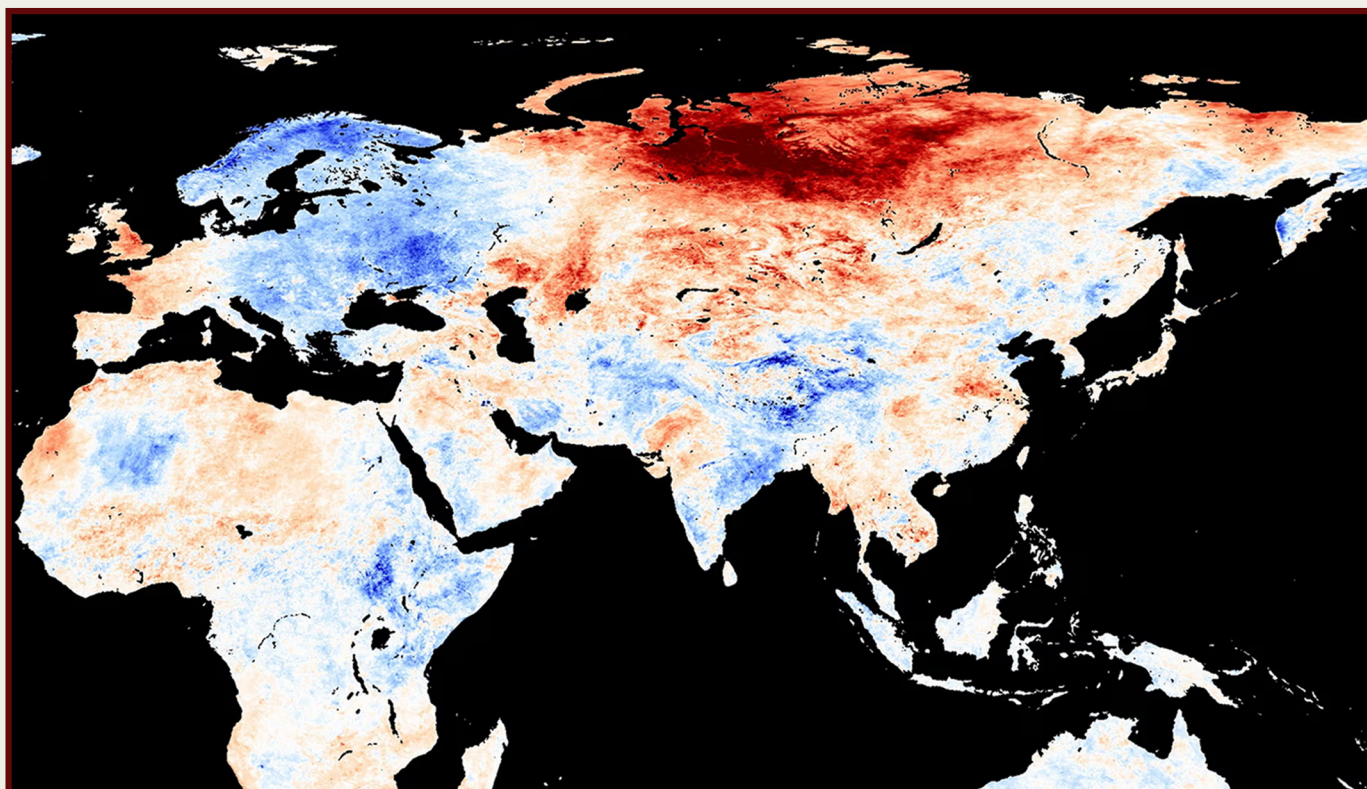


PAR MAGMATISKĀ PLUMA

IZVIRDUMA DRAUDIEM SIBĪRIJĀ

UN ŠĪS PROBLĒMAS RISINĀJUMIEM



**PAR MAGMATISKĀ PLUMA
IZVIRDUMA DRAUDIEM SIBĪRIJĀ
UN ŠĪS PROBLĒMAS RISINĀJUMIEM**

SATURS

Īss ģeodinamiskā modeļa apraksts par klimata izmaiņām uz Zemes pašreizējā laika periodā	4
Kodola nobīde Sibīrijas virzienā 1998. gadā	16
Sibīrija un Sibīrijas Arktika sasilst 3–4 reizes ātrāk nekā pārējā pasaule	21
Netiešās Sibīrijas pluma pacelšanās procesa pazīmes	25
Mūžīgā sasaluma kušana	27
Dubļu vulkānisma izpausmes	29
Augsnes sasilšana	31
Piezemes gaisa temperatūra	32
Zibens izlāžu skaita pieaugums	34
Ozona slāņa noārdīšanās	36
Literatūrā un novērojumu datus balstīta magmatiskā pluma struktūra, iespējamie izmēri un lokalizācija	38
Magmatiskā pluma lokalizācija	44
Seismiskās aktivitātes pieaugums kā tektonisko plātņu destabilizācijas pazīme	48
Pamatojums Sibīrijas pluma izvirduma neizbēgamībai	72
Scenārijs 1. Straujš Sibīrijas pluma izvirdums	73
Supervulkānu un vulkānisko sistēmu aktivizēšanās	80
Skābie lieti	82
Vulkāniskā ziema	83
Scenārijs 2. Pakāpenisks Sibīrijas pluma izvirdums	85
Sibīrijas pluma pakāpeniskā izvirduma sekas Krievijai	90
Sibīrijas pluma pakāpeniskā izvirduma sekas visai pasaulei	91
Sibīrijas pluma pakāpeniskā izvirduma ilgtermiņa sekas planētai	92
Scenārijs 3. Plānota kontrolēta degazācija.....	93
Esošās vulkāniskās ģeoinženierijas metodes	93
Sibīrijas pluma plānotas degazācijas programmas piemērs	100
Zinātniski pētniecisko urbumu izvietojuma pamatojums mūsdienā	102
Sibīrijas magmatiskā pluma dinamikas monitorēšanai	102
Plānotās degazācijas laikā veikto urbumu un magmatisko kanālu bloķēšanas raksturojums	105
Optimālā laika izvēle urbumu veikšanai plānotās degazācijas laikā	106
Sibīrijas pluma plānotās degazācijas iespējamo rezultātu scenāriji	106
Secinājumi	109
1. Pielikums	110
Literatūras saraksts	112

Īss ģeodinamiskā modeļa apraksts par klimata izmaiņām uz Zemes pašreizējā laika periodā

Pēdējo 30 gadu laikā uz Zemes notiek nebijis un sinhrons klimata pārmaiņu, anomāliju un ekstrēmu parādību pieaugums visos planētas apvalkos un ģeofizikālajos parametros. Šo izmaiņu progress paātrinās eksponenciāli. Visaptveroša zinātnisko datu analīze liecina, ka galvenie anomāliju pieauguma cēloņi visos Zemes apvalkos ir astronomiskie cikli, kas visā Saules sistēmā atkārtojas ik pēc 12 000 gadu.

Hipotēzi par ārēju astronomisku ietekmi apstiprina novērojumi par līdzīgām klimata, ģeodinamiskām un magnētiskām anomālijām uz citām Saules sistēmas planētām un to pavadoņiem, kas šobrīd notiek sinhroni ar izmaiņām uz Zemes. Piemēram, uz Urāna, Jupitera un Venēras tiek fiksēts vētru ātruma un viesuļvētru izmēru pieaugums. Tajā pašā laikā uz Marsa tiek novērota polāro ledus

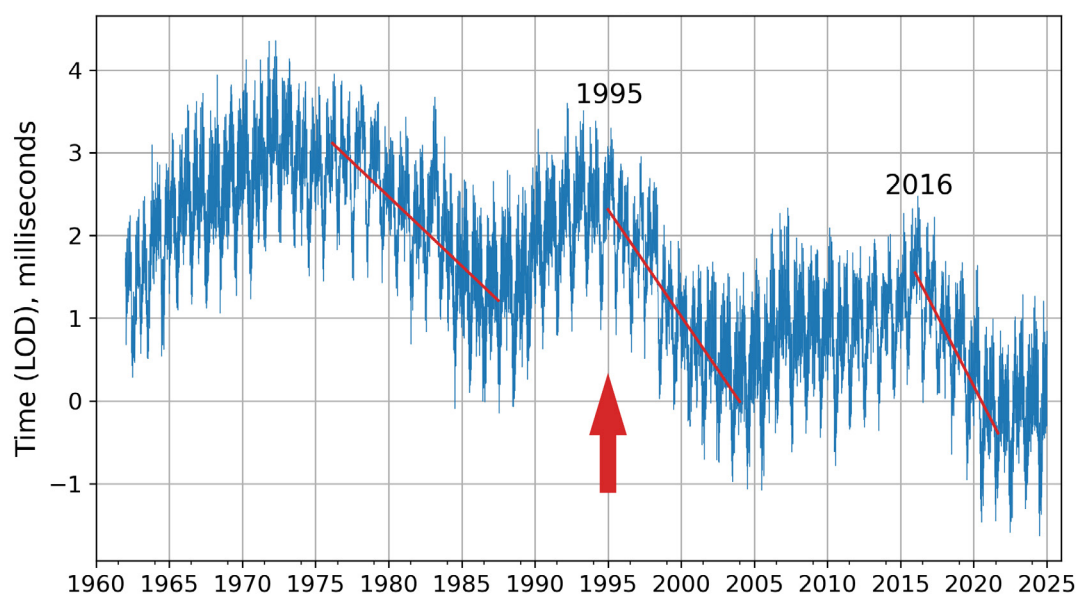
cepuru kušana, bet uz Venēras un Marsa turpina pieaugt vulkāniskā aktivitāte. Turklāt uz Marsa pastiprinās seismiskā aktivitāte, kas norāda uz anomālu ģeodinamisko procesu aktivitāti.

Kritiskas 12 000 gadu astronomiskā cikla izmaiņas Zemes sistēmās pašreizējā ciklā sākās 1995. gadā. Nozīmīgas ģeofiziskās anomālijas, kas tajā laikā tika reģistrētas, ietvēra strauju Zemes rotācijas paātrinājumu (1. att.), tās ass nobīdi¹ (2. att.) un izteiktu Ziemeļu magnētiskā pola² dreifa sākumu (3. att.). Šie fenomeni liecina par būtiskām izmaiņām Zemes kodolā.

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.

Diennakts ilguma novirze



1. att.

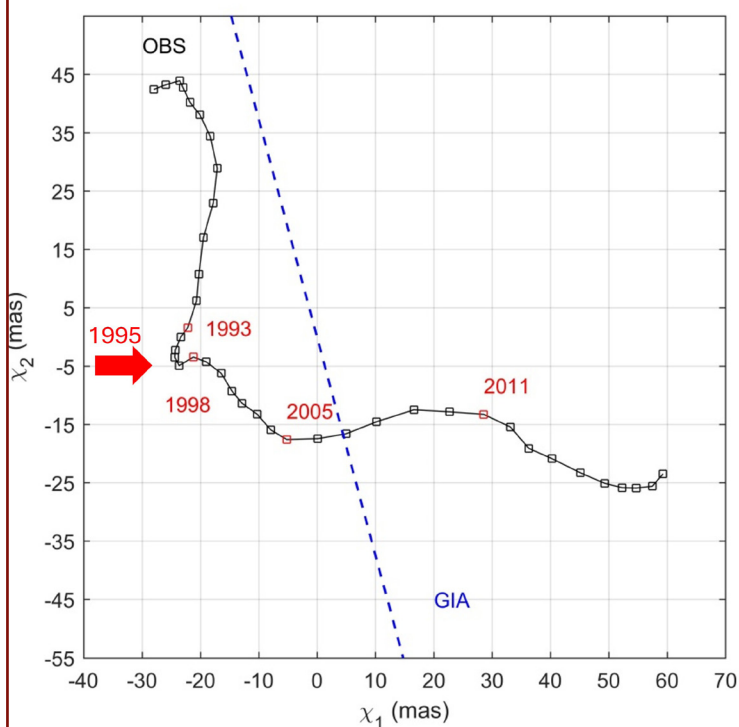
Diennakts ilguma novirze milisekundēs laika periodā no 1962. līdz 2023. gadam

Datu avots: Parīzes observatorijas Zemes orientācijas centrs (IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory).

Diennakts ilgums – Zemes orientācijas parametri:

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

Ar attēlā redzamajām sarkanajām līnijām apzīmētas tendenču līnijas, kas parāda diennakts saīsināšanās ātrumu. Piemēram, kreisajā pusē esošā līnija ir lēzenāka, savukārt labajā pusē esošā līnija, kas ataino paātrinājumu kopš 2016. gada, ir gandrīz vertikāla. Tas nozīmē, ka diennakts saīsinās daudz straujāk, kas liecina par planētas rotācijas paātrināšanos.



2. att.

Novērotā uzbudinājuma ilgtermiņa trajektorija pēc ikgadējo un Čandlera ciklu noņemšanas, izmantojot slīdošo vidējo metodi

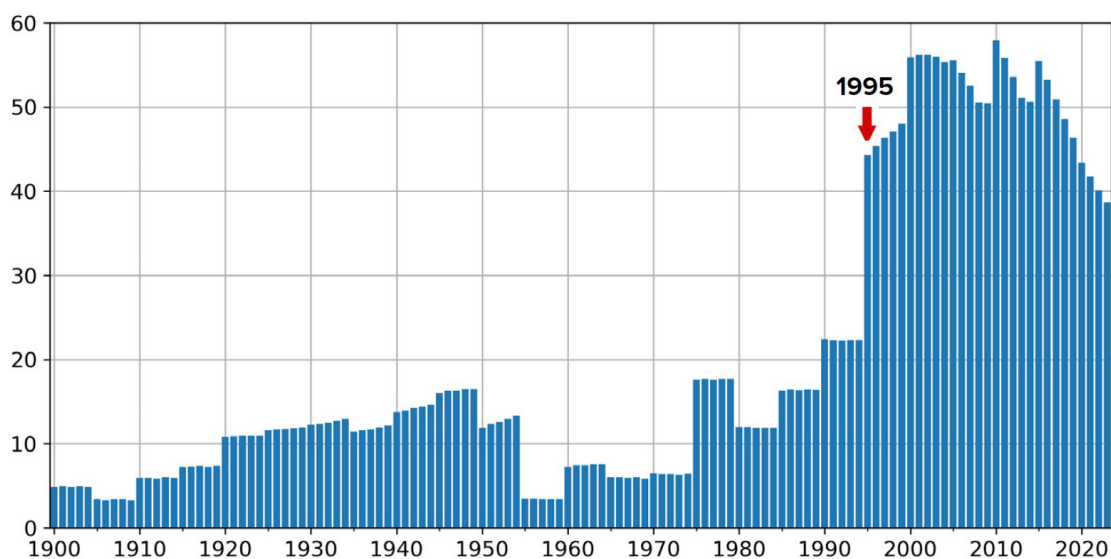
Melna līnija ar kvadrātiem: novērotā trajektorija; zila punktētā līnija: polārā dreifa virziens, ko izraisa ledāju izostatiskā korekcija (GIA).

Mainīgā vidējā apakškopas lielums ir noteikts kā 84 mēneši, kas ir mazākais kopīgais dalāmais 12 mēnešu (gada cikla) un 14 mēnešu (Čandlera cikla) periodiem, saskaņā ar Liu et al. (2017) pētījumu.

Avots: 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>

Ziemeļu magnētiskā pola kustības ātrums (km/gadā)



3. att.

Ziemeļu magnētiskā pola kustības ātrums (km/gadā)

Avots: Ziemeļu magnētiskā pola atrašanās vietas dati, NOAA

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

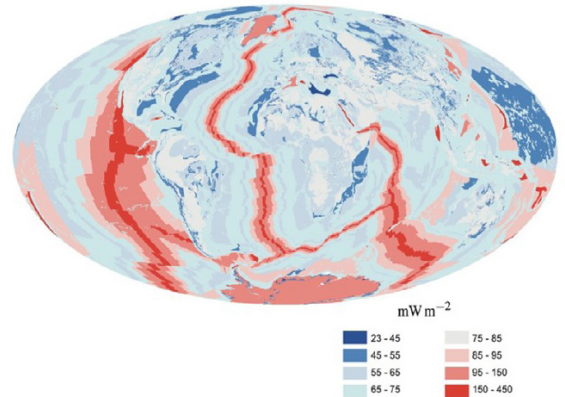
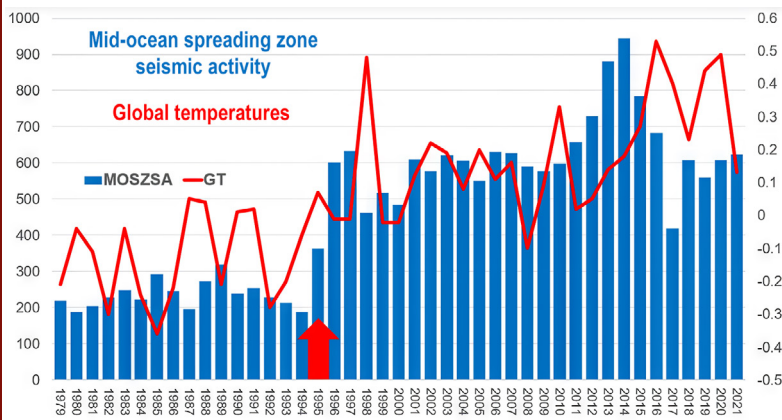
Saskaņā ar hipotēzi šajā laika periodā Saules sistēma sāka ieiet zonā, kurā ārējā kosmiskā ietekme sāka būtiski ietekmēt planētas, konkrēti to kodolus. Izmaiņas, kas notika Zemes kodolā 1995. gadā, norāda uz ārējā kodola sasilšanas pieaugumu, no kā var secināt, ka Zemes kodolā sāka ieplūst papildu enerģija. Šādas dziļas izmaiņas Zemes kodolā prasa kvadriljonus reižu lielāku enerģijas patēriņu, nekā cilvēce ir saražojusi visā savas pastāvēšanas laikā.

Ārējās ietekmes pieplūde Zemes kodolam izraisīja procesu aktivizēšanos, kas saistīti ar mantijas kušanu un magmas pacelšanos tuvāk virsmai. Tas savukārt izraisīja ķēdes reakciju, pastiprinot seismisko un vulkānisko aktivitāti, kā arī veicināja dzīļu sasilšanas pieaugumu un klimata katastrofu skaita palielināšanos visā pasaulē.

Piemēram, kopš 1995. gada tiek novērots nozīmīgs seismiskās aktivitātes pieaugums, kas izpaužas zemestrīču biežuma, magnitūdas un enerģijas palielinājumā. Šī tendence ir novērojama gan kontinentos, gan okeāna gultnē (4. att.) un aptver reģionus, kas iepriekš nebija izrādījuši seismisko aktivitāti, kas norāda uz izmaiņu globālo raksturu.

Svarīgi atzīmēt, ka 5,0 un lielāku magnitūdu zemestrīču skaita pieaugums nav saistīts ar seismiskās monitorēšanas tehnoloģiju uzlabošanu (5. att.), bet gan atspoguļo reālas izmaiņas Zemes ģeodinamiskajā sistēmā. Starptautiskā seismoloģiskā centra apkopotie dati apstiprina, ka pēdējo 25 gadu laikā zemestrīču skaits ir ievērojami pieaudzis un turpina pieaugt (6. att.).

