sibirske magmatske perjanice je u tijeku, a njezino ubrzanje povezano je s pomakom jezgre prema poluotoku Taimyr 1998. godine, kako je utvrdio dr. Yuri Barkin. U bliskoj budućnosti postoji značajan rizik od proboja sibirske perjanice u blizini grada Norilsk — stvarne lokacije na kojoj je došlo do sličnog događaja prije 250 milijuna godina.

Sljedeće, razmotrit ćemo posljedice koje bi ovaj scenarij imao za Rusiju i svijet.

Posljedice postupnog probijanja sibirske perjanice za Rusiju

Istraživanja su precizno mapirala lokacije astenosfernih slojeva otopljenog materijala unutar litosfere južnog Sibira, što je povezano s tankom korom tog područja. Međutim, sjeverni dio Sibira ostaje uglavnom neistražen na seizmičkim kartama, što predstavlja “bijelu točku” u istraživanjima donje kore i plašta. Ovaj nedostatak podataka čini nemogućim predviđanje lokacija početnih proboja lave i erupcija magme bogate plinovima, osobito s obzirom na izostanak sveobuhvatnog podzemnog praćenja u zoni sibirske perjanice.

Prvi znakovi nadolazeće katastrofe poznati su po povećanoj seizmičkoj aktivnosti i lokaliziranim emisijama plinova. Kako magma napreduje prema površini, početak će brzo topljenje permafrosta, što će dovesti do destabilizacije infrastrukture izgrađene na permafrostnim tlima. Zagrijavanje tla također može izazvati eksplozije plinskih hidrata (metan zarobljen u ledenim strukturama), što će uzrokovati stvaranje masivnih kratera i uništavanje naselja.

Masivni šumski požari postat će neizbježni, potaknuti otpuštanjem metana, pregrijavanjem tla i emisijama vulkanskih plinova. Nalazišta ugljikovodika u Sibiru i ugljeni bazeni poput Kuzbassa mogli bi se zapaliti, kao što se dogodilo tijekom permsko-trijaskog razdoblja⁵⁴, kada su se ležišta ugljena termički zagrijavala na 600°C (1,112°F).

Erupcije bi počele iznenada, zahvaćajući više točaka na ogromnom teritoriju. Potresi magnituda 7-8, u kombinaciji s pukotinama i rasjedima,

rezultirali bi tokovima lave koji bi prekrili stotine tisuća četvornih kilometara. Oko probijanja lave, toksične emisije izazvale bi masovne smrtne slučajeve među biljkama, životinjama i ljudima, stvarajući smrtonosni “koktel” u atmosferi.

Unutar prvih nekoliko dana, milijuni ljudi bi poginuli. Vulkanski pepeo uništio bi prometne mreže, nakupljajući se na cestama i željezničkim prugama, smanjujući vidljivost i devastirajući infrastrukturu. Zračni promet bi potpuno stao zbog opasnosti koju pepeo predstavlja za motore zrakoplova.

Topljenje permafrosta dodatno bi pogoršalo krizu: prometne rute, plinovodi, zgrade i infrastruktura počeli bi se urušavati. Mnoge bi gradove lišile pristupa vodi, hrani i opskrbi električnom energijom, izazivajući humanitarnu krizu. Masovna evakuacija bila bi nemoguća u velikom dijelu zone erupcije, jer bi lava, plinovi, požari i kisela kiša učinili prometne rute neupotrebljivima. Panika bi zahvatila milijune ljudi, a naponi da se preseli stanovništvo Sibira doveli bi do društvene nestabilnosti i široko rasprostranjenih nemira.

Gospodarstvo zemlje pretrpjelo bi katastrofalne gubitke. Proizvodnja nafte, plina, ugljena, dijamanata i metala prestala bi zbog fizičkog uništenja infrastrukture, zaustavljajući industrijske operacije i stvarajući nestašicu sirovina i energije. Vulkanska aktivnost uništila bi prirodne resurse tog područja, uključujući naftna i ugljena nalazišta, čime bi nestali ključni ekonomski resursi za zemlju.

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>

Desetljećima nakon erupcije, Sibir bi ostao ekološka katastrofa. Katastrofa bi nepovratno promijenila geografiju, gospodarstvo i društvo Rusije. Samo 25% teritorija zemlje ostalo bi nastanjivo, no suočavalo bi se s ogromnim

pritislima zbog ekoloških i društvenih kriza. Ekonomska uporišta, povijesne znamenitosti i veliki dio prirodnog bogatstva zemlje bili bi izgubljeni, čineći Sibir nenastanjivim za modernu civilizaciju.

Globalne posljedice postupnog izbijanja sibirске perjanice

Globalne posljedice erupcije sibirске perjanice utjecat će na cijeli svijet, razvijajući se kroz nekoliko faza.

U prvih nekoliko dana, promet između Europe i Azije preko Sibira prestao bi, a zračni promet bi stao zbog vulkanskog pepela u atmosferi. Ove smetnje paralizirale bi globalnu logistiku, pokrećući velike prehrambene krize, jer bi Rusija, vodeći izvoznik pšenice i drugih proizvoda, zaustavila isporuke. Obustava izvoza nafte, plina i drugih resursa iz Rusije dovela bi do porasta cijena, energetske krize i ekonomske nestabilnosti u brojnim zemljama. Lančana reakcija financijskih i društvenih previranja proširila bi se kroz globalno gospodarstvo.

Oblaci pepela i sumporni aerosoli stvorili bi globalni efekt zamračenja, smanjujući sunčevu radijaciju i izazivajući "vulkansku zimu" s padom temperature od 2–3°C. Kisela kiša i kontaminacija tla uništavali bi poljoprivredu ne samo u Rusiji, već i širom svijeta. Široko rasprostranjeni glad, nestašica vode, otrovan zrak i slom klimatskih sustava doveli bi do postupnog izumiranja milijardi ljudi i životinja. Unutar nekoliko godina, društveni sustavi bi se urušili.

S vremenom će vulkanski pepeo početi padati, ali nastupit će nagle klimatske promjene. Otpuštanje metana i ugljičnog dioksida iz otapajućeg permafrosta pojačat će efekt staklenika. Temperature će postupno porasti za 5–10 °C, što će dovesti do nestabilne klime karakterizirane oštrim temperaturnim oscilacijama. Uništavanje ozonskog sloja uzrokovat će povećanje razine ultraljubičastog zračenja na sjevernoj hemisferi, pogoršavajući posljedice erupcija.

Unatoč udaljenosti od Sibira, Europa bi pretrpjela ozbiljne posljedice od erupcije sibirске perjanice. Pepeo bi prekrrio sjevernu i istočnu Europu, uzrokujući široko rasprostranjene respiratorne bolesti. Kisela kiša uništavala bi šume, urbanu infrastrukturu i poljoprivredna zemljišta. Nakon faze privremenog hlađenja, uslijedio bi nagli trend zagrijavanja, donoseći suše na jug i poplave u srednjoj i sjevernoj Europi.

Masovna migracija iz Rusije, Azije i Bliskog istoka pokrenula bi demografski krizni val i povećano natjecanje za resurse. Europske zemlje suočavale bi se s trajnim ekološkim, ekonomskim i društvenim izazovima.

Azija bi nosila najveći teret posljedica erupcije, budući da je najbliža epicentru. Zagađenje zraka prašinom i pepelom izazvalo bi široko rasprostranjene respiratorne smetnje i kiselu kišu, osobito u Kini, Mongoliji i Kazahstanu. Smanjena sunčeva svjetlost i pogoršanje kvalitete tla također bi uništili poljoprivredno srce sjeverne Kine, ključnu regiju za proizvodnju hrane.

Fluktuacije temperatura izazvale bi havariju infrastrukture i poljoprivrednih sustava diljem kontinenta. Postupno zagrijavanje oceana

dovelo bi do deoksigenacije, uništavajući morske ekosustave i kolapsirajući ribarstvo.

S vremenom, kontinuirane erupcije pogoršavale bi globalnu destrukciju. Klimatske i ekološke krize intenzivirale bi se, brišući velik dio ljudskog tehnološkog i intelektualnog napretka, gurnuvši civilizaciju u duboku regresiju. Čovječanstvo bi se našlo na rubu potpune društvene propasti.

Dugoročne posljedice postupnog probijanja sibirske perjanice za planet

Postupna erupcija sibirske perjanice dovela bi do dubokih i dalekosežnih posljedica, transformirajući planet na milijune godina. Atmosfera bi bila zasićena toksičnim tvarima, što bi rezultiralo planetarnom kiselom kišom i uništenjem ozonskog sloja. To bi pojačalo ultraljubičasto zračenje i dodatno destabiliziralo globalne klimatske sustave.

Oceani bi doživjeli kritičnu zakiseljenost, što bi uzrokovalo masovno izumiranje morskog života. To bi dovelo do kolapsa morskih ekosustava, poremetilo globalne prehrambene lance i rezultiralo gubitkom gotovo svih morskih vrsta.

Na kopnu, posljedice toksičnih emisija, uništavanje tla i gubitak većine biljnih vrsta doveli

bi do masovnog izumiranja. Bez oprašivača, kopneni ekosustavi bi se urušili, a procjenjuje se da bi 75 do 95% postojećih vrsta nestalo.

Kao rezultat erupcije, nastat će sveobuhvatna klimatska, biološka i geološka kriza koja će potpuno transformirati biosferu Zemlje. Ovaj proces dovest će do kolapsa ljudske civilizacije, smrti milijardi ljudi i regresije preživjelih, fragmentiranih ljudskih skupina na razinu razvoja iz kamenog doba. Skala ove katastrofe bit će usporediva s najvećim masovnim izumiranjima u povijesti Zemlje, označavajući početak nove evolucijske faze za biosferu koja će trajati barem milijune godina.

Scenarij 3:

Planirano i Kontrolirano Otplinjavanje

Postojeće Vulkanske Metode Geoinženjeringa

S obzirom na sve veći pritisak ispod Zapadnosibirske ploče i Istočnosibirskog kratona, uzrokovan podizanjem sibirske perjanice, nužno je poduzeti hitne mjere kako bi se minimizirale potencijalne posljedice. Jedno od mogućih rješenja je kontrolirano oslobađanje pritiska, lave i plinova koji se približavaju površini iz sekundarnih komora, odnosno **planirano otplinjavanje**.

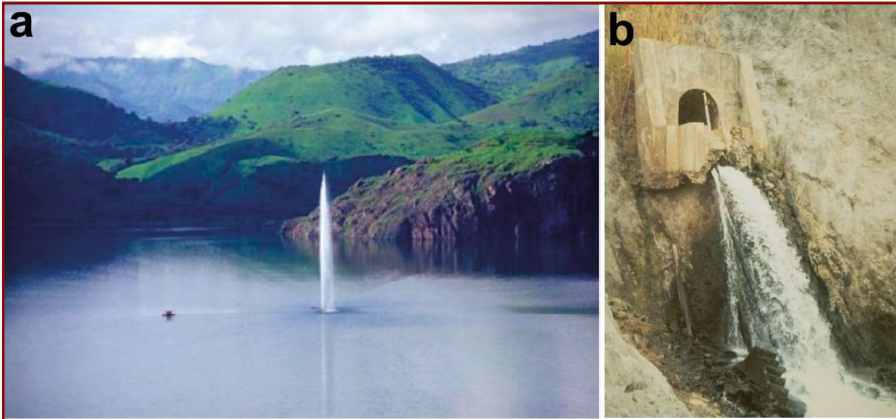
Suvremena znanstvena istraživanja smatraju otplinjavanje magmatskih komora održivom metodom za sprječavanje velikih erupcija. Ovaj pristup podržava primjenu vulkanske geoinženjerske tehnologije, ne samo za vulkane ili supervulkane, već i za upravljanje aktivnostima perjanica plašta. Brojne znanstvene publikacije i patenti koje su razvili stručnjaci iz različitih zemalja istražuju koncept kontroliranog otplinjavanja.

Teorijske osnove vulkanskog geoinženjeringa postavljene su u 20. stoljeću, uz praktične eksperimente provedene tijekom prošlog stoljeća. Metode vulkanske intervencije uključivale su bušenje kratera, isušivanje vulkanskih jezera, stvaranje kanala za preusmjeravanje tokova lave, hlađenje tokova lave morskom vodom, bombardiranje tokova lave

i izvlačenje stakleničkih plinova poput ugljičnog dioksida i metana (Sl. 87).

Od 1960-ih godina, Geološka služba SAD-a (USGS) provodi operacije bušenja u područjima vulkanskih jezera na vulkanu Kilauea na Havajima kako bi preusmjerila tokove lave. Slične inicijative provedene su u Japanu, Islandu i Italiji. Na primjer, Japan je testirao tehnologije za smanjenje pritiska u magmatskim komorama. Island je uspješno preusmjerio tokove lave, poput onih na otoku Heimaey, gdje je lava hlađena pomoću vodenih topova. U Italiji su razvijeni sustavi za rano upozoravanje i metode za kontrolu tokova lave, uključujući eksplozivno uništavanje barijera lave na planini Etna 1983. godine.

Međunarodne znanstvene konferencije i simpoziji o dubokom bušenju u zonama vulkanske i geotermalne aktivnosti šire potencijalne primjene vulkanskog geoinženjeringa za sprječavanje erupcija i ublažavanje njihovih globalnih posljedica.



Slika 87.

(a) Otplinjavanje ugljičnog dioksida iz jezera Nyos, Kamerun, kako je dokumentirano od strane Halbwachs i dr. (2020).

(b) Tunel za drenažu u zidu kratera vulkana Kelud, Indonezija (Global Volcanism Program, slika GVP-01120).

(c) Pomoćno bušenje magmatske komore na Krafli, Island, 2009. (slika ljubaznošću GO Friðleifsson/IDDP).

(d) Hlađenje tokova lave injekcijom morske vode na Heimaeyu, Island, 1973. (Tristan H. Benediktsson).