Zemestrīču skaita pieaugums okeāna gultnē gar vidusokeāna grēdām



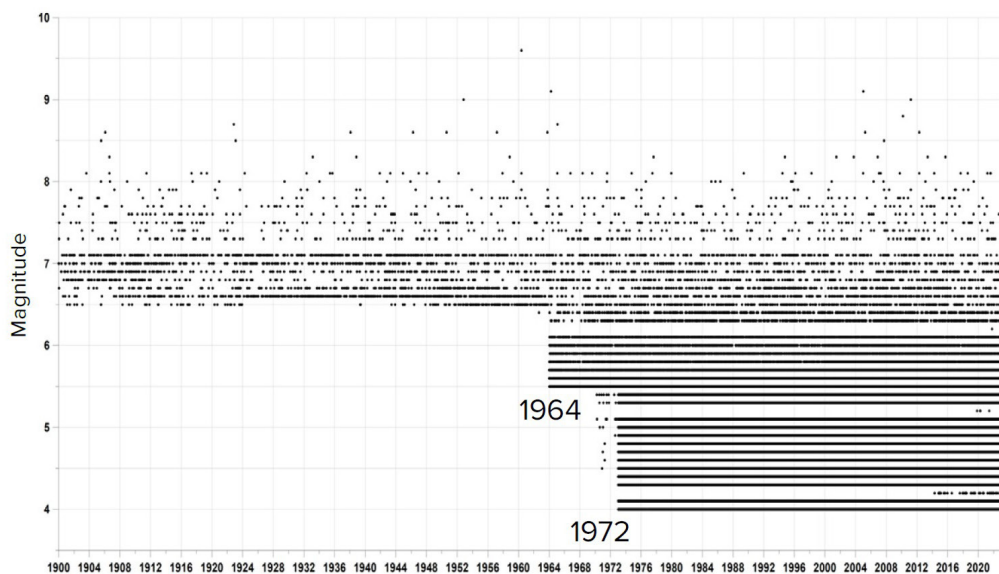
4. att.

Vienlaicīgs zemestrīču skaita pieaugums okeāna gultnē un globālās atmosfēras temperatūras paaugstināšanās (pa kreisi). Vidusokeāna grēdu ģeotermālā sasilšana (pa labi)

Shēma ilustrē strauju zemestrīču skaita pieaugumu 1995. gadā okeāna gultnē gar vidusokeāna grēdām un ciešo korelāciju starp seismisko aktivitāti okeāna gultnē un atmosfēras temperatūrām. Tas norāda uz papildu dziļu siltuma avotu, kas ietekmē gan okeānus, gan atmosfēru.

Avots: 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>

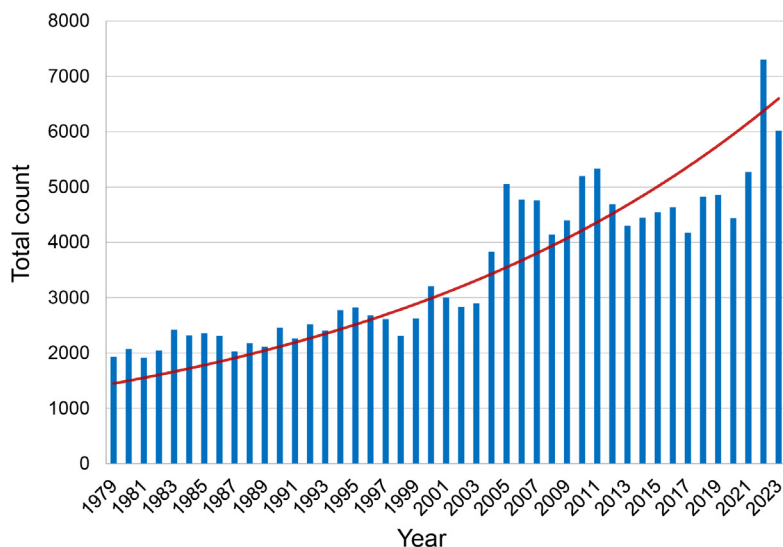


5. att.

Grafikā ar melniem punktiem attēlotas dažādas stiprības zemestrīces atsevišķos gados

Līdz 1964. gadam tika reģistrētas tikai zemestrīces ar magnitūdu 6,5 un augstāk. Kopš 1964. gada (pateicoties jutīgāku sensoru uzstādīšanai) – ar magnitūdu 5,5 un augstāk. Kopš 1972. gada – ar magnitūdu 4,0 un augstāk, neatkarīgi no atrašanās vietas.

M5+ zemestrīces 1979-2023, ISC



6. att.

Zemestrīces ar magnitūdu 5,0 un augstāk no 1979. līdz 2023. gadam saskaņā ar ISC datu bāzi

Datu atlase tika veikta pēc algoritma, kas izmanto maksimālās magnitūdas vērtības no ISC datu bāzes katram notikumam (skat. 1. pielikumu).

Avots: ISC datubāze

Turklāt tiek novērots seismiskās aktivitātes pieaugums vulkānu tuvumā, kā arī pie supervulkāniem, piemēram, Jeloustonā (ASV), Kampi Flegrei (Itālijā), Taupo (Jaunzēlandē) un citiem vulkāniem, kas izvirduši iepriekšējos 12 000 gadu ciklos. Pieaug arī kopējais vulkānu izvirdumu dienu skaits, ko pavada anomāli izvirdumi, kuros izmestā lava ir pārkarsēta un tai ir netipisks sastāvs, kas raksturīgs magmai no dziļākiem mantijas slāņiem.^{3,4,5,6,7}

Īpašu uzmanību piesaista dziļfokusa zemestrīču skaita pieaugums, kas notiek vairāk nekā 300 km dziļumā un dažkārt sasniedz pat 750 km zem

Zemes virsmas. Šie notikumi rodas nevis Zemes garozā, bet gan mantijā, kur materiāls parasti deformējas vienmērīgi, nevis lūzt. Tas padara šādu zemestrīču raksturu ļoti neparastu.

Tā kā šīs zemestrīces notiek ekstremāla spiediena un augstu temperatūru apstākļos, var secināt, ka šie spēcīgie sprādzieni enerģijas ziņā ir salīdzināmi ar daudzu atombumbu vienlaicīgu detonāciju Zemes mantijā. Turklāt dziļfokusa zemestrīces bieži izraisa spēcīgas zemestrīces Zemes garozā, pastiprinot to postošo ietekmi.^{8,9}

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

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

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

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

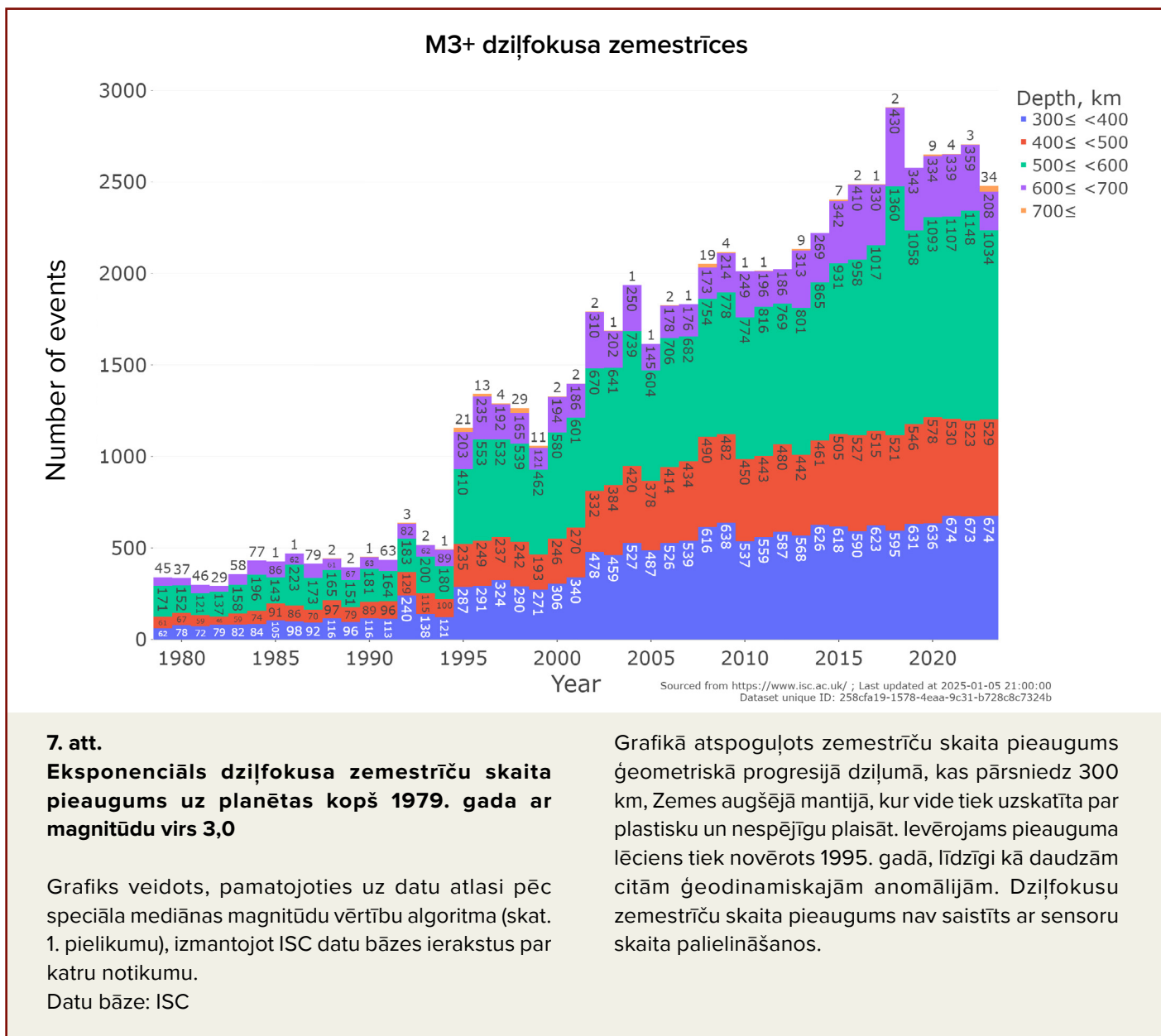
⁷D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports*, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>

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

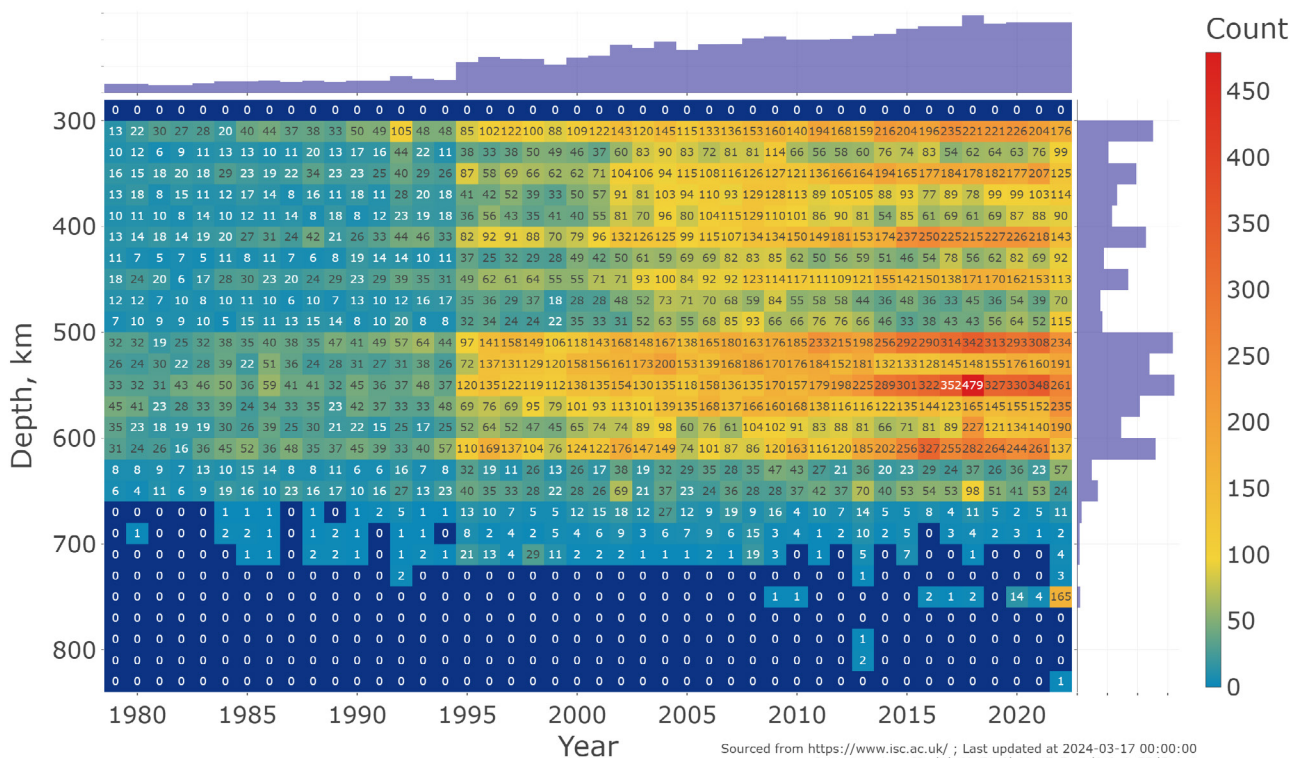
⁹Mikhailova, R. S., Ulubieva, T. R., & Petrova, N. V. (2021). The Hindu Kush earthquake of October 26, 2015 with Mw=7.5, 10~7: Previous seismicity and aftershock sequence. *Earthquakes in Northern Eurasia*, 24(2015), 324-339. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.31>

Kopš 1995. gada šo dziļfokusa zemestrīču skaits pieaug straujā ģeometriskā progresijā (7., 8. att.), tam sakrīt ar citām ģeodinamiskām anomālijām, kas sākās tajā pašā periodā. Šo

iekšmantijas sprādzienu pieaugums norāda uz enerģijas palielināšanos planētas dzīlēs un intensīvu mantijas kušanu, kas var izraisīt plaša mēroga vulkānu izvirdumus.



M3+ dziļfokusa zemestrīces



8. att.

M3+ dziļfokusa zemestrīču sadalījums pa gadiem un dziļumiem

Avots: ISC datubāze

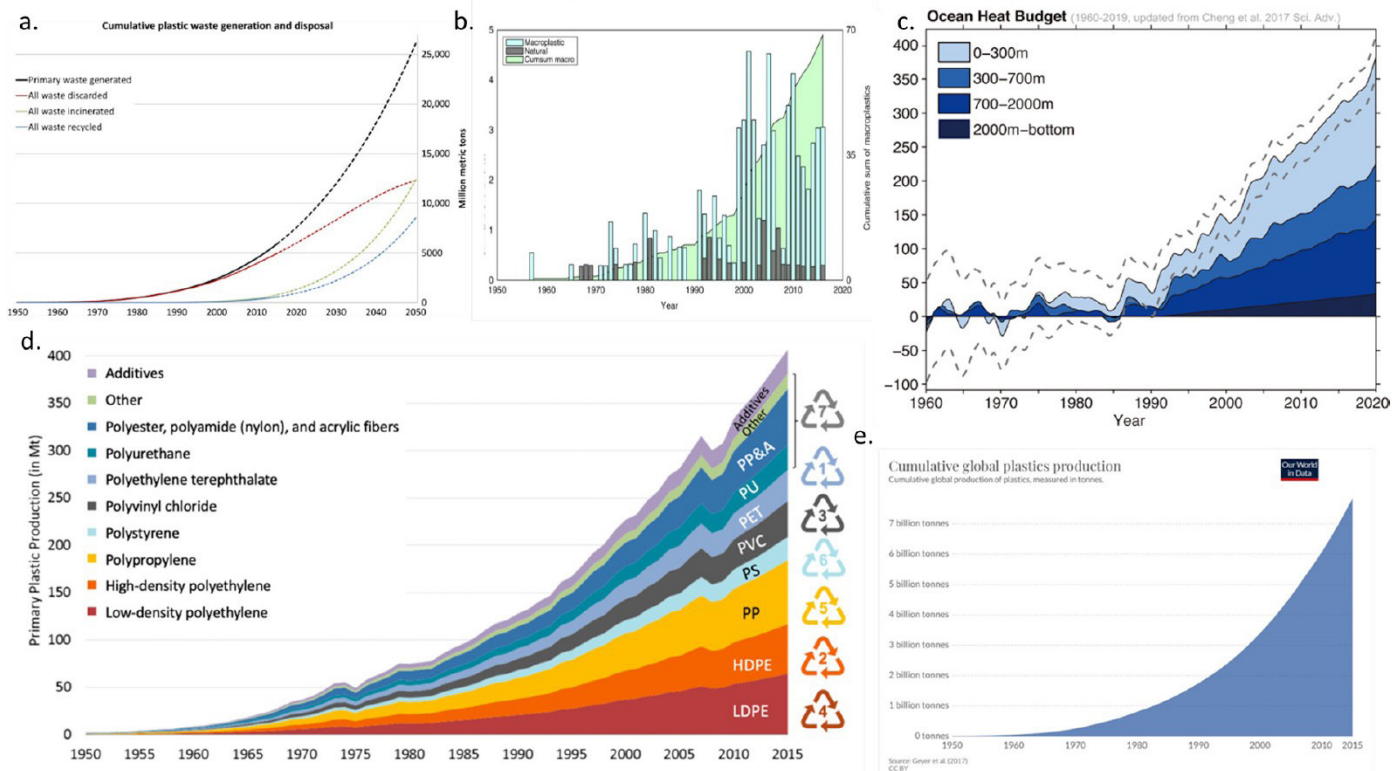
Dziļfokusa zemestrīču pieaugums norāda uz mantijas kušanu, ko izraisa sasīšanās no Zemes kodola. Izkausētā magma mantijā centrālās spēku ietekmē sāk strauji pacelties tuvāk Zemes virsmai, no iekšpuses erodējot un sildot litosfēru vairāk nekā parasti.

Tieši magmas pacelšanās izraisa ģeotermālās plūsmas pieaugumu no Zemes dziļēm, kā arī magmatisko plūsmu aktivizēšanos zem Rietumantarktīdas un Centrālās Grenlandes ledājiem, kas paātrina ledāju un mūžīgā sasaluma kušanu no apakšas uz augšu.

Pašlaik okeāns sasilst kā vēl nekad agrāk,

ievērojami pastiprinot ekstrēmās dabas stihijas, piemēram, plūdus, viesuļvētras un tropiskos ciklonus. Okeānam ir būtiska loma siltuma regulēšanā uz planētas, jo tas spēj absorbēt un pārdalīt lieko siltumu, novēršot katastrofālās sekas.

Taču pašlaik, kad Zemes sasīšanās pastiprinās ģeodinamiskās aktivitātes dēļ, ko izraisa astronomiskie cikli, okeāns ir zaudējis savu spēju novadīt siltumu no Zemes dziļēm. Tas noticis cilvēka izraisītā okeāna piesārņojuma dēļ. Plastmasas atkritumi sadalās mikro- un nanoplastmasā, samazinot ūdens siltumvadītspēju (9. att.).