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

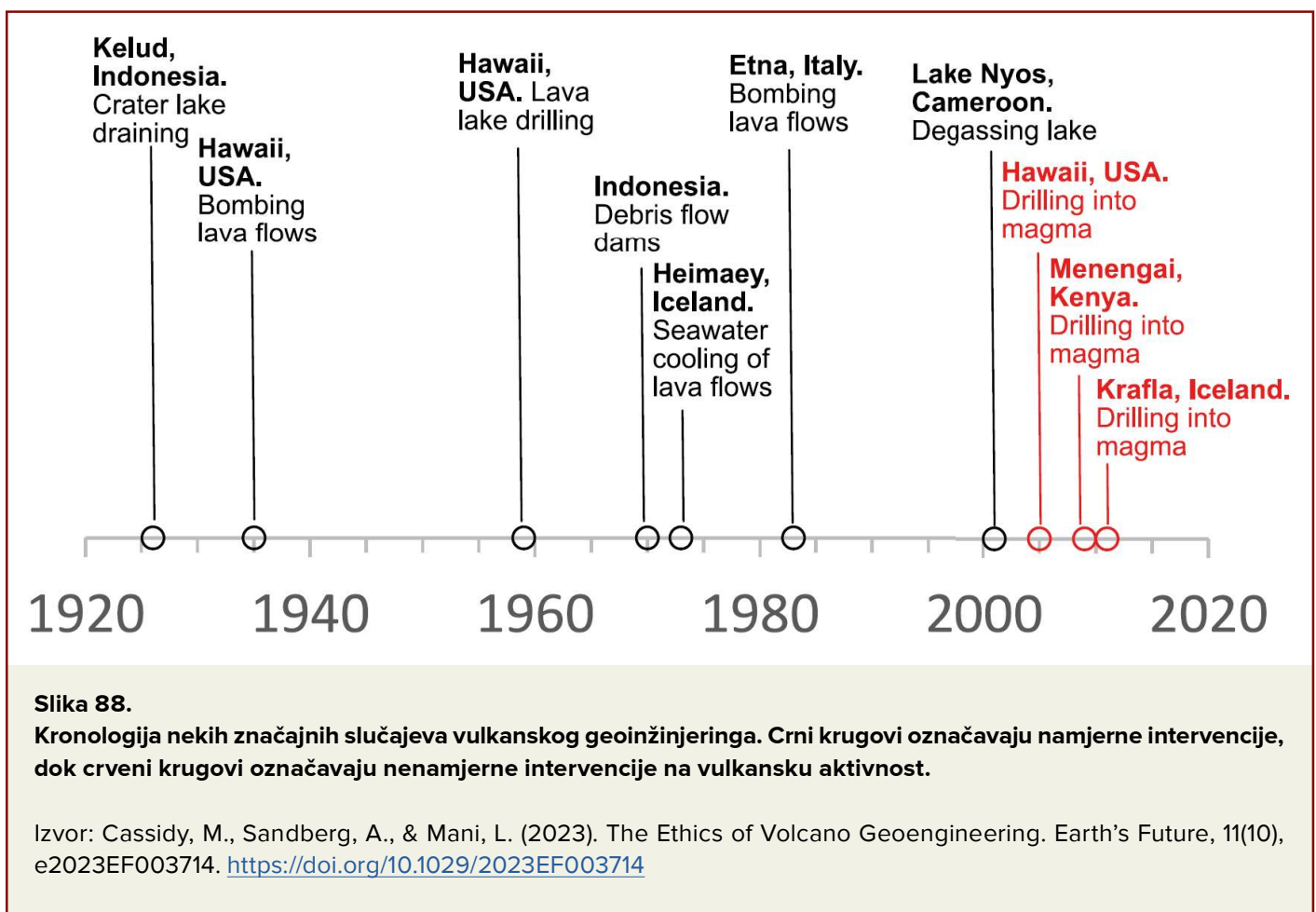
<https://doi.org/10.1029/2023EF003714>



Dijagram na sl. 88. prikazuje kronologiju najistaknutijih slučajeva vulkanskog geoinžinjerina. Crni krugovi predstavljaju namjerne intervencije, dok crveni krugovi označavaju nenamjerne učinke na vulkansku aktivnost.

Postoje i patentirane metode za planirano otpinjavanje i smanjenje rizika od vulkanskih i supervulkanskih erupcija.

Na primjer, tehnologija koju su patentirala dva ruska stručnjaka uključuje sprječavanje nekontroliranih, kaskadnih vulkanskih erupcija korištenjem bušenja pod kutom kako bi se regulirao pritisak unutar magmatskih komora (Sl. 89.).





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):

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

(73) Патентообладатель(и):

Мкртычян 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 3 4 3 5 0 8 C 1

Slika 89.**Patent: Metoda za sprječavanje vulkanske erupcije nalik lavini.**

Ovaj izum odnosi se na metode za sprječavanje nekontroliranih, vulkanskih erupcija nalik lavini i za organiziranje kontroliranog transporta magme za potrebe gradnje. Poboljšava učinkovitost pristupa.

Sažetak izuma:

Metoda uključuje upravljanje pritiskom u sekundarnim magmatskim komorama ispod sulfatno aktivnih vulkana. To se postiže bušenjem kanala pod kutom u dno sekundarne magmatske komore. Komprimirani plin se ubrizgava u komoru kako bi povećao pritisak, usporavajući tako dotok magme iz primarne komore. Istovremeno, magma nakupljena u sekundarnoj komori se izvlači i transportira za građevinske potrebe kroz izbušene kanale. Proces osigurava da pritisak ne dostigne kritične razine, koje bi mogle izazvati erupciju nalik lavini.

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

Druga tehnologija razvijena je od strane američkog izumitelja (Sl. 90.). Ova tehnologija opisuje metode za evakuaciju magme iz vulkanskih magmatskih komora, poput komore supervulkana Yellowstone, kako bi se spriječila potencijalne katastrofalne erupcije.

Osnovna ideja uključuje stvaranje umjetnih kanala (cijevi) za usmjeravanje magme prema površini, gdje se može obraditi i potencijalno iskoristiti, na primjer, u proizvodnji energije.

(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**

(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.

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

FOREIGN PATENT DOCUMENTS

(21) Appl. No.:	10/230,549	GB	2362410	11/2001
(22) Filed:	Aug. 29, 2002	JP	070071020 A	3/1995
(65) Prior Publication Data		JP	100076104 A	3/1998
		JP	100077952 A	3/1998
		JP	100078497 A	3/1998

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)

(52) **U.S. Cl.** 405/131; 405/258.1; 405/303; 166/302; 166/57

(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.

(56) **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

3,115,194 A * 12/1963 Adams 376/273

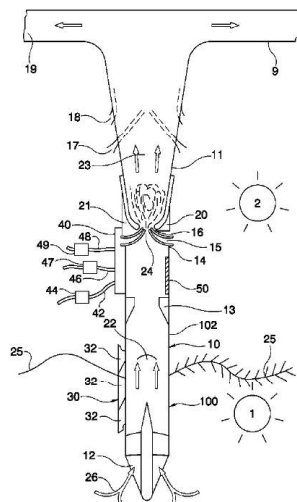
* cited by examiner

Primary Examiner—Tara L Mayo
(74) *Attorney, Agent, or Firm*—Woodard, Emhardt, Moriarty, McNett & Henry LLP

(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



Slika 90.

Patent: Sustavi za evakuaciju magme u prevenciji eksplozija supervulkana.

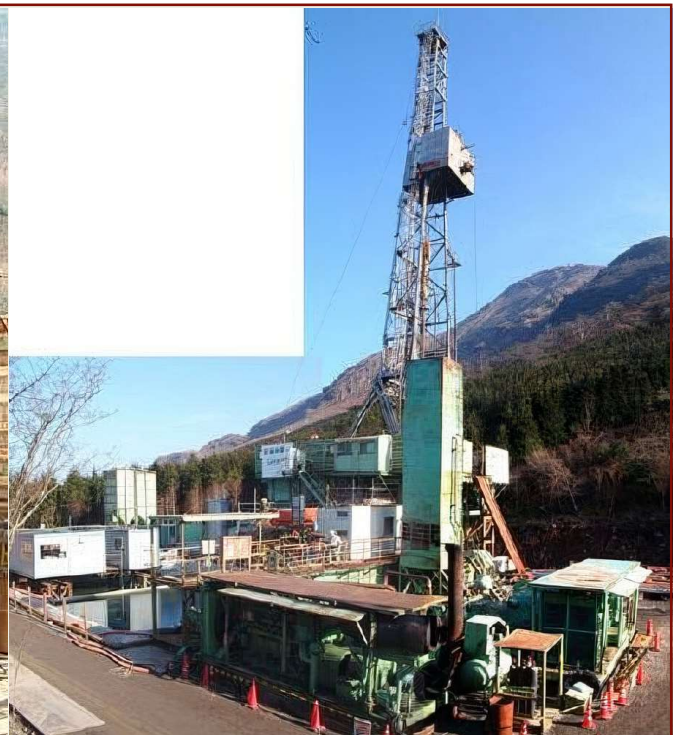
Uređaj kontrolira evakuaciju vulkanske magme kako bi se spriječila eksplozije. Evakuacija magme odvija se kroz jednu evakuacijsku cijev koja zagrijava tok magme unutar cijevi kako bi se spriječilo njezino lijepljenje na cijev. Zagrijavanje može koristiti male komore za izgaranje koje zagrijavaju paru, koja zatim zagrijava i stabilizira tok magme. Stabilnost se poboljšava pomoću središnjeg hlađenja, kada je potrebno, korištenjem vodenih mlazova iz mlaznica smještenih na zidu cijevi.