9. att.

Okeāna temperatūras izmaiņu grafiks laika posmā no 1960. līdz 2019. gadam un tā salīdzinājums ar sintētisko polimēru ražošanas pieaugumu, to izmantošanu dažādās saimniecības nozarēs un plastmasas atkritumu utilizāciju okeānā (no dažādiem avotiem)

a. Kopējais saražoto un utilizēto plastmasas atkritumu daudzums

Avots: 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. Kopējais makroplastmasas daudzums okeānā un gada rādītāji

Avots: 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. Pasaules okeāna temperatūras izmaiņas laika posmā no 1960. līdz 2019. gadam

(Purkey and Johnson, 2010; updated from Cheng et al., 2017)
 Avots: 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. Primārās plastmasas ražošana pasaulē pēc veidiem

Avots: 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. Kopējais saražotās plastmasas daudzums kopš 1950. gada

Avots: Plastic Marine Pollution Global Dataset

Ūdens temperatūras paaugstināšanās notiek ne tikai virspusē, bet arī visos slāņos, kā arī okeāna gultnē. Okeāna sasilšanas cēlonis ir augšupkāpjošā magma, kas īpaši spēcīgi karsē okeānisko garozu, kas ir plānāka un ievainojamāka salīdzinājumā ar kontinentālo garozu.

Vēsturiskie ģeoloģisko un ledus kermu pētījumu dati liecina, ka Zeme ik pēc 12 000 gadu¹⁰ ir saskārusies ar līdzīgiem katastrofāliem cikliem. Savukārt ik pēc 24 000 gadu planetārās katastrofas bija vairākkārt spēcīgākas, par ko liecina vulkānisko izvirdumu pelnu slāņu izpēte ledus kermos¹¹ (10. att.) un citi ģeohronoloģiskie pētījumi. Zeme šobrīd ieiet tieši tādā ciklā. Turklāt pašreizējo ciklu pastiprina antropogēnais faktors - okeāna piesārņojums, kas vēl vairāk pasliktina okeāna spēju regulēt Zemes enerģētisko līdzsvaru.

Okeānam sasilstot, plastmasas atkritumi sadalās mikro- un nanoplastmasā, kas papildus samazina okeāna siltumvadītspēju. Šis siltumvadītspējas zudums ir kritiski svarīgs periodos, kad astronomisko ciklu izraisītā ģeodinamiskā aktivitāte pastiprinās. Pārmērīgas enerģijas uzkrāšanās Zemes dzīlēs ir novedusi

pie dziļfokusa zemestrīču skaita pieauguma un straujas jaunu magmatisko krātuvju veidošanās, kas vēl vairāk palielina planētas nestabilitāti. Šis apburtais loks paātrina Zemes sasilšanu un destabilizāciju, arvien vairāk tuvinot planētu nenovēršamai bojāejai.

Matemātiskā modelēšana parāda, ka pasaules ekonomiskās un sociālās sistēmas var sabrukt tuvāko 4–6 gadu laikā pieaugošā klimata katastrofu kaitējuma dēļ. Katastrofālo notikumu eksponenciālais pieaugums draud padarīt Zemi neapdzīvojamu nākamās desmitgades laikā (11. att.).

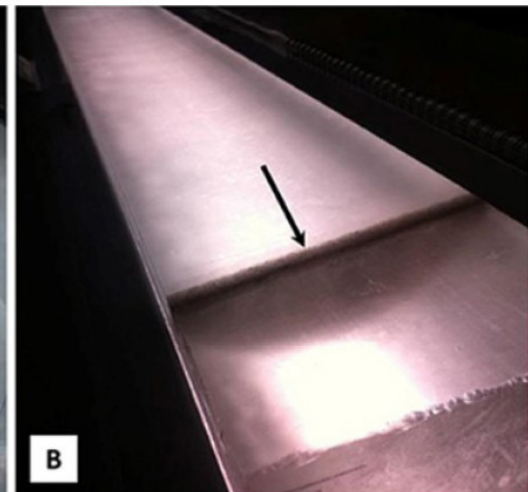
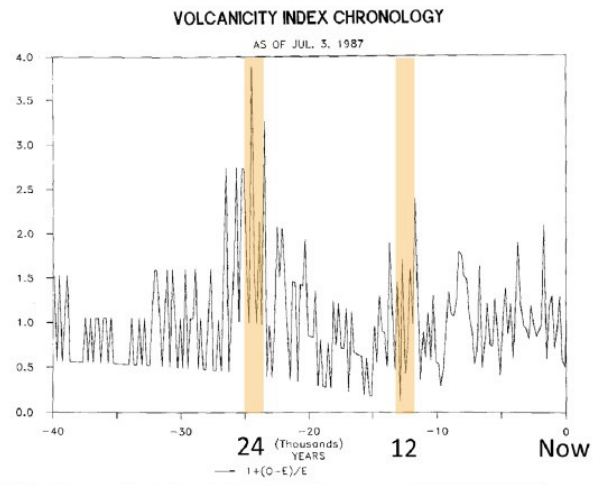
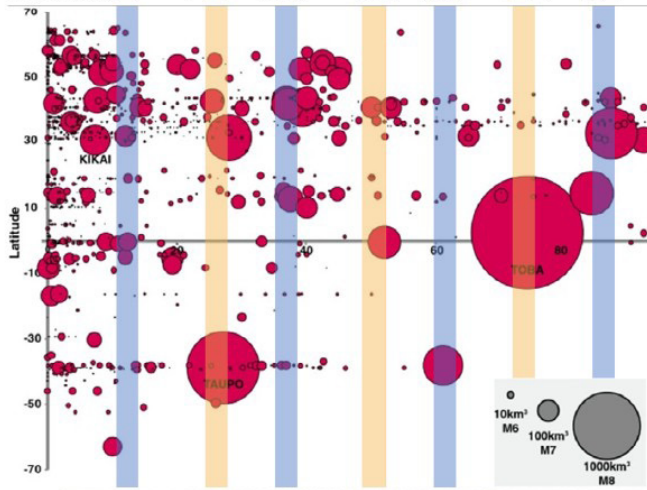
Atšķirībā no iepriekšējiem cikliem, pašreizējais planētas stāvoklis pasliktinās cilvēka darbības izraisītā piesārņojuma dēļ, kas atstāj maz cerību uz ekosistēmu un pašas Zemes izdzīvošanu. **Ir svarīgi saprast, ka piesārņojuma un okeāna sasilšanas problēmas risināšana var palēnināt katastrofu attīstību, taču nevar tās apturēt.**

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>

Katastrofiski vulkānu izvirdumi notiek 12 000 gadu ciklā

Now 12 24 36 48 60 72 84



10. att.

Pētījumu dati par vulkānisko izvirdumu pelnu slāņiem pēdējo 100 000 gadu laikā Antarktīdas un Arktikas ledus keros no dažādu autoru darbiem

Avots: Brown, S. K., Croweller, 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

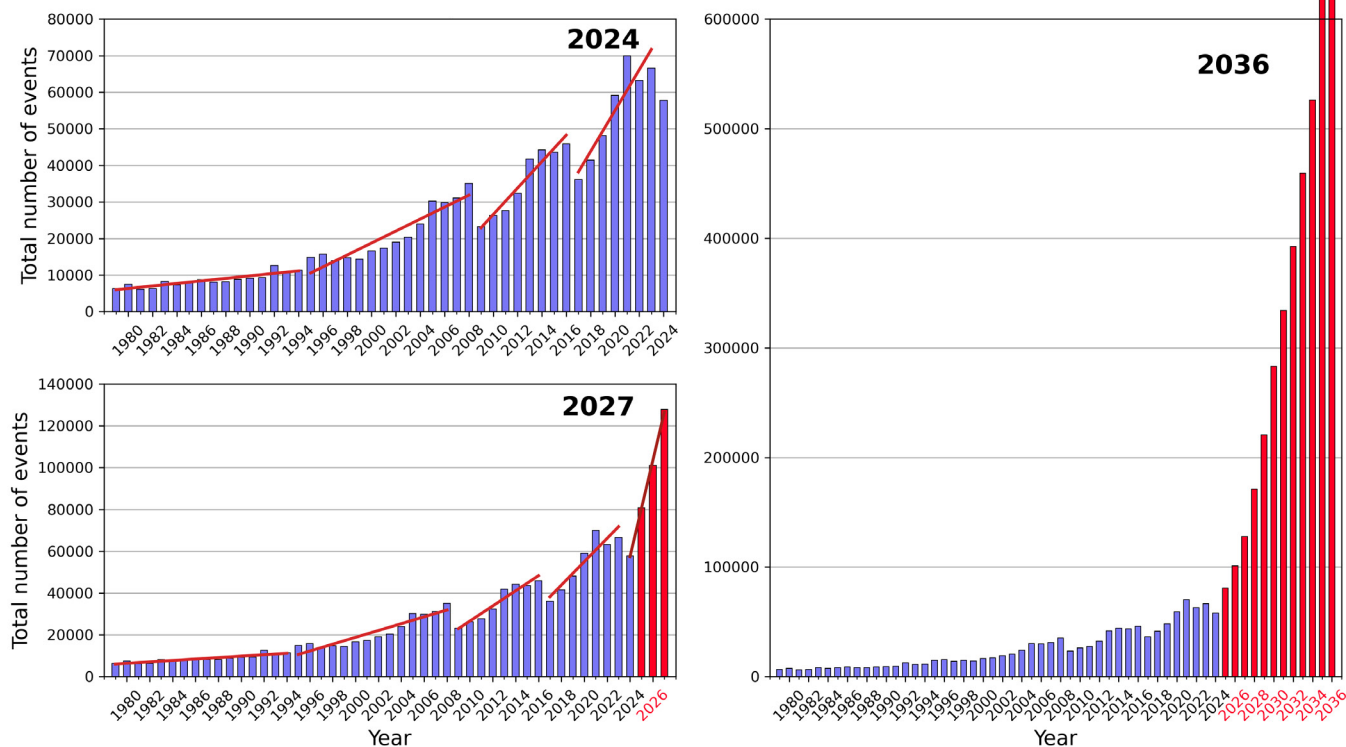
modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125. <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

Grafiki ilustrē katastrofālu vulkānisko aktivitāti katrus 12 000 gadus un vēl intensīvāku aktivitāti katrus 24 000 gadus (ņemot vērā vecuma noteikšanas kļūdu robežas). Šādi katastrofiski notikumi izraisīja krāsas temperatūras svārstības, dabas katastrofas, vulkāniskās ziemas un masveidīgu sugu izmiršanu. Daudzi supervulkāni, kas izvirda iepriekšējos ciklos, mūsdienās uzrāda anomālu aktivitāti, it īpaši kopš 1995. gada.

Pieaugošo katastrofu attīstība, ilustrēta ar zemestrīču piemēru

M3+ Earthquakes Globally 1979-2024

volcanodiscovery.com



11. att. Eksponenciālā dabas katastrofu skaita pieauguma modelis, izmantojot zemestrīču piemēru līdz 2036. gadam

Grafiki ilustrē zemestrīču skaita un intensitātes pieaugumu ģeometriskā progresijā, balstoties uz pašreizējo tendenci. Katrā nākamajā etapā zemestrīču skaits trīskāršojas. Jau līdz 2028. gadam

uz Zemes dienā notiks 1 000 M3,0+ zemestrīces, savukārt pašlaik šādu zemestrīču skaits ir 125 dienā.

Ar lielu varbūtību jau pēc sešiem gadiem uz Zemes katru dienu notiks zemestrīces, kas būs tikpat postošas kā Turcijā un Sīrijā notikusī zemestrīce 2023. gada 6. februārī.

Šajā ziņojumā aplūkots papildu apdraudējums, ko rada Zemes kodola pārmaiņas, kas saistītas ar ārējas enerģijas pieplūdumu. 1997.–1998. gadā zinātnieki, izmantojot Zemes masas centra satelītstatus, reģistrēja bezprecedenta parādību – Zemes iekšējā kodola lēcieni. Šī notikuma rezultātā planētas kodols pārvietojās uz ziemeļiem līnijā no Rietumantarktīdas uz Austrumsibīriju un Taimiras pussalu Krievijas Federācijā. Šāda kodola pārvietošanās izraisīja nekontrolētu magmas pacelšanos šajā virzienā, kā rezultātā zem Sibīrijas sāka strauji pacelties milzīgs magmatiskais plums.

Pašlaik Sibīrijas plums jau ir sasniedzis Zemes garozas pamatni Austrumsibīrijas kratona ziemeļu daļā un ir sācis pacelt plātņi. Tas nozīmē, ka sakarsētā magma jau ir sākusi kausēt sev ceļu uz virsmu.

Nekontrolēts Sibīrijas pluma izvirdums var izraisīt globālu izmiršanu, neatstājot cilvēcei nekādas izdzīvošanas iespējas, jo saskaņā ar aprēķiniem šāds izvirdums būs 1 000 reižu spēcīgāks par vislielāko Jeloustonas supervulkāna izvirdumu. Tamlīdzīgi Sibīrijas magmatiskā pluma izvirdumi notika pirms 250 miljoniem gadu, izraisot Lielo permas izmiršanu.

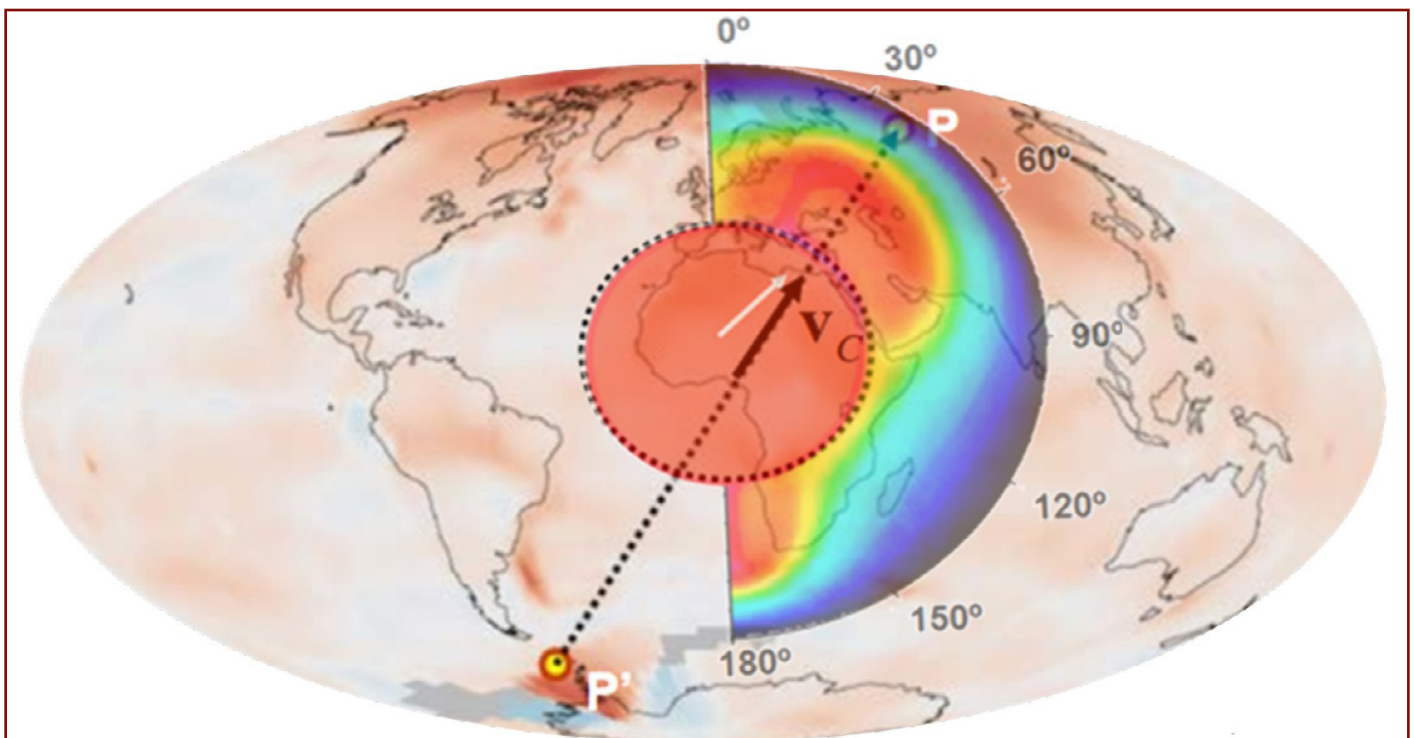
Šajā ziņojumā tiek aplūkoti trīs iespējamie turpmākās attīstības scenāriji, kā arī piedāvāti soļi Sibīrijas pluma pacelšanās problēmas risināšanai un tā nekontrolētas izlaušanās risku mazināšanai.

Kodola nobīde

Sibīrijas virzienā 1998. gadā

1997.–1998. gadā zinātnieki, izmantojot Zemes masas centra satelītdatus, reģistrēja bezprecedenta parādību – Zemes iekšējā kodola lēcieni.^{12,13} Šī notikuma rezultātā

planētas kodols pārvietojās uz ziemeļiem līnijā no Rietumantarktīdas uz Taimiras pussalu Austrumsibīrijas ziemeļos (12. att).



12. att.

Kodola lēcieni 1997.–1998. gadā un siltuma viļņi magmā, kas radušies kodola nobīdes rezultātā. (J. V. Barkins)

Kartē ilustrēts Zemes iekšējā kodola pārvietošanās vektors līnijā no Rietumantarktīdas uz Austrumsibīriju, Taimiras pussalas virzienā. Shēma attēlota uz atmosfēras siltuma anomāliju kartes.

Avots: 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.

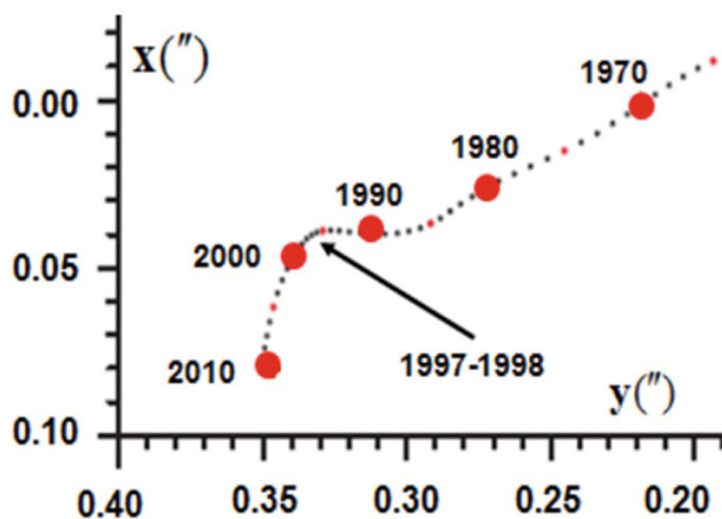
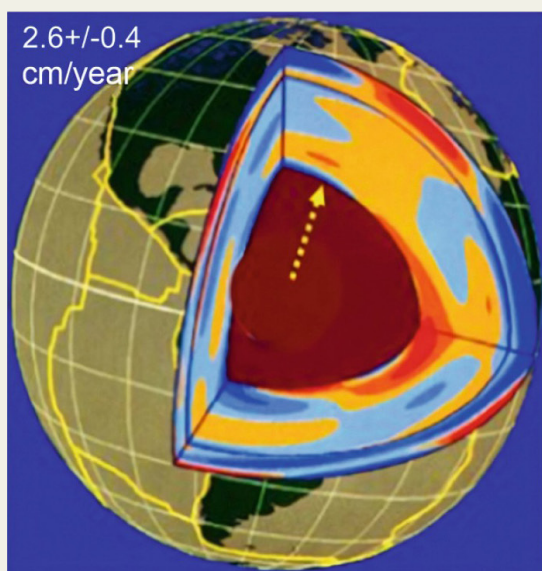
¹³ Smolkov, G. Ya. (2018). Exposure of the solar system and the earth to external influences. *Physics & Astronomy International Journal*, 2(4), 310-321. <https://doi.org/10.15406/paij.2018.02.00104>

Vienā un tajā pašā laikā četri dažādi zinātniskie kolektīvi neatkarīgi viens no otra reģistrēja anomālas izmaiņas dažādos Zemes ģeofizikālajos parametros. Saskaņā ar satelīta datiem autoru kolektīvs no Lomonosova Maskavas Valsts universitātes un Krievijas Zinātņu akadēmijas Zemes fizikas institūta 1998. gadā konstatēja Zemes masas centra lēcienus¹⁴ (13. att.).