Izvor:

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

Primjer uspješnog otplinjavanja je japanski projekt [“Unzen Scientific Drilling Project”](#) (USDP), šestogodišnja inicijativa pokrenuta u travnju 1999. godine. Cilj projekta je proučiti povijest rasta, podzemnu strukturu i procese uspinjanja magme vulkana Unzen (Sl. 91.). Prva faza uključivala je bušenje dviju bušotina na padinama vulkana i izradu strukturnog modela.

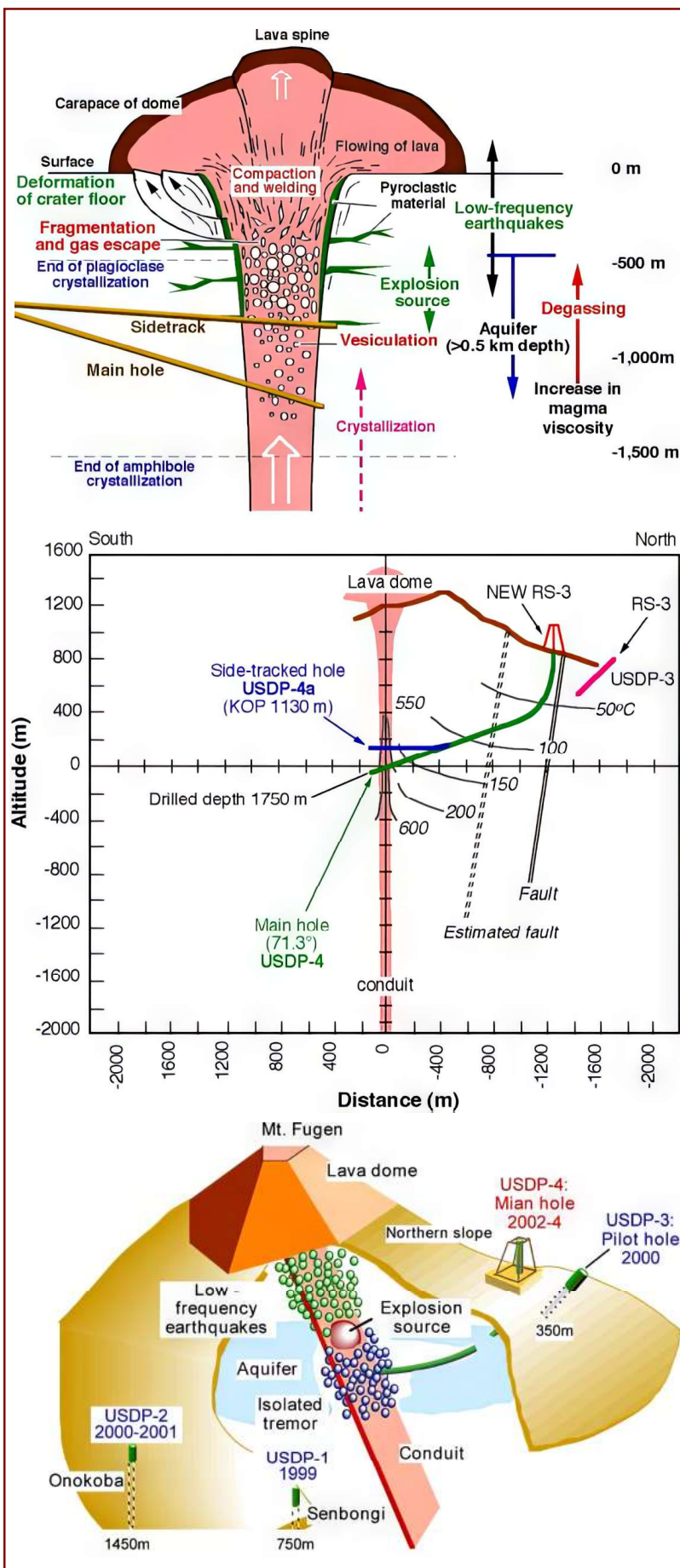
Druga faza bila je fokusirana na bušenje u magma kanal iz erupcija 1990–1995. godine kako bi se analizirao mehanizam otplinjavanja. Strategija bušenja uključivala je vertikalno bušenje, a potom postupno povećanje nagiba bušotine (Sl. 92.).



Slika 91.
Oprema za bušenje korištena za projekt bušenja vulkana Unzen 1995. godine.

Izvor:

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



Slika 92.

(A) Slika lava kupole i gornjeg dijela vodova na Unzenu. Učinkovito otplinjavanje iz pjenaste magme dogodilo se tijekom njezine fragmentacije i grijanja u gornjem dijelu vodova. Stanje vodova bit će istraženo bušenjem glavne bušotine (USDP-4) 2003. godine, a kontinuirano uzorkovanje bit će provedeno bušenjem bočne bušotine (USDP-4a) 2004. godine.

Izvor: 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>

(B) Putanje bušenja vodova. Novi RS-3 i RS-3 su lokacije bušotina glavnih bočnih bušotina i pilotske bušotine.

Izvor: 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>

(C) Trodimenzionalna slika bušenja vodova.

Izvor: 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>

Danas, čovječanstvo posjeduje dovoljno tehnološkog i inženjerskog potencijala za intervenciju u vulkanskim sustavima. Međutim, svaki slučaj planiranog otplinjavanja zahtijeva izuzetnu pripremu, uključujući opsežnu analizu podataka i precizne izračune. Čak i tada, rizici i dalje postoje.

Metode koje su opisane uglavnom su testirane na konvencionalnim vulkanima, koji su temeljno različiti po svojoj veličini u usporedbi s masivnom sibirskom perjanicom plašta. Ova perjanica predstavlja prijetnju koja daleko nadmašuje snagu jednog supervulkana. Može se usporediti s energijom tisuću erupcija Yellowstone kaldere. Ipak, suočavanje s ovim problemom postalo je hitno upravo zato što postoje potencijalni pristupi za njegovo

ublažavanje.

S pravilnim angažmanom, čovječanstvo je sposobno razviti program za otplinjavanje sibirske perjanice plašta, koristeći nakupljeno znanje globalnih stručnjaka. Glavni cilj takvog programa bio bi minimizirati posljedice uspona perjanice smanjenjem pritiska lave i plinova u sekundarnim magmatskim komorama, čime bi se spriječile velike, nekontrolirane erupcije.

Implementacija takvog programa zahtijevat će blisku međunarodnu suradnju i kolektivne napore znanstvenika i inženjera širom svijeta. Samo ujedinen pristup može donijeti učinkovita rješenja za osiguranje sigurnosti čovječanstva u cijelosti.

Primjer programa za planirano otplinjavanje sibirske perjanice plašta

Program može uključivati paralelan razvoj nekoliko ključnih područja:

1. Osnivanje mreže za praćenje

1.1 Razvijanje mreže visokoosjetljivih senzora i satelitskih sustava za praćenje seizmičke i temperaturne aktivnosti u regiji. To će omogućiti pravovremeno otkrivanje sekundarnih magmatskih komora.

1.2 Provođenje detaljnog mapiranja sekundarnih magmatskih komora korištenjem seizmičkih istraživačkih metoda. Preliminarne procjene pritiska i volumena lave u svakoj sekundarnoj komori bit će ključne.

1.3 Bušenje znanstvenih i monitoring bušotina u anomalnim zonama te instaliranje senzora za

pritisak, temperaturu i seizmičku aktivnost kako bi se prikupili ključni podaci.

2. Razvijanje tehnologija za kontrolirano otplinjavanje i blokadu magmatskih kanala

2.1 Bit će potrebno razviti plan za bušenje nagnutih dubokih bušotina do 8 km dubine u sigurnim zonama. Bit će potrebna detaljna izračunavanja putanje kako bi se osiguralo da bušotine točno dosegnu sekundarne magmatske komore. Moraju se koristiti tehnologije bušenja otporne na visoke temperature i pritisak. To uključuje korištenje materijala otpornog na toplinu za ojačavanje zidova bušotina i uspostavljanje sustava za praćenje pritiska i temperature unutar bušotina radi sigurnosti i učinkovitosti.

2.2 Proces za preusmjeravanje plinova i lave mora se pažljivo planirati, uključujući postupno upravljanje tlakom unutar sekundarnih magmatskih komora putem sustava bušotina. To zahtijeva kontrolu brzine otplinjavanja kako bi se spriječile nagle promjene tlaka te korištenje kompresorskih sustava za regulaciju tlaka plinova. Bit će potrebni sustavi za filtriranje i hlađenje kako bi se spriječilo otpuštanje otrovnih tvari u atmosferu. Ekstrakcija lave i plinova nastavit će se dok se tlak u svakoj komori ne stabilizira.

2.3 Plan za ciljane nuklearne eksplozije u specifičnim bušotinama mora se razviti kako bi se zatvorili slojevi iznad sekundarnih magmatskih komora. Ovaj pristup ima za cilj spriječiti prekomjerno doticanje magme na površinu i smanjiti emisiju pepela.

Postupno oslobađanje pritiska osigurat će stabilnost Sibira i zaštititi ključna naseljena područja, iako Norilsk i okolna naselja mogu ostati u opasnosti.

2.4 Tijekom procesa preusmjeravanja lave iz komora, morat će se poduzeti naponi kako bi se što je moguće više kontrolirao njezin tok. Lava bi trebala biti usmjerena kroz posebno pripremljene kanale prema Arktičkim morima. Dodatno, trebala bi se razviti strategija za korištenje magme u građevinske svrhe, poput stvaranja umjetnih otoka ili jačanja obala.

3. Evakuacija Stanovništva:

Morat će se implementirati sustav ranog upozoravanja, uz razvoj planova za evakuaciju u slučaju nepredviđenih hitnih situacija. Dodatno, bit će potrebno razviti strukturirani plan za sigurnu evakuaciju ljudi iz zona visokog rizika. Ovaj plan trebao bi uključivati mjere za prilagodbu i socijalnu podršku evakuiranim osobama, uzimajući u obzir mogućnost dugoročne relokacije.

4. Očuvanje Infrastrukture:

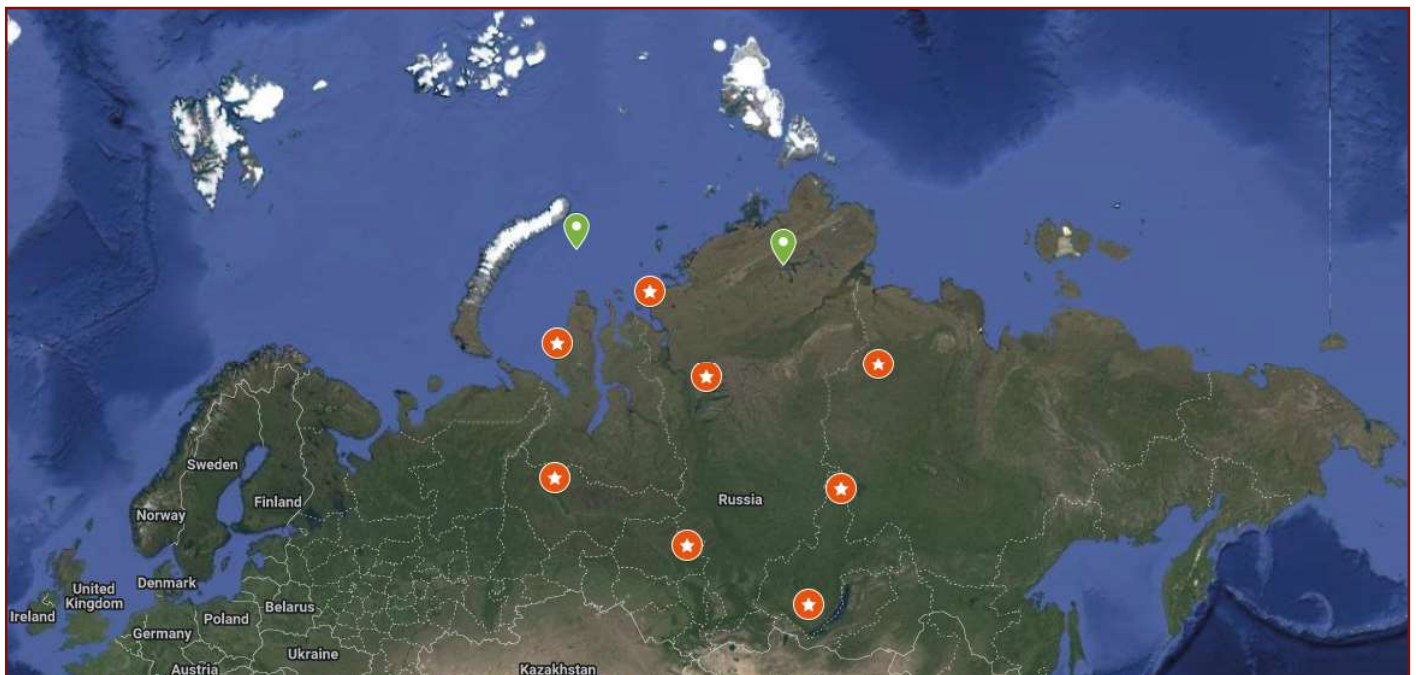
Moraju se razviti planovi za zaštitu i evakuaciju strateških objekata iz područja u opasnosti od poplave lavom. To uključuje uspostavljanje sigurnih skladišnih prostora u sigurnim zonama za evakuaciju ključnih resursa regije, poput nafte, plina, obojenih i plemenitih metala, ruda, gnojiva, zaliha hrane, vode i medicinskih potrepština.

Opravdanost odabira lokacija za istraživačke bušotine za praćenje dinamike suvremene sibirske perjanice plašta

Primarni korak u razumijevanju brzine i smjera uspona perjanica, širenja njenog vrha i prodiranja kroz pukotine u Zemljinoj kori je praćenje geotermalnih i geofizičkih parametara na dubini. To zahtijeva bušenje novih bušotina i redovito mjerenje temperature, pritiska, sastava plinova, markera intenziviranih magmatskih

procesa, seizmičkog šuma i drugih parametara unutar tih bušotina.