Tajā pašā periodā Starptautiskais Zemes rotācijas dienests (MSVZ) reģistrēja strauju planētas rotācijas paātrināšanos. Vienlaikus Medicīnas observatorijā Itālijā zinātnieki fiksēja gravitācijas spēka lēcienus¹⁵. Vienlaikus ar šo notikumu tika novērotas krasas izmaiņas Zemes

formā,¹⁶ kas tika reģistrētas, izmantojot ASV satelītu lāzera tālmērīšanas sistēmu.

Saskaņā ar fizikas un matemātikas zinātņu doktora, profesora J. V. Barkina, tehnisko zinātņu doktora, profesora G. J. Smolkova,¹⁷ ģeogrāfijas zinātņu doktora, profesora M. L. Arušanova,¹⁸ Krievijas Zinātņu akadēmijas akadēmiķa, Lomonosova Maskavas Valsts universitātes goda profesora, ģeoloģijas un mineraloģijas zinātņu doktora V. E. Haina¹⁹ un daudzu citu zinātnieku viedokli kodola lēcienš kļuva par izmaiņu cēloni visos Zemes apvalkos.



13. att.

Zemes iekšējā uzbūve, Zemes masas centra sekulārās dreifēšanas virziens un tās pola trajektorija uz Zemes virsmas laika posmā no 1990. līdz 2010. gadam, ar gandrīz 90 grādu pagriezienu 1997.–1998. gadā Taimiras pussalas virzienā

Avots: Smolkov, G.Ya. (2020). Heliogeophysical Research. Issue 25, 14–29. Retrieved from

<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569>

Grafika avots: Barkin, Y.V., & Klige, R.K. (2012)

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

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

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

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

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

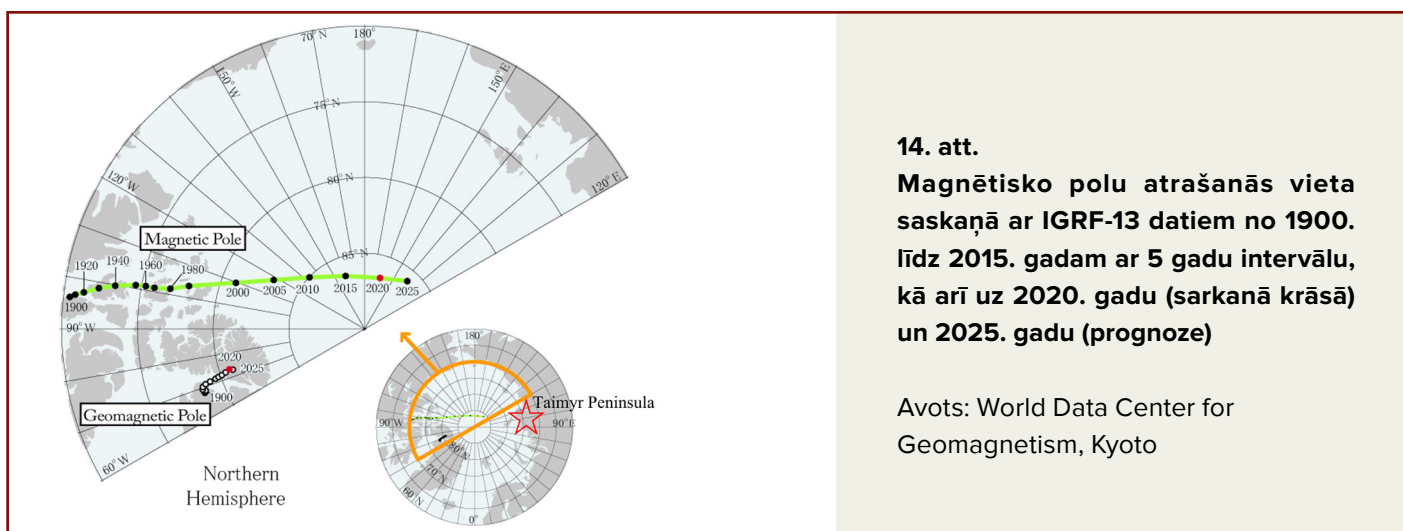
¹⁹ International Committee GCGE GEOCHANGE. (2010). Global environmental changes: Threat to civilization development (Vol. 1). London: GCGE. ISSN 2218-5798

Svarīgi atzīmēt, ka tieši šajā virzienā 1995. gadā sākās straujš Ziemeļu magnētiskā pola dreifs. Kopš pagājušā gadsimta sākuma tas pārvietojās vidēji ar ātrumu 10 km/gadā, bet tad pēkšņi palielināja savu ātrumu, sasniedzot maksimālo ātrumu 57 km/gadā, un mainīja trajektoriju, virzoties uz Sibīriju un Taimiras pussalu²⁰ (3., 14. att).

Tas norāda, ka apstākļi, lai kodols pārvietotos Taimiras pussalas virzienā, sāka veidoties jau 1995. gadā, kad notika Zemes ārējā šķidrā kodola sašķidrināšanās. 2013. gadā Līdsas Universitātes zinātnieki noskaidroja, ka šīs izmaiņas magnētiskajā laukā izraisījusi paātrināta šķidrā dzelzs plūsma Zemes ārējā kodolā²¹ (15. att.), kas, visticamāk, sākās 1995. gadā.

Saskaņā ar literatūras datiem ir konstatēta korelācija starp magnētiskā lauka inversiju

biežumu un mantijas magmatizācijas intensitāti.^{22,23,24} Turklāt ir zināms, ka magnētiskā lauka inversijas, iespējams, ir saistītas ar procesiem, kas notiek ārējā kodolā netālu no kodola un mantijas robežas.²⁵ Korelācija starp mantijas magmatizācijas intensitātes izmaiņām un Zemes magnētiskā lauka inversiju biežumu norāda, ka Zemes magnētiskā lauka traucējumi rodas ārējā kodolā, mainoties siltuma pārnesei intensitātei uz plumu pamatnēm, kas atrodas uz kodola-mantijas robežas. Kopējā plumu siltuma jauda pieaug, gan veidojoties jauniem plumiem, gan palielinoties jau esošo aktīvo plumu siltuma jaudai. Var pieņemt, ka ģeodinamiskie traucējumi ārējā kodolā un mantijā rodas periodos, kad plums sāk veidoties un lauzties uz virsu.²⁶



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

²¹Livermore, 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>

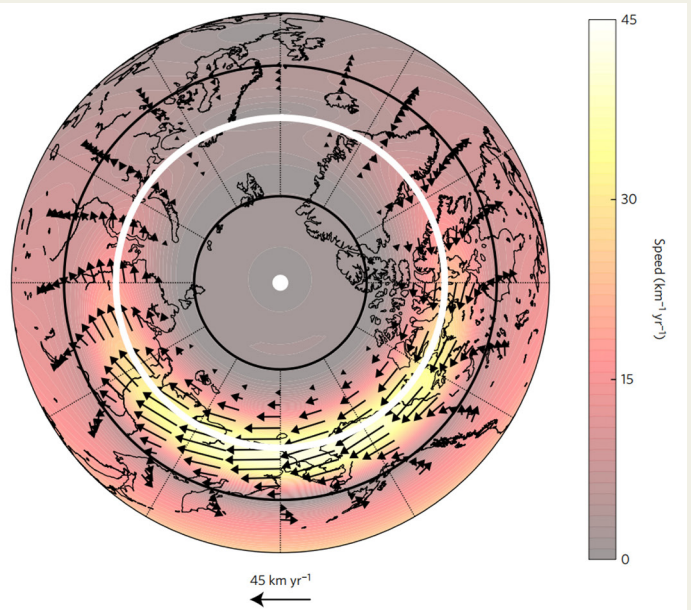
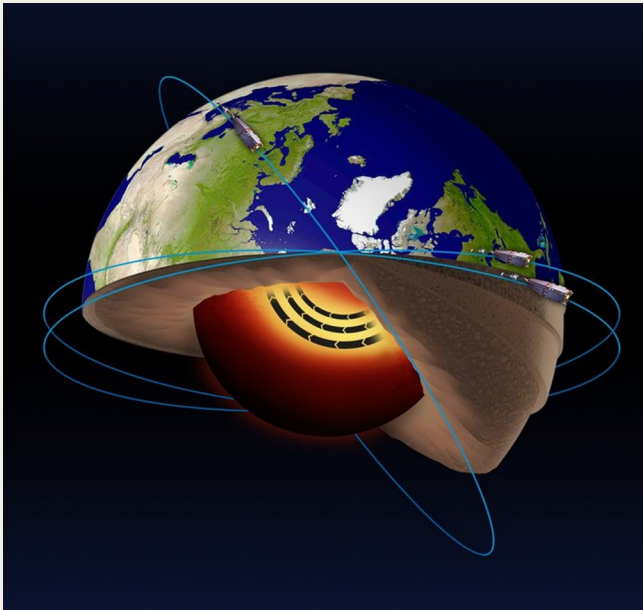
²²Alain Mazaud, Carlo Laj, The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 107, Issues 3–4, 1991, Pages 689–696, ISSN 012-821X, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90111-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T)

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.



15. att.

ESA Swarm satelītu datu analizē ir atklāta strūkļas plūsma Zemes kodola šķidrā dzelzs slānī 3000 km dziļumā zem virsmas, kā arī tas, ka šī strūkļas plūsma paātrinās

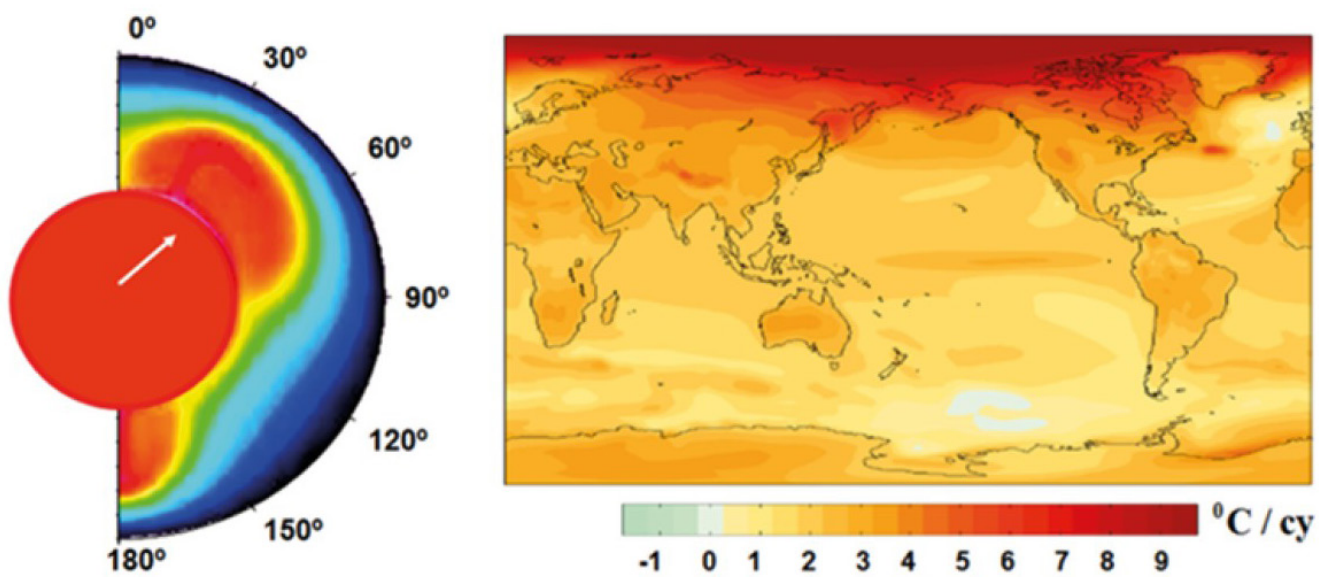
Avots: ESA

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

Tādējādi pašreizējais Ziemeļu magnētiskā pola dreifs Taimiras pussalas virzienā var būt papildu apstiprinājums izmaiņām Zemes ārējā šķidrā kodolā un straujam pluma pacēlumam no kodola-mantijas robežas zem Sibīrijas.

Ārējās kosmiskās ietekmes rezultātā 1995. gadā sākās Zemes iekšējā kodola sasīšana un ārējā kodola kušana, kas strauji paātrināja Ziemeļu magnētiskā pola dreifu. Ārējā kodola sašķidrināšanās kļuva par priekšnoteikumu kodola nobīdei 1997.–1998. gadā Sibīrijas

virzienā, uz Taimiras pussalu. Saskaņā ar zinātni doktora, profesora J. V. Barkina izvirzīto hipotēzi kodola pārvietošanās izraisīja asimetrisku siltuma padevi Sibīrijas virzienā (16. att.). Svarīgi atzīmēt, ka siltuma pārnese mantijā galvenokārt notiek konvektīvās cirkulācijas ceļā. Respektīvi, var konstatēt, ka kodola lēciens primāri izraisīja magmas pacēšanos Sibīrijas virzienā. Vēlāk šajā Sibīrijas daļā sāka novērot anomālu atmosfēras sasīšanu, un šī sasīšana katru gadu pieaug.



16. att.

Piespiedu relatīvā kodola un mantijas nobīde un asimetriskās siltuma padeves shēma mantijas augšējās slāņos (pa kreisi). Virsmas sasilšanas lineārās tendences ($^{\circ}\text{C}$ uz gadsimtu) saskaņā ar NCAR CCSM3 datiem, vidējo rādītāju aprēķinot pēc īpaša scenārija https://www.researchgate.net/figure/Linear-surface-warming-trend-in-C-per-century-from-NCAR-CCSM3-averaged-from-9-ensemble_fig1_266558233 (pa labi)

Avots: Barkin, Yu.V. (2009). Ciklicheskie inversionnye izmeneniya 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*:

Sibīrija un Sibīrijas Arktika sasilst 3–4 reizes ātrāk nekā pārējā pasaule

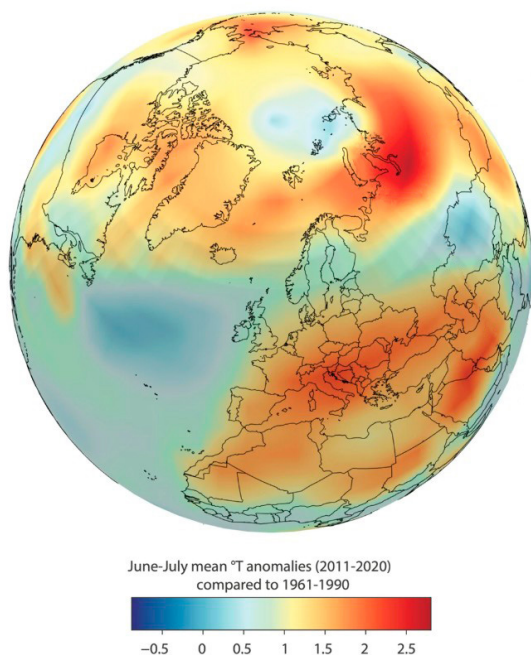
Saskaņā ar dažādu organizāciju datiem Krievijas teritorija, īpaši Arktikas reģions, piedzīvo ekstremālu sasilšanu.

Saskaņā ar Starpvaldību klimata pārmaiņu ekspertu grupas (IPCC) 2021. gada datiem Krievija sasilst trīs reizes ātrāk nekā pārējā pasaule, bet tās Arktikas un Sibīrijas reģioni – četras reizes ātrāk nekā globālais vidējais rādītājs.

2022. gadā Krievijas Hidrometeoroloģijas centra vadītājs Igors Šumakovs, atsaucoties uz Pasaules meteoroloģiskās organizācijas datiem,²⁷ paziņoja, ka Krievijas teritorija sasilst 2,5 reizes ātrāk nekā pārējā planēta, un visstraujāk temperatūra pieaug valsts ziemeļu polārajā reģionā, it īpaši pēdējās desmitgadēs.

Sibīrija ir viens no reģioniem, kurā novērojama visintensīvākā sasilšana pasaulē (17. att.), kas, pēc dendroklimatisko pētījumu rekonstruētajiem datiem, ir bezprecedenta tendence pēdējo 7000 gadu laikā.²⁸

Amerikas klimata pētījumu centrs “Woodwell” (WCRC)²⁹ veica plaša mēroga pētījumu, lai novērtētu, kā klimata pārmaiņas ietekmējušas temperatūru, augsnes mitrumu, sniega segas biezumu, nokrišņu līmeni un citus svarīgus klimata rādītājus dažādos Arktikas reģionos. Lai to paveiktu, zinātnieki apvienoja un sistematizēja datus, kas savākti ar satelītiem, lidmašīnām, droniem un zemes meteoroloģiskajām stacijām pēdējo 40 gadu laikā.