Predloženo je deset lokacija za bušenje istraživačkih bušotina (Sl. 93., 94.).



Slika 93.

Preliminarne lokacije 10 preporučenih mjesta za bušenje istraživačkih bušotina.

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
ЮB 6	Nakanno village in Katangsky District, Irkutsk Region	62.89873	108.45027	Eastern Siberia
B 7	Zhilinda village in Olenyoksky District, Yakutia	70.1528916	113.9261131	Eastern Siberia
C3 8	Dikson settlement in Taymyrsky Dolgano-Nenetsky District, Krasnoyarskiy Krai	73.50246	80.5498	Taymyr Peninsula
CB 9	Lead-zinc deposit to the northwest of Lake Taymyr, Taymyr Peninsula	74.52147	100.02184	Eastern Siberia
C3 10	Rogozinskaya-1 site, Kara Sea	75.16298	69.74128	Western Arctic Platform

Slika 94.

Tablica 10 preporučenih istraživačkih bušotina za praćenje napredovanja sibirske perjanice plašta. Uključujući naziv bušotine, koordinate, obližnje naselje ili infrastrukturu te presjeke geološke strukture.

Kriteriji odabira lokacija bušotina temelje se na sljedećim principima:

1. Lokacije bušotina odabrane su u odnosu na maksimalnu intersekciju temperaturnih i geodinamičkih anomalija povezanih s usponom i širenjem glave perjanice. Na temelju ovog principa, jedna bušotina postavljena je u središnjem području predviđenog uzdizanja glave perjanice, sedam bušotina označeno je uz rub predviđenog toka magme, jedna bušotina smještena je blizu Bajkalskog jezera, u smjeru aktivnog napredovanja magme ispod Istočnosibirskog kratona, a još jedna planirana je blizu Karskog mora, kako bi se pratilo napredovanje perjanice ispod oceanskog sloja arktičke platforme.

2. Postavljanje bušotina optimizirano je za naknadni seizmotomografski rad, osiguravajući da podaci sa seizmičkih senzora, nakon obrade, pruže najjasniju 3D sliku. Drugim riječima, mreža seizmičkih senzora unutar bušotina dizajnirana je da bude optimalno postavljena za podzemnu seizmotomografiju.

3. Lokacije bušotina uzimale su u obzir mogućnost isporuke opreme za bušenje i pristupne rute (dostupnost transporta). Zbog teškog terena, močvarnih predjela, rijetkih cesta i ekstremnih klimatskih uvjeta u sjevernom Zapadnom i Istočnom Sibiru, odabir lokacija za bušenje oslanjao se na blizinu postojeće infrastrukture za znanstvena istraživanja—kao što su ceste, naselja i aktivne platforme za bušenje. Dvije točke odabrane su na trenutnim naftnim poljima koja vode Gazprom i Rosneft, dok su ostale smještene u blizini naftnih, plinskih i drugih mineralnih polja. Treba napomenuti da, ako bušenje na navedenim koordinatama bude nemoguće, lokacije bušotina mogu se prilagoditi za 10–20 km u bilo kojem smjeru.

Preporučene istraživačke metode za bušotine:

Za sveobuhvatno praćenje i proučavanje perjanice plašta, sljedeći parametri moraju se prikupljati iz istraživačkih bušotina:

- 1. Praćenje temperature:** Ovo uključuje mjerenje temperatura na različitim dubinama kako bi se analizirale temperaturne anomalije.
- 2. Pritisak:** Određivanje razina pritiska unutar slojeva kako bi se procijenili hidrodinamički uvjeti.
- 3. Uzimanje uzoraka plinova:** Prikupljanje uzoraka plinova iz dubokih slojeva kako bi se proučio njihov sastav i potencijalni utjecaj magmatskih aktivnosti na njih.
- 4. Seizmološka istraživanja:** Instalacija standardnih i širokopojsnih seizmičkih senzora za bilježenje seizmičke aktivnosti u cilju stvaranja detaljne seizmotomografije Zemljine kore i plašta za kontinuirano praćenje stanja perjanice.
- 5. Sastav formacijskih tekućina:** Analiziranje sastava formacijskih tekućina kako bi se identificirali potencijalni termalni ili magmatski doprinosi.
- 6. Geomehanička istraživanja:** Provođenje mjerenja naprezanja u stijenama kako bi se analiziralo stanje naprezanja litosfere koja prolazi kroz deformaciju zbog intruzije perjanice.
- 7. Elektromagnetske metode:** Provođenje elektromagnetskih istraživanja za bilježenje promjena u električnim svojstvima medija povezanih s intruzijom magme.

Prikupljeni podaci će činiti osnovu za razvoj sveobuhvatnog modela dinamike perjanice plašta i procjenu njezinog utjecaja na geološke procese u Sibiru.

Karakteristike bušenja i blokiranja magmatskih kanala tijekom planiranog otplinjavanja

Primarni cilj bušenja bušotina tijekom planiranog otplinjavanja je smanjenje pritiska u sekundarnim magmatskim rezervoarima perjanice, sprječavanje eksplozija magme i uspostava kontroliranog otpuštanja plina i lave.

U početnoj fazi, bušenje će se provoditi uz ljudske operatore, budući da na plitkim dubinama proces uključuje standardne tehnološke zadatke s minimalnim rizicima za osoblje. Koristit će se tradicionalne naprave za bušenje opremljene sustavima za praćenje temperature i pritiska kako bi se kontrolirao proces i pravovremeno reagiralo na odstupanja od norme.

Kako se bušenje približava kritičnim dubinama i dolazi do aktivnih zona magmatskog sustava, rizik za osoblje značajno raste. U ovoj fazi, operacije moraju preći potpuno na automatizaciju. Koristit će se specijalizirane naprave za bušenje s automatiziranim kontrolnim sustavima. Proces bušenja bit će upravljani daljinski pomoću softverskih sustava koji analiziraju podatke u stvarnom vremenu i prema njima prilagođavaju rad opreme.

Kako bi se poboljšala preciznost praćenja, operateri će koristiti tehnologiju virtualne stvarnosti, omogućujući detaljnu kontrolu opreme bez fizičke prisutnosti u opasnim zonama. Ovaj pristup minimizira vjerojatnost nesreća izazvanih ispuštanjem plina pod visokim pritiskom ili kvarovima opreme uslijed udarnih valova.

Dronovi i roboti će pratiti bušački kompleks i okolno područje. Dronovi opremljeni kamerama, termalnim kamerama i senzorima otkrivati će curenje plina, termalne anomalije i seizmičku aktivnost. Roboti koji rade izravno u zoni bušenja

prikupljat će podatke o temperaturi, tlaku i kemijskom sastavu okoliša, te ove informacije prenositi u automatizirane kontrolne centre. Ove tehnologije minimiziraju ljudsku prisutnost u visokorizičnim područjima i osiguravaju visoku preciznost i sigurnost.

Nakon završetka bušenja, sljedeća faza uključuje kontrolirano otplinjavanje – postupno otpuštanje tlaka i izbacivanje velikih količina lave. U konačnim fazama, nakon značajnog smanjenja volumena magme i plinova, možda će biti potrebna kontrolirana eksplozija za zatvaranje putova za uspon magme. Jedna od predloženih metoda uključuje usmjerenu nuklearnu eksploziju u izbušenoj bušotini. Cilj ovog pristupa je olakšati tektonski stres i stvoriti stabilne strukturalne barijere koje blokiraju magmatske kanale.