17. att.
Vidējās temperatūras anomālijas jūnijā–jūlijā Ziemeļu puslodē (Jamalas un Taimiras pussalās) pēdējā desmitgadē (2011–2020). Temperatūras izteiktas kā anomālijas attiecībā pret bāzes klimatu 1961–1990, izmantojot HadCRUT.5 datu kopu

Avots: 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>

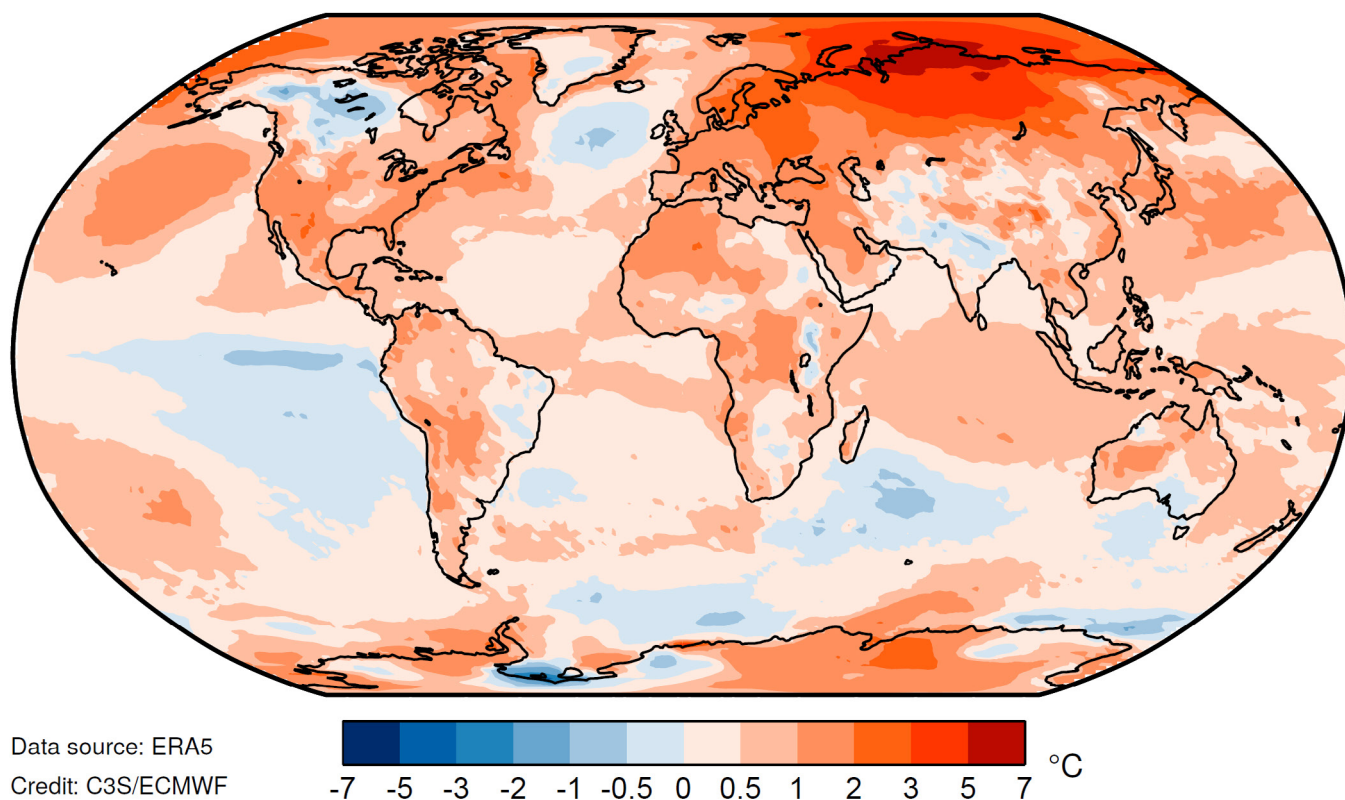
Turpmākā šo datu analīze ļāva pētniekiem identificēt aptuveni divdesmit klimata “karstās zonas”. Visintensīvāk sasilšana skārusi Austrumsibīrijas piepolāros un centrālos reģionus, kur vidējā gada temperatūra katrā desmitgadē palielinājās par 1,1 grādu pēc Celsija, kas ir daudzreiz ātrāk nekā vispārējie globālās sasilšanas tempi. Vēl straujāk temperatūra pieaugusi Taimirā – par 1,7 grādiem dekādē. Tāpat arī Sibīrijas taigas temperatūra kopš 1980. gadu beigām palielinājusies ar tempu 0,6 grādi desmitgadē.

Karstuma viļņi Sibīrijā pēdējos gados ir sasnieguši jaunu, satraucošu līmeni, it īpaši 2020. gadā, kad temperatūra visā reģionā strauji paaugstinājās (18. att.).

Temperatūras Sibīrijā no janvāra līdz jūnijam bija vairāk nekā par 5 °C augstākas par vidējo, bet jūnijā – līdz pat 10 °C augstākas par normu (attiecībā pret 1981.-2010. gadu līmeni). Šis ārkārtīgi karstais periods izraisīja vietējo temperatūras rekordu pārsniegšanu, tostarp Verhojanskas meteoroloģiskajā stacijā, kur 20. jūnijā tika reģistrēts absolūtais rekords +38 °C (19. att.).

Krievijas meteoroloģijas dienests paziņoja, ka šī izmērītā temperatūra bija augstākā jebkad reģistrētā temperatūra aiz Polārā loka.

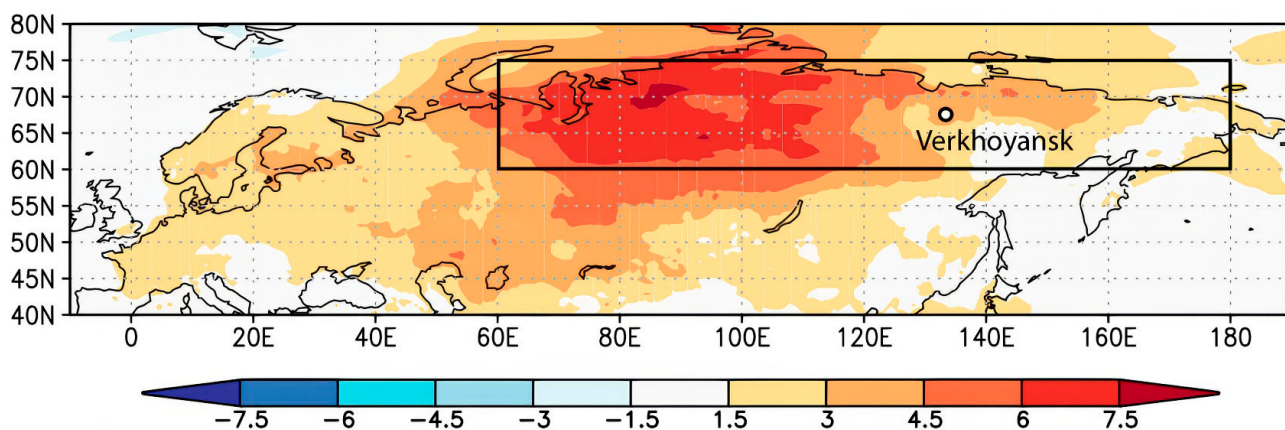
Virsmas gaisa temperatūras anomālija 2020. gadā
Atsauces periods: 1981–2010



18. att.

Temperatūras novirze 2020. gadā no vidējiem 1981.-2010. gadu rādītājiem

Avots: Copernicus Climate Change Service, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)



19. att.

Ilgstošais karstums Sibīrijā: vidējās temperatūras 2020. gada janvārī–jūnijā salīdzinājumā ar normu (1981–2010) Sibīrijas reģionā un Verhojanskas pilsētas atrašanās vietā, kur jūnijā tika reģistrēta rekordaugsta diennakts temperatūra aiz Polārā loka (+38 °C)

Avots: 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>

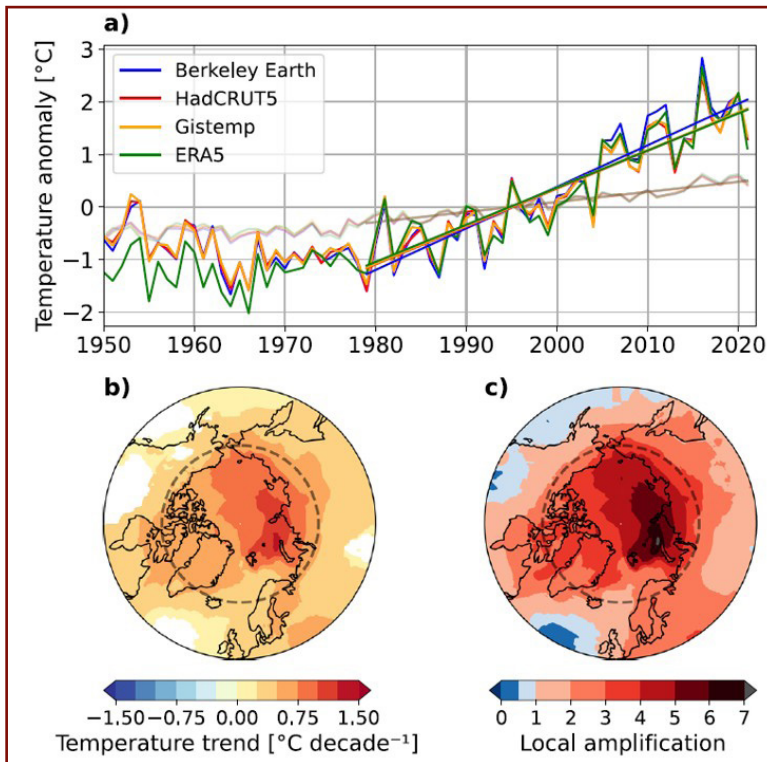
Šie karstuma viļņi neatrodas virs Sibīrijas pastāvīgi, tiem ir pulsējošs svārstību raksturs. Tas ir saistīts ar to, ka šos karstuma viļņus izraisošās magmas iekļūšana notiek viļņveidīgi. Atmosfērā, kur gaisa masas brīvi pārvietojas un sajaucas, karstuma viļņi var mazināties pēc dažiem mēnešiem, kā tas notika 2020. gadā, atšķirībā no karstuma viļņiem ūdens vidē.

Saskaņā ar 2022. gada pētījumiem Sibīrijas Arktika sasilst gandrīz četras reizes ātrāk nekā Zeme kopumā, kas ir augstāka attiecība, nekā iepriekš ņemts vērā klimata modeļos, un tas zinātniekiem ir ārkārtīgi negaidīts rezultāts³⁰

(20. att).

Svarīgi atzīmēt, ka šī Arktikas reģiona sasilšana notiek tieši Taimiras pussalas apgabalā. Šādu anomāliju, kas novērojama tieši Sibīrijas akvatoriālajā zonā, var izskaidrot ar to, ka okeāniskā garoza ir plānāka un efektīvāk vada siltumu un ūdenim ir lielāka siltumietilpība nekā atmosfērai. Tāpēc tieši okeāna ūdens intensīvi uzkrāj un saglabā siltumu no augšupejošā magmatiskā pluma, neskatoties uz to, ka šī pluma pacelšanās notiek zem kontinentālās garozas, salīdzinoši tālu no krasta līnijas.

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>



20. att.

Vidējās gada temperatūras dinamika Arktikā

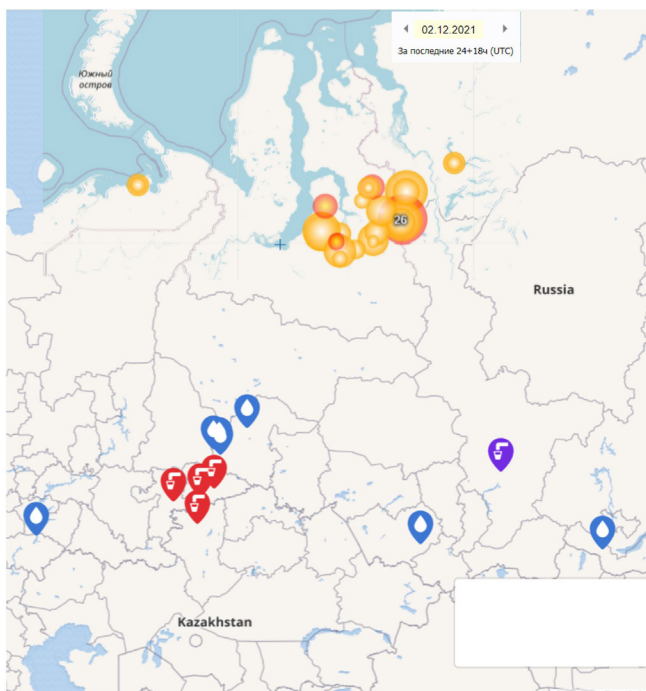
a) Vidējās gada temperatūras anomālijas Arktikā (66,5°–90°Z) (tumšie toņi) un pasaulē (gaišie toņi) laikposmā no 1950. līdz 2021. gadam, balstoties uz dažādiem novērojumu datu kopumiem. Temperatūras anomālijas aprēķinātas attiecībā pret 30 gadu vidējo rādītāju (1981–2010). Ar punktēto līniju (b) un (c) attēlos parādīts Polārais loks (66,5°Z).

Avots: 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>

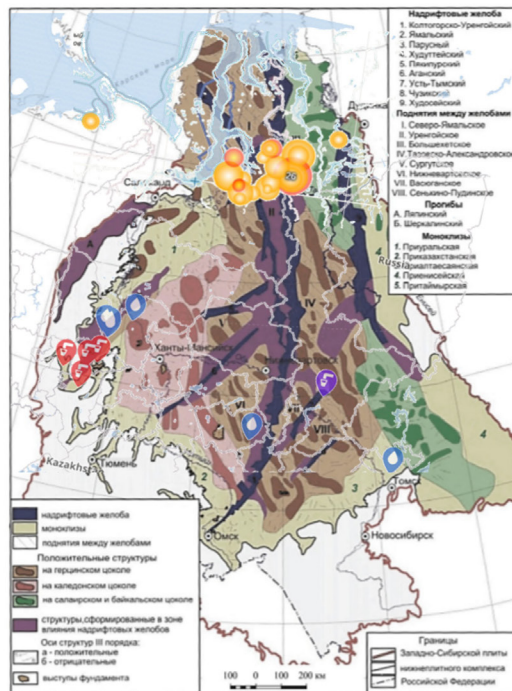
Netiešās Sibīrijas pluma pacelšanās procesa pazīmes

Sibīrijas magmatiskā pluma iespiešanās Zemes garozā izraisa ne tikai atmosfēras sasilšanu, bet arī virkni citu anomāliju: mūžīgā sasaluma kušanu no apakšas uz augšu, seismiskās aktivitātes pieaugumu reģionā, karsto ūdeņu pacelšanos līdz virsmai, kā rezultātā akās sāk vārīties ūdens, kā arī bezprecedenta mežu ugunsgrēkus visā Sibīrijā,

tostarp zem sniega. Pēdējos gados ugunsgrēki zem sniega visvairāk izpaužas Taimiras, Jamalas un Gīdanas pussalu polāro reģionu dienvidos. Svarīgs faktors ir tas, ka ugunsgrēku izplatīšanās zem sniega (“zombiju ugunsgrēki”) un ūdens vārīšanās akās tiek novērota virs dziļajiem tektoniskajiem lūzumiem (21. att.).



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]"

21. att.

Kartē parādīta ziemas savvaļas ugunsgrēku lokalizācija zem sniega aiz Polārā loka 2021. gadā



Fotogrāfijās redzami ugunsgrēki zem sniega Sverdlovskas apgabalā

Ziemeļu platuma grādos tiek novērots metāna un ūdeņraža emisiju pieaugums no Zemes dziļēm, dabasgāzes sprādzienu krāteru skaita palielināšanās un dubļu vulkānisma pastiprināšanās Arktikas šelfā. Siltums no apakšas izraisa mūžīgā sasaluma degradāciju un gāzu hidratu sairšanu, kas noved pie gāzu

izdalīšanās, sprādzienu krāteru veidošanās un dubļu vulkānisma pieauguma. No Zemes dziļēm izejošās gāzes ietekmē atmosfēru, izraisot papildu siltuma, ģeoķīmiskās un elektromagnētiskās anomālijas. Apskatīsim šos procesus sīkāk.

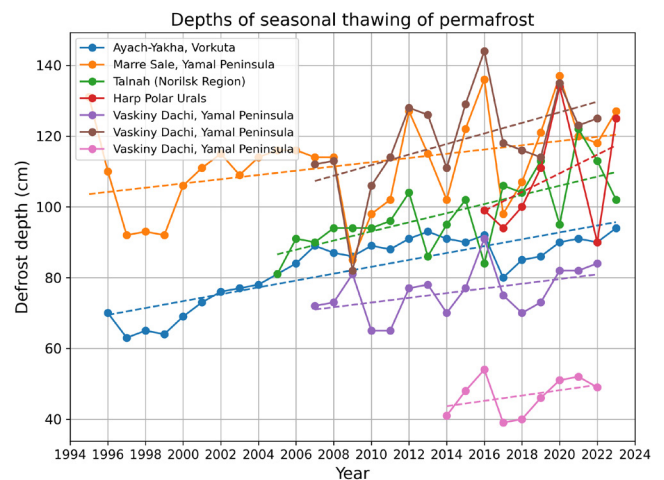
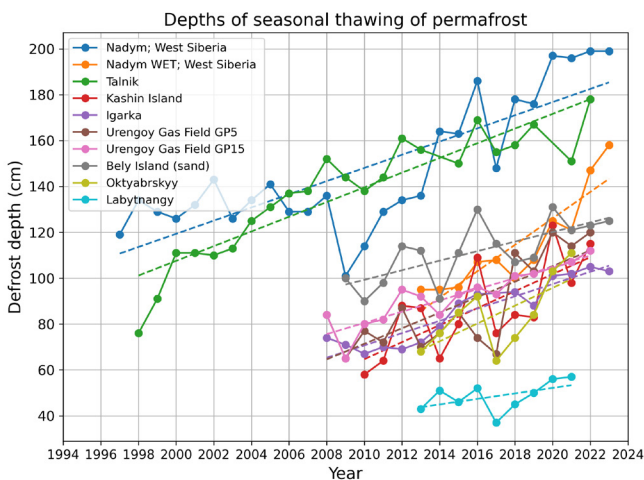
Mūžīgā sasaluma kušana

Vēl viens papildu ģeotermālā siltuma no mantijas pluma indikators ir mūžīgā sasaluma stāvoklis. Ziņojuma autori analizēja datus par sezonālā mūžīgā sasaluma kušanas dziļumu Krievijā laika posmā no 1994. līdz 2023. gadam. Datu bāze tika izveidota, balstoties uz mērījumiem, kas veikti programmā “Circumpolar Active Layer Monitoring” (CALM), novērojot aktīvās kārtas un virsmas tuvumā esošā mūžīgā sasaluma reakciju. Datu bāze ir pieejama vietnē permafrost.su.

Pašlaik Krievijas teritorijā darbojas 58 novērojumu vietas, kur, izmantojot standartizētu metodiku, tiek veikti mūžīgā sasaluma novērojumi.

Un 46 no šīm vietām mērījumi tiek veikti jau vairāk nekā 10 gadus, kas ļauj noteikt ilgtermiņa tendences. Savāktu datu analīze ļāva konstatēt vietas ar pastāvīgu mūžīgā sasaluma atkuššanas dziļuma palielināšanās tendenci, kas norāda uz papildu siltuma pieplūdi šajā zonā.

Tika izdalītas divas datu grupas: novērojumu vietas ar izteiktāku atkuššanas dziļuma palielināšanās tendenci (no 40 cm līdz 200 cm) (22. att., a) un novērojumu vietas ar mazāk intensīvu mūžīgā sasaluma atkuššanas ātrumu (no 40 cm līdz 140 cm) (22. att., b).



22. att.

Sezonālā mūžīgā sasaluma kušanas dziļuma izmaiņas dažādos reģionos ar atšķirīgu intensitāti: a) ar izteiktāku kušanas dziļuma pieaugumu; b) ar mazāk izteiktu kušanas dziļuma pieaugumu

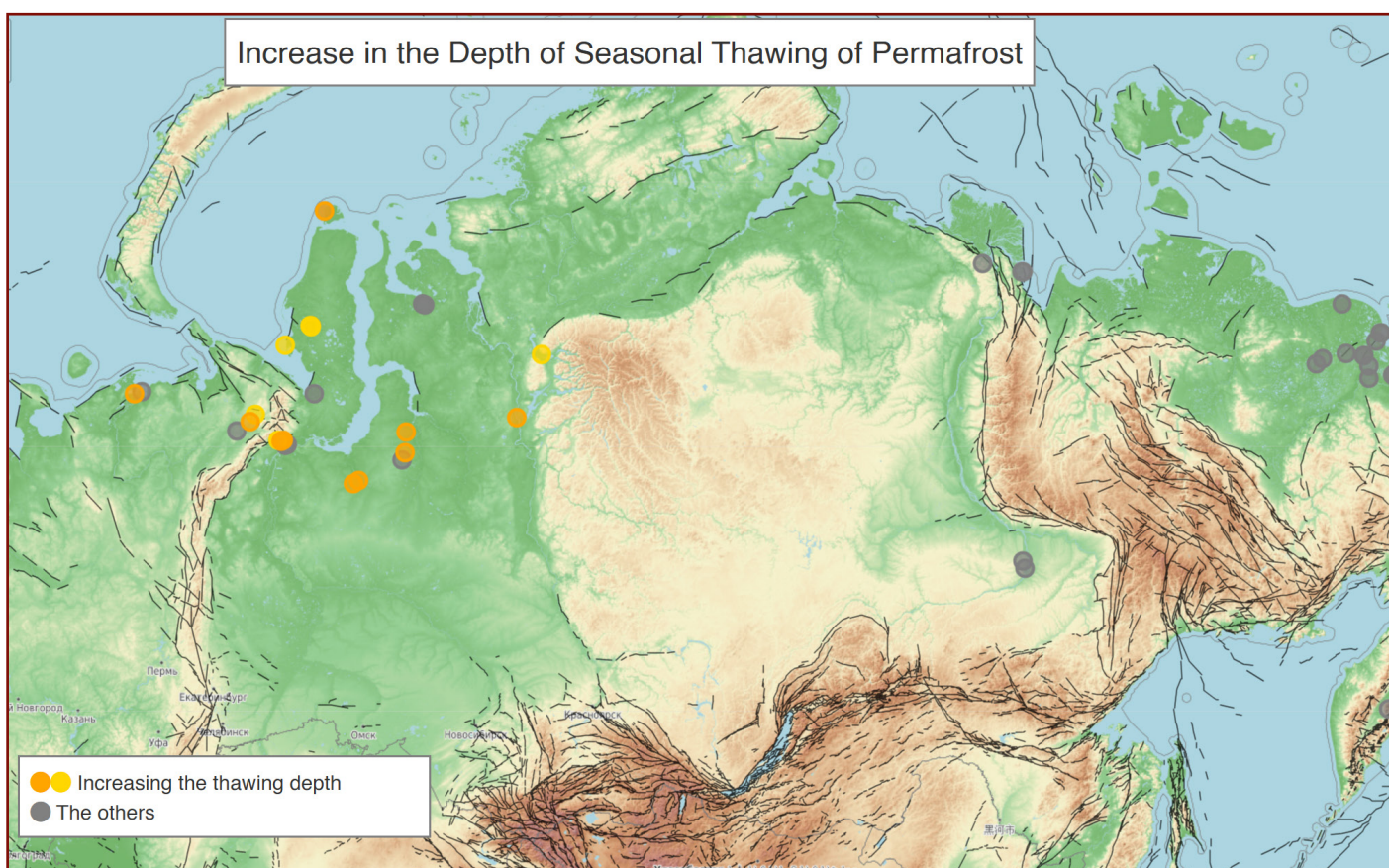
Datu avots: <https://permafrost.su>

Mērījumi veikti starptautiskā cirkumpolārā monitoringa programmā (CALM):

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

Lai nodrošinātu vizuālu skaidrību, visas pētījumu vietas tika atzīmētas kartē un attiecīgi atzīmēti oranžā un dzeltenā krāsā (23. att.). Svarīgi atzīmēt, ka šīs vietas galvenokārt koncentrētas noteiktā reģionā: Rietumsibīrijas ziemeļos, Jamalas pussalā un uz dienvidiem no Gidasas un Taimiras pussalām.

Šāda maksimālās mūžīgā sasaluma kušanas zonu lokalizācija atbilst reģionam, kur mantijā novērota samazināta seismisko viļņu ātruma zona, kas, iespējams, sakrīt ar magmatiskā pluma galvas izplatīšanās zonu. Tas savukārt izraisa paaugstinātu augsnes temperatūru, tostarp sasalušajā slānī.



23. att.

Vietas ar palielinātu sezonālā mūžīgā sasaluma kušanas dziļumu. Mērījumu vietas ir atzīmētas ar punktiem: pelēkie – vietas, kur sezonālās kušanas pieaugums nav nozīmīgs, dzeltenie – vietas, kur kušanas dziļums palielinās

Datu avots: <https://permafrost.su>

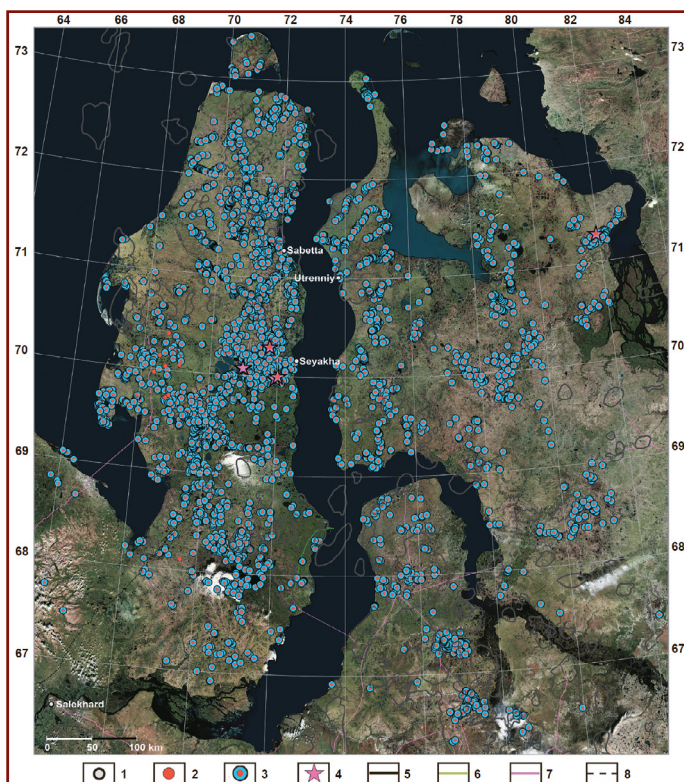
Mērījumi veikti starptautiskā cirkumpolārā monitoringa programmā (CALM):

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

Dubļu vulkānisma izpausmes

Papildu siltums no augšupejošās magmas izraisa mūžīgā sasaluma iežu degradāciju un ietekmē šajos grunts slāņos iekonservētos gāzu hidrātus, atbrīvojot lielus ieslodzīto gāzu apjomus. Papildus tam notiek gāzes migrācija no dabasgāzes krātuvēm un ar gāzēm stipri piesātinātiem pazemes ūdeņiem, kas samazina grunts elastības un izturības īpašības, kā arī veicina mālu sašķidrināšanos, kas var izraisīt dubļu vulkānisma procesus. Dubļu vulkānisms ir ģeoloģisks process, kurā gāzes, ūdens un iežu fragmentu maisījums izplūst pa Zemes garozas

plaisām iekšējā ģeostatiskā spiediena ietekmē. Krievijas Zinātņu akadēmijas zinātnieki šādus procesus atklāja Arktikā, Jamalas pussalā.³¹ Laika posmā no 2014. līdz 2022. gadam, veicot kompleksus ģeoloģiskos un ģeofiziskos pētījumus un izmantojot Zemes tālzpētes datus, tika identificētas vairāk nekā 3000 spēcīgu gāzu emisiju zonas ar krāteru veidošanos termokarsta ezeru, upju un Karas jūras piekrastes daļas gultnē (24. att.).



24. att.
Izplatības zonas ar spēcīgiem gāzu izmešiem
Ziemeļrietumu Sibīrijā

Apzīmējumi: 1 — apdzīvotās vietas, 2 — atsevišķi gāzu izmešu krāteri, 3 — gāzu izmešu krāteri ūdenstilpju gultnē, 4 — dubļu vulkānisma izpausmes, 5 — naftas un gāzes atradņu kontūras, 6 — naftas vadi, 7 — gāzes vadi, 8 — dzelzceļš. Kartes pamatā — ESRI satelītattēlu mozaīka.

Avots: 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).

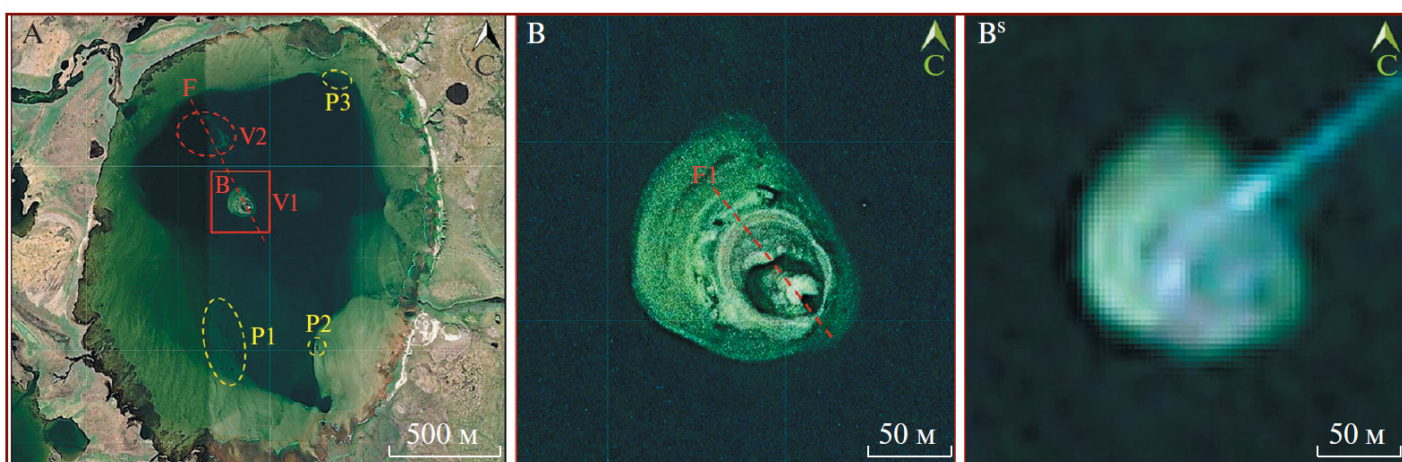
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

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>

2022.–2023. gadā, balstoties uz Zemes tālziņpētes datiem, pirmo reizi Labvarto un Jambuto termokarsta ezeru gultnē tika atklātas lielas dubļu vulkāniskās struktūras, kuras periodiski izrāda aktīvu dubļu vulkānismu³² (25. att). Termokarsta ezers ir ūdenstilpe, kas veidojas mūžīgā sasaluma atkuššanas rezultātā. Tādējādi ne tikai ezera atkuššana, bet arī dziļāko slāņu mālu sašķidrināšanās zem ezera norāda uz dziļumā

esošu siltuma avotu.

Saskaņā ar pētījuma autoriem tik izteiktas dubļu vulkāniskās struktūras termokarsta ezeru gultnē iepriekš visā Cirkumarktiskajā reģionā nebija zināmas.



25. att.

WorldView-2 satelītattēls ar Labvarto termokarsta ezeru (A) un palielināts tā fragments (B) ar papildinājumu no Sentinel-2 satelītattēla (B^s). Apzīmējumi: P1, P2 un P3 — gāzu izmešu krāteri; V1 un V2 — dubļu vulkāni; F un F1 — prognozētie lūzumi

Avots: 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>

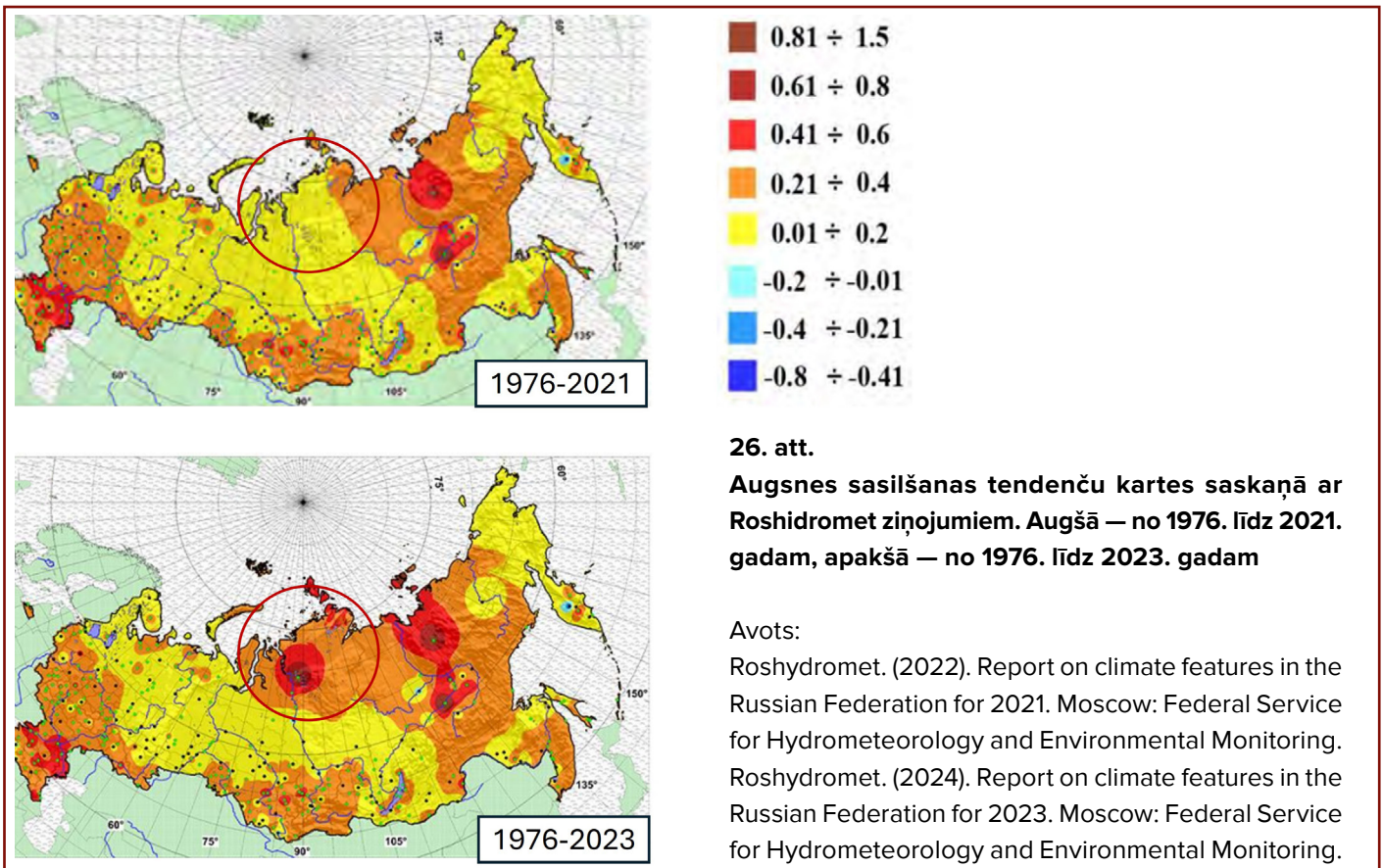
³² Bogoyavlensky, V. I. NEW DATA ON MUD VOLCANISM IN THE ARCTIC ON THE YAMAL PENINSULA. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle 512, 92–99 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

Augsnes sasilšana

Balstoties uz Roshidromet datiem par 2021.–2023. gadu, tika analizētas augsnes temperatūras kartes 80, 160 un 320 cm dziļumā. Visinformatīvākā bija temperatūras tendenču salīdzināšana periodos 1976–2021 un 1976–2023 (26. att.). Laikposmā no 2021. līdz 2023. gadam temperatūras tendenču kartē parādījās izteikta anomālija uz dienvidiem no Gidanas un Taimiras pussalām, kas teritoriāli sakrīt ar reģionu, kur mantijā konstatētas pazeminātas seismisko

viļņu ātruma zonas, identificētas, izmantojot seismotomogrāfijas metodes zem Sibīrijas reģiona litosfēras.

Ņemot vērā ievērojamo mērījumu dziļumu (320 cm) un plašo novērojumu tīklu (466 meteoroloģiskās stacijas visā Krievijā), var pieņemt, ka konstatētā temperatūras anomālija ir saistīta ar pieaugošo ģeotermālo siltumu, ko izraisa magmatiskā pluma pacelšanās.

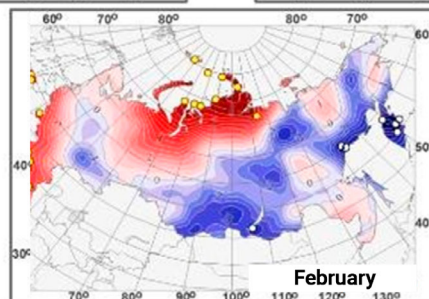
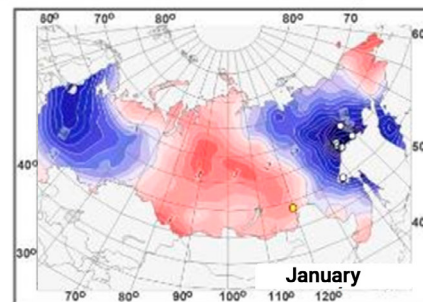
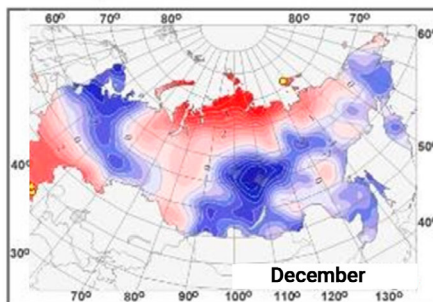
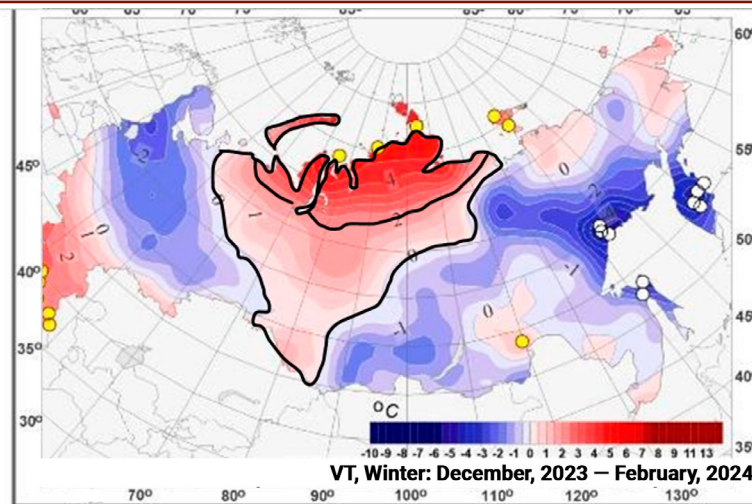


Piezemes gaisa temperatūra

Temperatūras novērojumu dati par 2023.–2024. gada ziemas periodu arī atspoguļo anomālu piezemes gaisa temperatūras raksturu (27. att). Vidējās temperatūras anomāliju kartē laikposmā no 2023. gada decembra līdz 2024. gada februārim redzams, ka Gidanas un Taimiras pussalu rajonā temperatūra paaugstinājusies

par 2,0–4,5 °C salīdzinājumā ar normu.