Ovaj pristup uključuje razbijanje stijena u područjima visokog stresa, nakon čega slijedi njihova fuzija i hlađenje pod utjecajem toplinske energije. Ovaj proces potiče stvaranje monolitne barijere koja može potpuno ili djelomično blokirati pristup magme površini. Termodinamički učinak također može ublažiti tektonski stres, smanjujući vjerojatnost budućih erupcija.

Implementacija nuklearnih eksplozija zahtijeva precizne izračune, uključujući procjenu litostatskog tlaka, tvrdoće i gustoće stijena te karakteristika magmatske taline. Ovi čimbenici moraju se pažljivo razmotriti kako bi se maksimizirala učinkovitost metode i smanjili potencijalni rizici.

Odabir optimalnog vremena za bušenje istražnih bušotina tijekom planiranog otplinjavanja

Trenutno su naši stručnjaci usmjereni na proučavanje optimalnih vremenskih okvira za provođenje operacija bušenja u sklopu planiranog otplinjavanja. Iako je još prerano donositi konačne zaključke, preliminarni izračuni već ukazuju na mogućnost preciznog odabira najpovoljnijeg vremena za početak otplinjavanja. Nalazi sugeriraju da se uz pravilno odabrano vrijeme, rizik od komplikacija može smanjiti nekoliko puta.

Proces bušenja mora uzeti u obzir ne samo fizikalna i mehanička svojstva stijena, poput njihove čvrstoće i lomljivosti, već i vremenske parametre povezane s nebeskom mehanikom. Izračuni bi se trebali temeljiti na analizi položaja Zemlje duž ekliptike, faze Mjeseca, poravnanja

glavnih planeta poput Jupitera i trenutne razine solarne aktivnosti. Osim toga, važno je pratiti potrebu dubokog fokusa u području bušenja, jer takvi događaji mogu značajno povećati lokalnu seizmičku aktivnost.

Trenutno imamo opće razumijevanje mehanizma i ključnih obrazaca koji upravljaju procesom, ali ovi nalazi zahtijevaju opsežnu provjeru. Rezultate treba rigorozno ponovno pregledati naš tim znanstvenika i neovisno potvrditi kroz istraživanja i modele koje razvijaju drugi stručnjaci.

Prognoštički ishodi planiranog otplinjavanja sibirske perjanice plašta

Izvođenje planiranog otplinjavanja sibirske perjanice može rezultirati u tri glavna scenarija, proračunata kroz dvije faze projekta: ranu i kasniju fazu. U nastavku je detaljno razmatran svaki scenarij.

1. Minimalna šteta na teritoriji Rusije.

Ako se proces otplinjavanja i otpuštanja viška lave iz sekundarnih magmatskih komora pažljivo modelira od strane međunarodnog tima stručnjaka, uz proračune koji uzimaju u obzir sve geološke karakteristike, obje faze otplinjavanja

mogu se izvoditi bez nesreća ili komplikacija. U ovom scenariju, šteta na teritoriju Rusije bila bi minimalna, s gubicima koji bi iznosili 5–7% površine zemlje, ili najviše do 10% (pogođeni radius od približno 500–600 km). Veći gradovi u Krasnojarskom kraju mogli bi biti zaštićeni, a gubitak života bi se mogao izbjeći. Štaviše, povoljan razvoj događaja mogao bi omogućiti preusmjeravanje lave prema Arktičkim morima, potencijalno proširujući teritorij Rusije stvaranjem novih priobalnih zemljišta.

2. Umjerena šteta na teritoriji Rusije.

Ovaj scenarij pretpostavlja uspješan završetak faze ranog otplinjavanja, ali anticipira nepredviđene komplikacije u kasnijim fazama, poput iznenadnog eksplozivnog ispuštanja plinova ili izljeva lave. Do tog trenutka, neki plinovi i lava već bi bili ispušteni, smanjujući ukupni utjecaj. Mogući ishodi uključuju tokove tekuće bazaltne lave, slične onima u Islandu ili Havajskim otocima, ili erupciju umjerene eksplozivnosti. U tom slučaju, potencijalni gubitak teritorija mogao bi se povećati na 25–30% (približno 4–5 milijuna četvornih kilometara). To bi utjecalo na gradove unutar radijusa od 1.000 km od aktivne zone. Međutim, ovaj scenarij ne bi rezultirao globalnom katastrofom za civilizaciju niti nepovratnom destrukcijom širom teritorije Rusije. Čovječanstvo bi bilo u mogućnosti upravljati klimatskim i ekološkim izazovima koji bi uslijedili.

3. Maksimalna šteta za Rusiju i svijet.

Ovaj scenarij pretpostavlja da bi kasna inicijativa ili nedostatak stručnosti među stručnjacima mogli dovesti do značajnih komplikacija. Nedostatak istraživanja, pogreške u proračunima ili bušenje kroz meke ili ispucale stijene mogli bi ometi operacije. Ako dođe do komplikacija tijekom faze ranog otplinjavanja, kada je tlak u magmatskim komorama na svom vrhuncu, mogla bi se dogoditi jedna od dvije katastrofalne posljedice: neposredna eksplozija cijelog sustava sibirske perjanice ili spori, ali opsežni tokovi lave, slični formiranju Sibirskih trapa.

Unatoč potencijalnim rizicima, vjerojatnost takvog ishoda izuzetno je niska jer je teško zamisliti provedbu takvog složenog projekta bez odgovarajuće međunarodne pripreme.

Optimistički i najvjerojatniji ishod uključuje

gubitak samo 5–7% ruskog teritorija s minimalnom štetom. Čak i u slučaju komplikacija tijekom kasnijih faza, gubitci bi mogli porasti na 25–30%, što je i dalje znatno povoljnije od posljedica nečinjenja. Rizik od težih uništenja tijekom planiranog otplinjavanja, bilo za Rusiju ili svijet, zanemariv je.

Provedba planiranog otplinjavanja pružit će Rusiji jedinstvenu priliku da vodi u upravljanju globalnim geodinamičkim rizicima, učvršćujući njezinu poziciju kao međunarodnog znanstvenog i tehnološkog lidera. Uspješno izvršenje projekta pokazat će sposobnost zemlje da se nosi s izazovima planetarnih razmjera, potičući globalnu suradnju u prevenciji prirodnih katastrofa. Ova inicijativa neće samo stabilizirati domaće političko i socijalno okruženje Rusije, već će i ojačati međunarodnu suradnju u suočavanju s globalnim pitanjima.

Kontrolirano otplinjavanje sibirske perjanice moglo bi utjecati ne samo na lokalnu regiju, već i na druge vulkanske sustave, poput Yellowstonea i stratovulkana diljem svijeta. Magmaški rezervoari i njihova dinamika čine jedinstvenu međusobno povezanu globalnu mrežu, koja funkcionira kao jedinstveni geomehanički sustav. Kontrolirano smanjenje pritiska u jednom segmentu može smanjiti stres u magmatskim rezervoarima, sprječavajući lančane reakcije i erupcije. To se može usporediti s ispuhivanjem gume na automobilu: smanjenje pritiska u jednom području redistribuirat će opterećenje i sprječava pucanje na kritičnim točkama stresa. Sličan pristup otplinjavanju mogao bi stabilizirati magmatske sustave na globalnoj razini.

Stoga, poduzimanje planiranog i kontroliranog otplinjavanja ostaje jedina održiva prilika čovječanstva da izbjegne katastrofu, kako za Rusiju, tako i za cijeli svijet. Ovaj scenarij nudi put za izbjegavanje globalne katastrofe, dok se istovremeno dobiva vrijeme za daljnji razvoj rješenja od strane čovječanstva.