Ņemot vērā šīs teritorijas ziemeļu atrašanās vietu, tik ievērojams temperatūras pieaugums ziemas periodā var būt saistīts ar mantijas pluma radīto siltuma ietekmi.



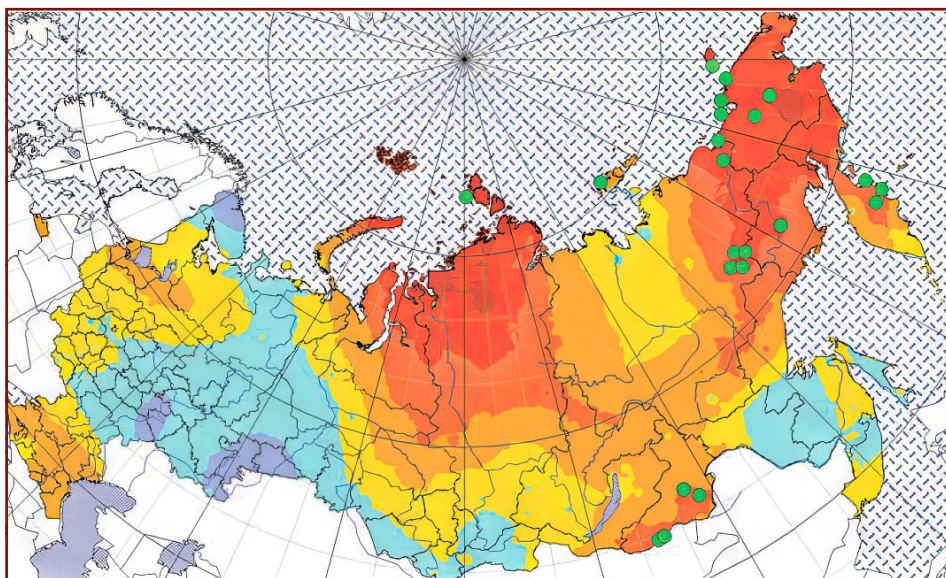
27. att.

Vidējo sezonālās un mēneša virszemes gaisa temperatūru anomāliju (°C) lauki visā Krievijā 2023./24. gada ziemā

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

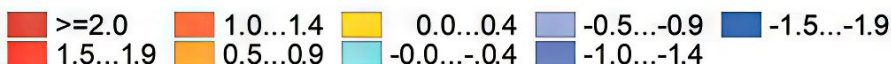
Jāatzīmē, ka vidējo mēneša temperatūru karšu analīze³³ par janvāri un jūliju laikposmā no 2001. līdz 2022. gadam rāda noturīgu temperatūras anomāliju pētāmajā reģionā (28., 29. att.). Tādējādi var konstatēt, ka šī

anomālija tiek novērota ne tikai pēdējos divos gados, bet arī pastāvīgi izpaužas visā 23 gadu ilgajā novērojumu perioda laikā, kas vēl vairāk apstiprina secinājumu, ka pluma intrūzija ietekmē temperatūras virszemes tuvumā.



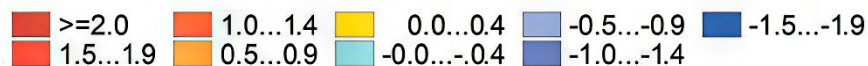
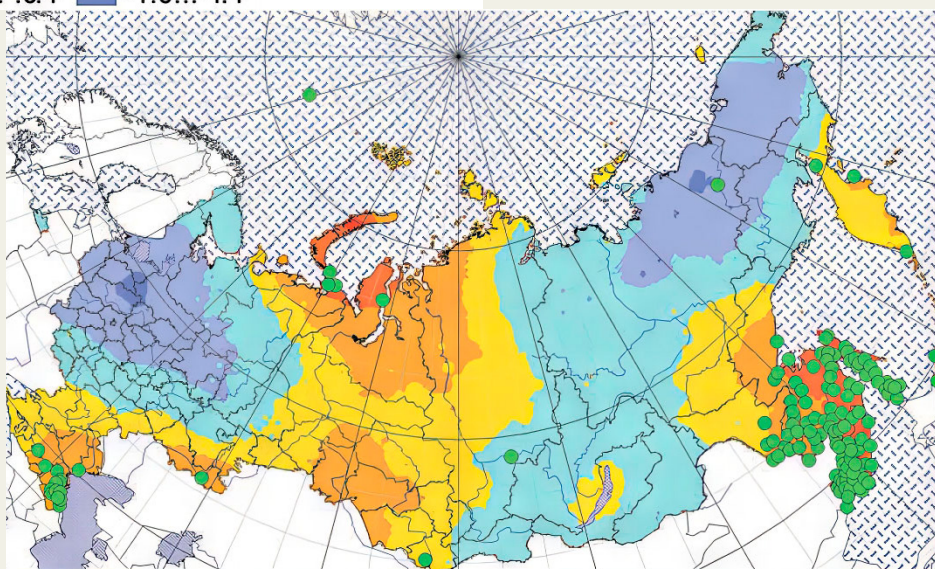
28. att.
Lineārās tendences koeficienti (°C/10 gadi) vidējai mēneša gaisa temperatūrai laikposmā no 2001. līdz 2022. gadam (Krievijas robežās līdz 2022. gada februārim) — janvāris

Avots: 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>



29. att.
Lineārās tendences koeficienti (°C/10 gadi) vidējai mēneša gaisa temperatūrai Maskavā laikposmā no 2001. līdz 2022. gadam (Krievijas robežās līdz 2022. gada februārim) — jūlijs

Avots: 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>



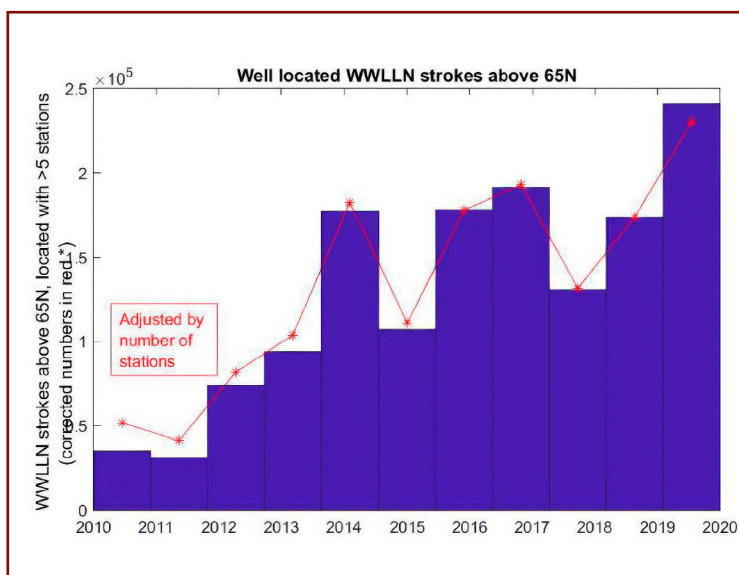
³³ Sherstyukov, B. G. (2023). Global warming and its possible causes. Journal of Hydrometeorology and Ecology, 70, 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

Zibens izlāžu skaita pieaugums

Zinātnisko sabiedrību satrauc zibens un negaisu skaita pieaugums Arktikā. Zibens spērienu skaits Arktikā virs 65° ziemeļu platuma no 2010. līdz 2020. gadam ir trīskāršojies³⁴ (30. att.). Īpaša iezīme ir tas, ka lielākā daļa šo zibens izlāžu koncentrējas Ziemeļsibirijas reģionā, savukārt Ziemeļkanādas un Grenlandes teritorijā tās praktiski nav sastopamas (31., 32. att).

Zibens aktivitāte virzās arvien tuvāk

Ziemeļpolam – 2019. gada augustā plaši tika ziņots, ka vairāki zibens spērieni tika novēroti tikai dažu simtu kilometru attālumā no Ziemeļpola.³⁵ Lielākā daļa zibens izlāžu polārajos reģionos (uz ziemeļiem no 80° ziemeļu platuma) notiek dažu intensīvu negaisa dienu laikā katru vasaru. Tomēr šīs parādības ir kļuvušas par jaunu reģiona īpatnību, jo iepriekšējos gados negaisi šeit bija ļoti reti.

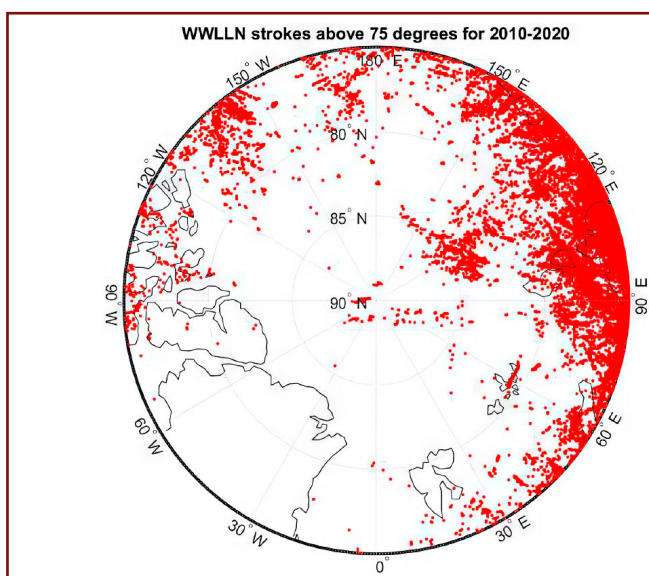


30. att.

Korekti fiksētās zibens izlādes WWLLN tīklā virs 65°Z (zilā krāsā), savukārt ar sarkanu līniju grafikā parādīta korekcija, balstoties uz kopējo WWLLN staciju skaitu. WWLLN – Pasaules zibens noteikšanas tīkls (World Wide Lightning Location Network)

Avots: 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>



31. att.

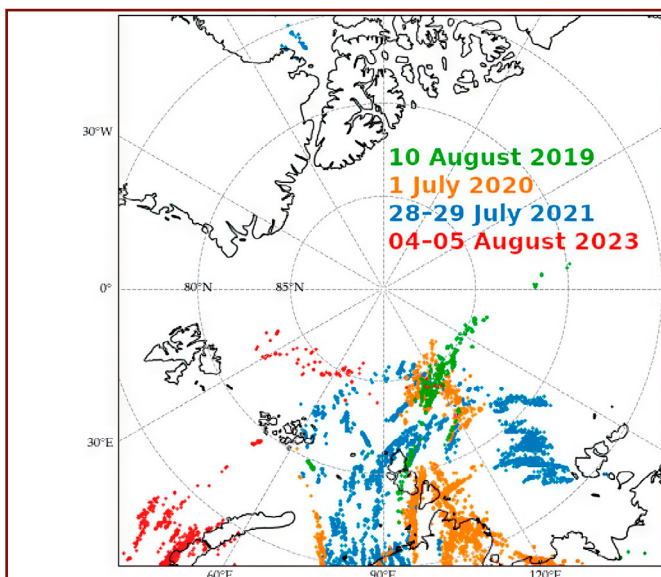
Globālais zibens izlāžu sadalījums WWLLN tīklā 2010.–2020. gada jūnijā, jūlijā un augustā virs 75°Z. WWLLN – Pasaules zibens noteikšanas tīkls (World Wide Lightning Location Network)

Avots: 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/>



32. att.

Zibens izlāžu vietas, kas konstatētas WWLLN tīklā negaisu laikā no 2019. līdz 2023. gadam. Zaļš — 2019. gads, oranžs — 2020. gads, zils — 2021. gads, sarkans — 2023. gads

Avots: 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>

Iemesls tam pēdējos gados ir ekstremāli vasaras karstuma periodi, kas novēroti Ziemeļsibīrijā, kur vasaras mēnešos temperatūra sasniedza 35 °C. Tiek arī pieļauts, ka kopējās atmosfēras jonizācijas pieaugums šajā reģionā, ko izraisa magmatiskā pluma iekļūšana, ir vēl viens svarīgs zibens izlāžu skaita pieauguma faktors. Tas notiek Jutkina efekta rezultātā, siltumenerģijai pārvēršoties elektroenerģijā mantijas iekšējo sprādzienu procesā, kas notiek, saskaroties dažādu temperatūru magmas plūsmām. Šajos procesos no Zemes dzīlēm atbrīvojas milzīgs enerģijas daudzums, kas palielina statisko spriegumu augsnes virskārtā, maina virsmas potenciālu, paaugstina gaisa jonizāciju un, kā sekas, veicina zibens izlāžu skaita pieaugumu.

Tāpat pa Zemes garozas plaisām izdalās ievērojams gāzu apjoms. Tas var ietekmēt mākoņu veidošanos, kā arī lokālos laikapstākļus. Magmas ieplūšana ir galvenais faktors virsmas sasilšanā, atmosfēras mitruma palielinājumā un siltuma anomāliju rašanās procesā, kas viss kopā veicina negaisa mākoņu un zibens veidošanos.

Negaisu un zibens izlāžu veidošanās prasa aukstā un siltā gaisa kombināciju, kā arī konvektīvo nestabilitāti, un Sibīrijas mantijas pluma atrašanās vieta nodrošina optimālus apstākļus to attīstībai.

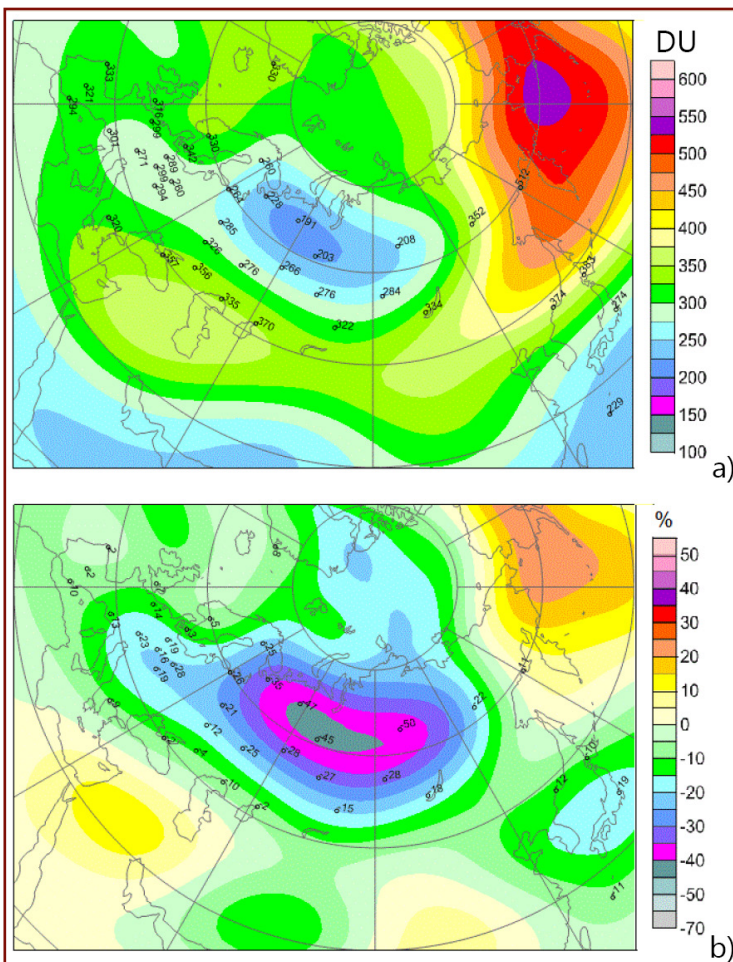
Ozona slāņa noārdīšanās

Magmatisko aktivitāti Zemes dzīlēs pavada ievērojama vulkānisko gāzu izdalīšanās, tostarp ūdeņraža, metāna un oglekļa dioksīda. Saskaņā ar V. L. Sivorotkina pētījumiem³⁶ ūdeņraža emisijas izraisa ozona slāņa noārdīšanos. Tā kā magmas pacelšanās notiek pulsējoši, arī degazācija un tai sekojošā ozona slāņa noārdīšanās būs sporādiska, proti, epizodiska.

Ozona slāņa anomālijas virs Ziemeļsibīrijas tiek novērotas kopš 1997.–1998. gada, proti, pēc Zemes kodola nobīdes Taimiras pussalas virzienā. Ozona slāņa noārdīšanās epizodes tika reģistrētas

2011., 2016. un 2020. gadā.³⁷ Maksimālais ozona deficīts tika fiksēts 2016. gadā.³⁸ 2016. gada janvāra beigās (pirmo reizi kopš novērojumu sākuma 1973. gadā) virs Urālu ziemeļu daļas un Sibīrijas tika reģistrēta ozona anomālija ar kopējo ozona saturu 190–200 DU, kas ir par 40–45% mazāk nekā ilgtermiņa vidējās vērtības. Šī parādība saglabājās aptuveni vienu nedēļu (33. att.).

Būtisks kopējā ozona satura samazinājums tika fiksēts arī ar OMI instrumentu, kas uzstādīts uz NASA piederošā AURA satelīta (34. att.).



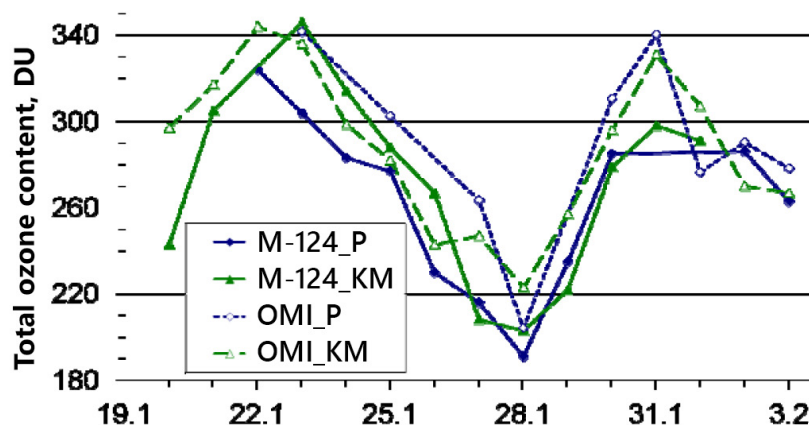
33. att.
Kopējais ozona saturs (a) un tā novirzes no normas (b) 2016. gada 28. janvārī saskaņā ar satelītu datiem WOUDC [<http://woudc.org/>]. Ar skaitļiem kartē apzīmēti kopējā ozona satura mērījumi ozonometriskā tīkla stacijās

Avots: 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.

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

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

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



34. att.

Kopējais ozona saturs saskaņā ar mērījumiem, kas veikti, izmantojot sauszemes ozonometru M-124 un OMI instrumentu uz AURA satelīta (ASV) Pečoras (P) un Hanti-Mansijskas (HM) stacijās laika posmā no 2016. gada 20. janvāra līdz 3. februārim

Avots: 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.