Međutim, unatoč ogromnom potencijalu, uspješno ostvarenje čak i najoptimističnijeg

scenarija predstavlja ogroman izazov. Neposredno djelovanje je ključno, jer odgađanje povećava vjerojatnost katastrofalnih događaja. Iznenadjuće, takav projekt mogao bi naići na protivljenje unutar Rusije zbog potencijalnih rizika, poput oštećenja infrastrukture i smanjenja kontrole nad strateškim resursima.

■ Zaključak

Sibirska perjanica predstavlja globalnu geodinamičku prijetnju usporedivu po veličini s tisuću katastrofalnih erupcija najvećih supervulkana. Nekontrolirana erupcija mogla bi rezultirati posljedicama na planetarnoj razini, uključujući početak ledenog doba, uništenje ekosustava, kolaps infrastrukture i izumiranje čovječanstva. Ovi rizici zahtijevaju provedbu preventivnih mjera, poput planiranog otpuštanja plina iz magmatskog sustava sibirske perjanice.

Nedjelovanje predstavlja prijetnju spontanih, nekontroliranih erupcija čije bi posljedice bile katastrofalne ne samo za Rusiju nego i za cijeli planet. Kontrolirano smanjenje pritiska u magmatskim komorama može pomoći u izbjegavanju najgoreg scenarija i pružiti čovječanstvu nužno potrebne vrijeme za razvoj dugoročnih rješenja.

Također, integracija tehnologije za proizvodnju atmosferske vode u svakodnevnu upotrebu uz planirano otpuštanje plinova iz sibirske perjanice mogla bi otvoriti nove prilike za obnovu ekološke ravnoteže. To bi omogućilo čišćenje oceana od plastike, ojačalo ciklus vode i obnovilo planetarni temperaturni balans. Sveobuhvatna primjena takvih mjera mogla

bi stabilizirati klimu i osigurati budućnost za čovječanstvo, pružajući vrijeme za suočavanje s vanjskim kozmičkim utjecajem odgovornim za katastrofalne događaje unutar ciklusa od 12.000 godina.

Ovi ciljevi zahtijevaju hitnu međunarodnu suradnju znanstvenika iz različitih disciplina, uključujući kvantne fizičare, kako bi se razvila i implementirala sveobuhvatna rješenja. Međutim, geopolitički i vojni sukobi ometaju takvu suradnju. Stoga je nužan globalni moratorij na ratove i preusmjeravanje vojnih resursa prema ublažavanju katastrofa i humanitarnim naporima. Čovječanstvo ima samo 4-6 godina relativno stabilnih uvjeta kako bi poduzelo potrebne akcije.

Ako se uspostave uvjeti za otvorenu suradnju, znanstvenici neće početi od nule, jer postojeća istraživanja i razumijevanje uzročnih odnosa u ovom području već pružaju temelj. Nesposobnost čovječanstva da prioritizira globalno jedinstvo i znanstvenu suradnju dovest će do nepovratnih posljedica za život na Zemlji.

■ Dodatak 1

Metodologija za analizu seizmičke aktivnosti uključivala je preuzimanje i obradu podataka s Međunarodnog seizmološkog centra (ISC). Budući da skup podataka uključuje doprinose različitih zemalja i istraživačkih institucija, kao i različite vrste skala magnitude (Mw, Ms, Mb, ML, MD, itd.), primijenjen je specifičan algoritam obrade podataka kako bi se odabrala najprikladnija vrsta magnitude iz više izvora. Korištena su dva različita pristupa:

1. U tekstu nazvan **specijalnim algoritmom srednjih vrijednosti magnitude (Special Median Magnitude Algorithm)**, ovaj postupak uključuje odabir preferirane procjene magnitude i uključivanje događaja u skup podataka samo ako preferirana procjena spada unutar potrebnog raspona magnitude. Proces odabira slijedi hijerarhiju tipova magnitude prema redoslijedu preferencije: Mw, ML, MS, Mb, MD, MV.

Ako postoje višestruke vrijednosti preferiranog tipa magnitude za dati događaj, izračunava se medijana svih dostupnih procjena tog tipa za događaj.

Ako za dati događaj nije dostupna nijedna procjena preferiranih tipova (što je rijetko, čini samo nekoliko postotaka događaja u cijeloj bazi podataka), odabire se bilo koja procjena magnitude čija vrijednost odgovara medijani izračunatoj od svih tipova magnitude za taj događaj.

2. U tekstu nazvan **algoritam maksimalnih vrijednosti magnitude (Maximum Magnitude Algorithm)**, ovaj postupak odabire procjenu magnitude s najvećom vrijednošću među svim dostupnim procjenama magnitude za dati događaj.

Prvi algoritam obično rezultira manjim smanjenjem vrijednosti magnituda u odnosu na najvišu prijavljenu procjenu. Međutim, iskustvo je pokazalo da Median Magnitude Algorithm pruža pouzdano predstavljanje Gutenberg-Richterova zakona i drugih seizmičkih obrazaca te se dobro usklađuje s podacima iz drugih seizmoloških baza podataka, kao što su Geološki zavod Sjedinjenih Američkih Država (USGS) i Institucije za seizmološka istraživanja (IRIS).

Drugi algoritam omogućava procjenu broja potresa zabilježenih od strane bilo koje istraživačke institucije s magnitudom većom od odabranog praga. Ovaj pristup pomaže u prepoznavanju trendova u učestalosti potresa unutar određenog raspona magnituda.

Svi grafovi predstavljeni u odjeljku “Povećanje seizmičke aktivnosti kao pokazatelj destabilizacije ploča uslijed aktivnosti sibirске magmatske perjanice” konstruirani su korištenjem prvog algoritma — specijalnog algoritma srednjih vrijednosti magnitude (Sl. 44.–75.).

Nakon odabira magnitude, dobiveni podaci su filtrirani po tipovima događaja u ISC bazi podataka, kako bi se isključili događaji uzrokovani ljudskom aktivnošću tijekom rudarskih radova: eksplozije, potencijalne eksplozije, pucanje stijena, itd. Isključeni su sljedeći tipovi događaja:

km = known mine explosion — poznata minska eksplozija

sm = suspected mine explosion —

sumniva minska eksplozija

sm = suspected mine explosion —

sumniva minska eksplozija

kh = known chemical explosion (Not standard IMS) — poznata kemijska eksplozija (nestandardni IMS)

sh = suspected chemical explosion (Not standard IMS) — sumnjiva kemijska eksplozija (nestandardni IMS)

kx = known experimental explosion — poznata eksperimentalna eksplozija

sx = suspected experimental explosion — sumnjiva eksperimentalna eksplozija

kn = known nuclear explosion — poznata nuklearna eksplozija

sn = suspected nuclear explosion — sumnjiva nuklearna eksplozija

Također, s obzirom na to da Rusija ima veliki broj rudarskih operacija, ISC baza podataka bila je uspoređena s podacima Jedinствене геофизичке службе Руске академие знаности од сiječnja 2025. Ovaj skup podataka uključuje sve poznate eksplozije i pucanje stijena unutar teritorija Rusije. Ovi su događaji također isključeni kako bi se osiguralo da u konačnom skupu podataka ne ostanu događaji povezani s eksplozijama.

Reference

- 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://Infm1.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., Croswell, 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-Issledovatel'skie 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.gsras.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., 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>

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 Mw=7.5, 10⁷: 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., Krivolutskaya, 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., Krivolutskaya, 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.