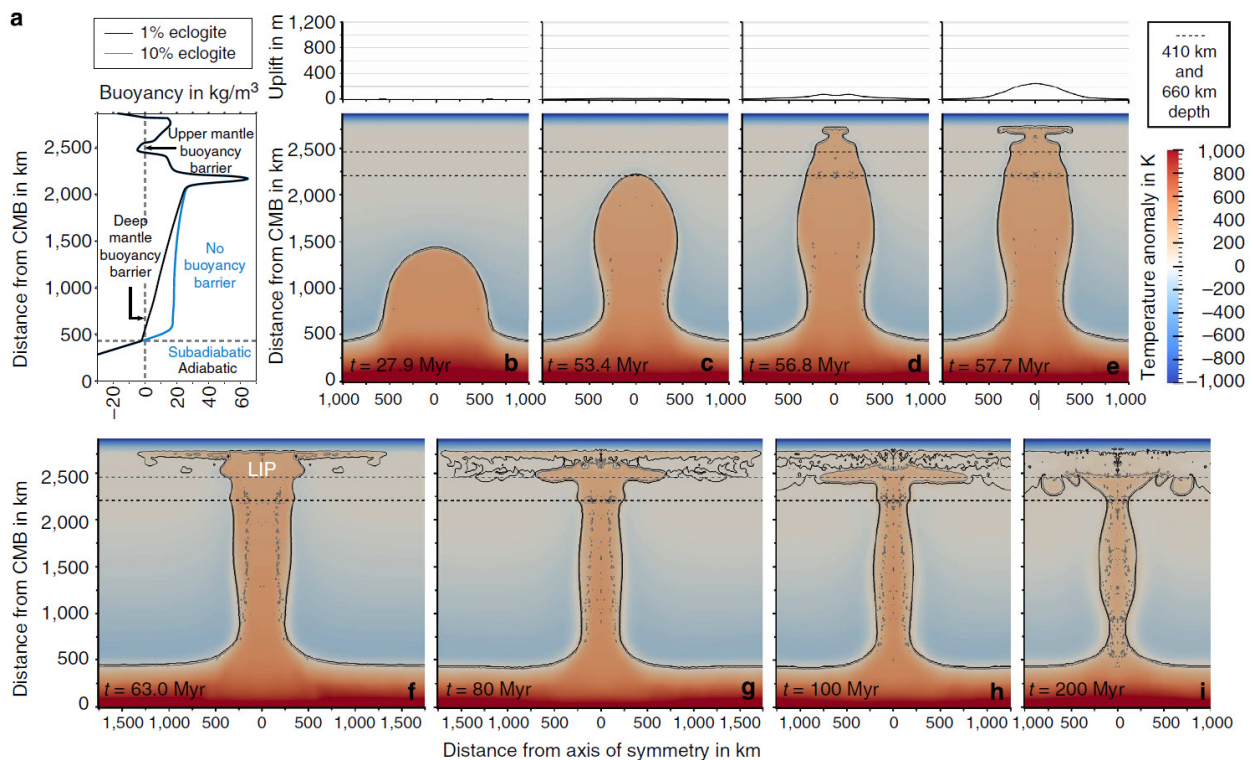
Svarīgi atzīmēt, ka ilgtermiņa sezonālais kopējā ozona satura cikls ārpus tropu platuma grādiem Ziemeļu puslodē sasniedz minimumu septembrī un maksimumu martā–aprīlī. Tomēr 2016. gadā ozona degradācija sākās netipiski agri — jau janvārī, un kopējais ozona saturs šajā mēnesī bija zemākais visā instrumentālo novērojumu vēsturē.

Tādējādi ozona slāņa degradācija virs Sibīrijas reģiona var būt papildu indikators gāzu izplūdei pa tektoniskajiem lūzumiem, kas notiek pateicoties magmatiskā pluma virzībai uz Zemes virsmu.

Magmatiskā pluma struktūra, iespējamie izmēri un lokalizācija, balstoties uz publikāciju un novērojumu datiem

Pluma struktūru nosacīti var salīdzināt ar sēni. Tam ir aste (stumbrs), kas transportē sakarsētu materiālu no kodola un mantijas robežas uz augšu. Pluma augšējā daļa, kas veidojas pacelšanās procesā, tiek dēvēta par pluma “galvu”. Kad plums

sasniedz litosfēras apakšējo daļu un saduras ar cietu, grūti kūstošu iežu slāni, tā galva sāk izplesties zem litosfēras kā sēnes cepurīte (35. att.).



35. att.

Attēlā redzams magmatiskā pluma evolūcijas modelis, tāda paša, kāds pirms 250 miljoniem gadu izveidoja Sibīrijas trapus

Diagramma kreisajā pusē (a) parāda, kā magma ceļas caur dažādiem Zemes mantijas slāņiem. Galvenā attēla daļa (b-i) attēlo sava veida “laika joslu”, kas ilustrē pluma attīstības posmus. Sākumā veidojas karstas magmas “kolonna”, kas paceļas no mantijas pamatnes. Pakāpeniski šī kolonna sasniedz mantijas augšējos slāņus. Augšdaļā tā izplešas,

veidojot “sēnes formas” cepurīti. Laika gaitā plums kļūst plānāks un sāk sadalīties atsevišķās daļās.

Diagrammā izmantotās krāsas attēlo temperatūru: Sarkanās un oranžās zonas – viskarstākās. Zilās zonas – vēsākas.

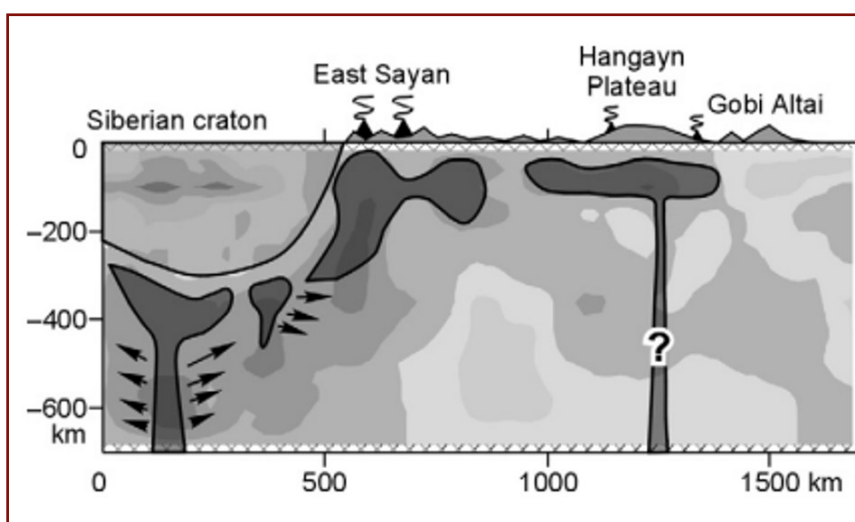
Avots: Dannberg, J., & Sobolev, S. (2015). Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept. *Nature Communications*, 6, 6960. <https://doi.org/10.1038/ncomms7960>

Pēc pētījumu datiem, plūmam tuvojoties litosfērai, tā rādiuss izplešoties dubultojas, bet kustības ātrums strauji samazinās.³⁹ Karstais materiāls, kas pienāk no “astes”, rada spiedienu un izdedzina litosfēru, radot plaisas. Tajās vietās, kur ieži ir vājāki, veidojas sekundārie plūmi – augšējās magmatiskās kameras jau Zemes garozas iekšienē. Šādas kameras, piemēram, ir Jeloustonā, Kampi Flegrei un citos supervulkānos. Šīs ir tās vietas, kur var notikt garozas pārrāvums un masveidīgs magmas izvirdums uz virsmas.

Svarīgi atzīmēt, ka, saskaņā ar pastāvošajiem uzskatiem, pluma pacelšanās līdz virsmai var aizņemt desmitiem miljonu gadu. Tomēr šie dati balstās uz teorētiskiem aprēķiniem, kamēr praktiskie novērojumi par mūsdienu ģeodinamisko procesu eskalāciju liecina par pretējo. Novērojumi Sibīrijā rāda, ka pluma pacelšanās var notikt dažās desmitgadēs.

Saskaņā ar literatūras datiem⁴⁰ ir zināms, ka analogiskam magmatiskajam superplūmam, kas izraisīja plašus bazaltu izvirdumus Eirāzijā (Sibīrijā) perma un triasa periodu mijā pirms 250 miljoniem gadu, bija šādi izmēri: 4 000 km no rietumiem uz austrumiem un 3 000 km no ziemeļiem uz dienvidiem. Pieļaujams, ka pluma galvas diametrs bija no 1 000 līdz 2 000 km.

Zināms, ka Rietumsibīrijas plātne ir jaunāka un plānāka, tās biezums ir 35–40 km. Savukārt Austrumsibīrijas platforma ir vecāka, biezāka un vēsāka, tās biezums ir 40–45 km. To dēvē par Sibīrijas kratonu. Saskaņā ar seismotomogrāfijas datiem⁴¹ zinātnieki pieļauj, ka pašlaik zem Austrumsibīrijas platformas dienvidu gala novērojamas nelielas magmatiskās kameras, kas izplatās zem Sibīrijas kratona (36. att.), pateicoties tam, ka plātne ir vēsāka.



36. att.
Shemisks attēlojums, kas ilustrē, kā nelielas magmatiskās kameras (attēlotas ar bultiņām kreisajā pusē) aptiek gar Sibīrijas kratonu

Avots: 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>

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

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

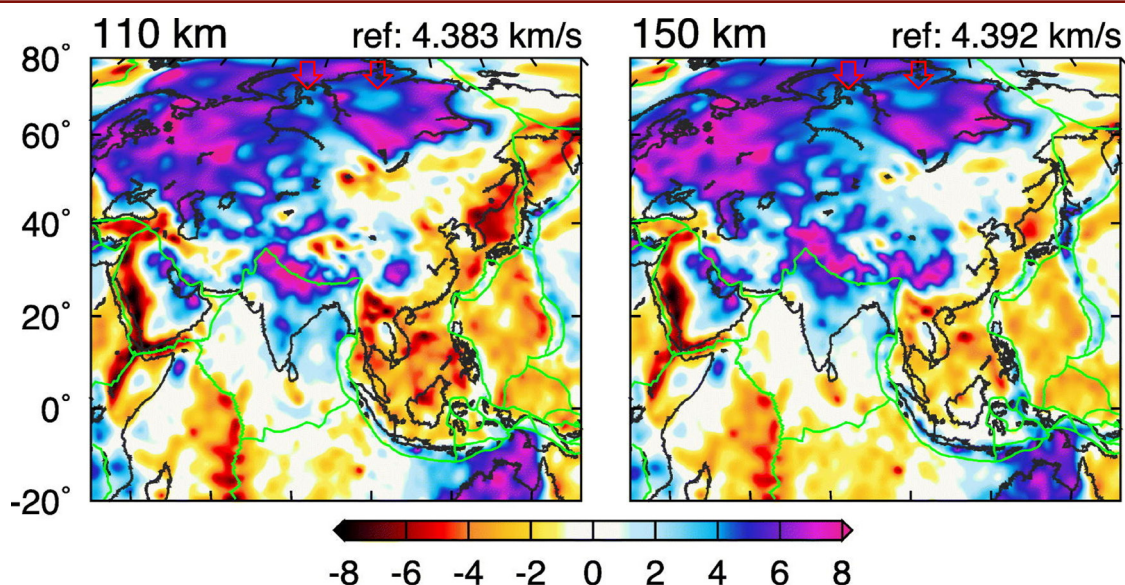
⁴¹Koulakov, I. Y. (2008). Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia from regional seismic tomography. *Russian Geology and Geophysics*, 49(3), 187-196.
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012>

Saskaņā ar hipotēzi mūsdienu Sibīrijas plums pašlaik izplatās zem Austrumsibīrijas platformas pamatnes un daļēji zem Rietumsibīrijas plātnes. Tiek uzskatīts, ka šī izplatīšanās notiek 50–60 km dziļumā, bet pluma “aste” visizteiktāk novērojama apmēram 100 km dziļumā. Sekundāro plumu iespēšanās, visticamāk, jau notiek 40 km dziļumā.

Daži seismotomogrāfiskie modeļi parāda anomālijas ar pazeminātu ātrumu⁴² (šķidrāka vide) 110–150 km dziļumā, kas atbilst šķidrākai videi Zemes dzīlēs uz dienvidiem no Gidanas

un Taimiras pussalām (37. att.). Šīs anomālijas, kā redzams ātruma kartēs no 2024. gada augusta pētījuma, tiek uzskatītas par divām magmatiskā materiāla ieplūdēm, kuras dēvē par pluma “astēm” (38. att.).

Ja šis modelis ir pareizs, tad diametrs katrai no “astēm”, kas paceļas zem Austrumsibīrijas kratona, ir aptuveni 600–700 km



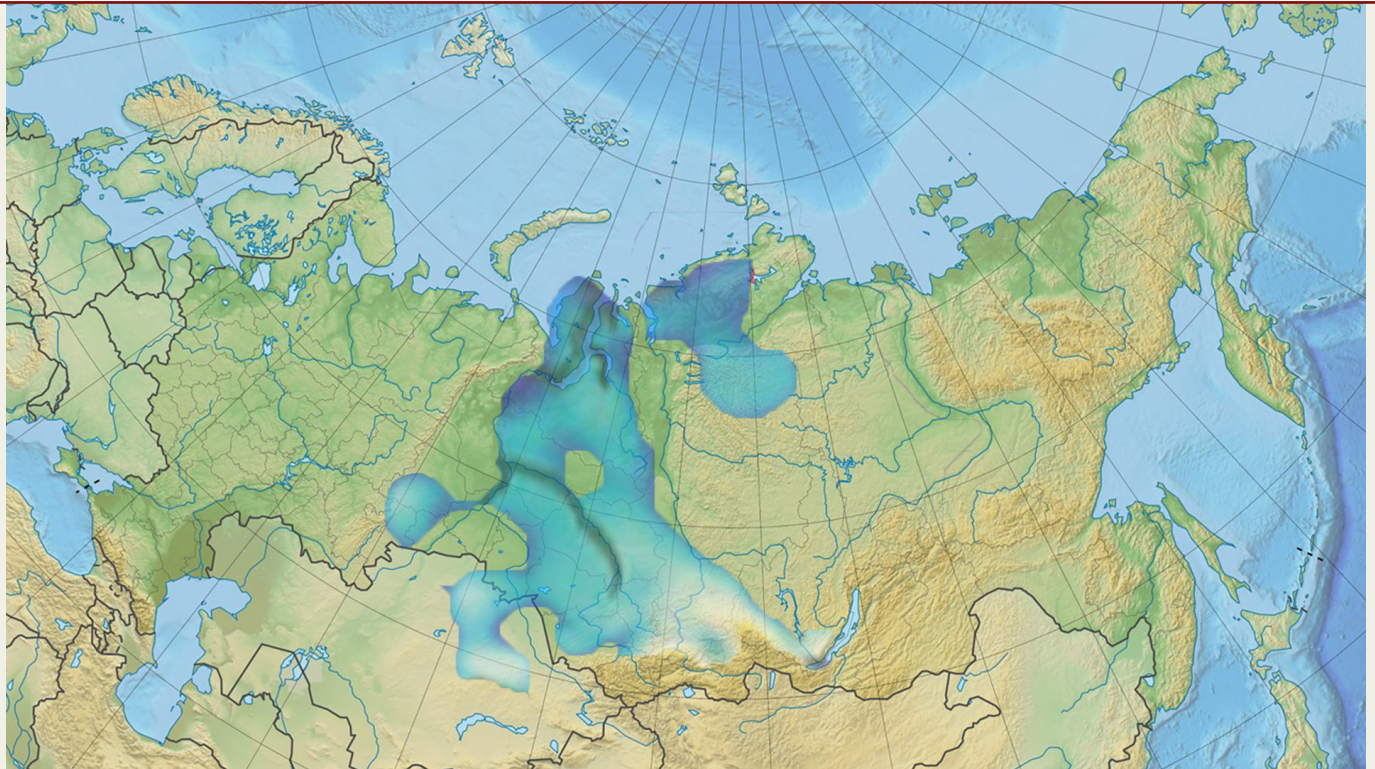
37. att.

Ar violetu krāsu kartē attēlotas ātrās akustisko viļņu izplatīšanās zonas (caur cietiem iežiem), ar zilo – lēnākas zonas (šķidrāks, izkusis materiāls). Seismisko viļņu pazemināta ātruma anomālijas, kas atbilst šķidrākām mantijas zonām, ir atzīmētas ar divām sarkanām bultiņām

Avots: 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>

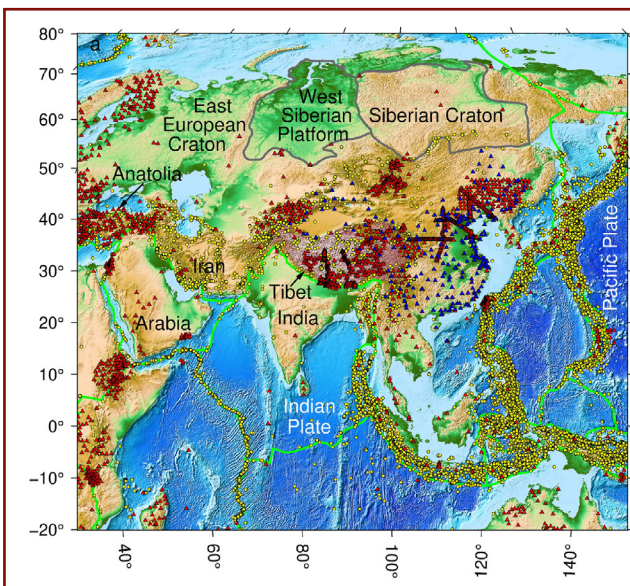
⁴²Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism. *Earth-Science Reviews*, 247, 104595. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>



38. att. Krievijas fiziskajā kartē ir attēlotas un pielāgotas pazemināto seismisko ātrumu anomālijas, balstoties uz Dou et al., 2024 datiem

Ir svarīgi atzīmēt, ka Dou et al. (2024) pētījumā par Sibīriju prezentētā seismotomogrāfiskā analīzē balstījās uz datiem no mazāk nekā 10 seismiskajiem sensoriem (39. att.), kuri visi atrodas gar plātņu robežām, praktiski nepārklājot Rietumsibīrijas un Austrumsibīrijas iekšējos reģionus. Analīzē

tika izmantoti visi publiski pieejamie platjoslas zemestrīču ieraksti no 1994. gada līdz 2023. gada 4. septembrim. Salīdzinājumam, kartē ar sarkaniem trīsstūriem ir apzīmēti sensori, kas tika izmantoti analīzē par Āziju, un to skaits sasniedz vairākus tūkstošus.



39. att. Seismotomogrāfiskajā analīzē izmantoto sensoru izvietojums (atzīmēts ar sarkaniem trīsstūriem)

Avots: 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>

Vēl viens pētījums, ko 2023. gadā veica ķīniešu zinātnieki, apstiprina, ka pašlaik magmas aktivitāte zem Sibīrijas kausē un padara plānāku Zemes garozu⁴³ (40. att). Šis process progresē un samazina plātnes izturību. Pētījumā autori piedāvā mantijas elektrovadītspējas modeli Ziemeļāzijai, kas izveidots, balstoties uz ģeomagnētiskajiem datiem. Modelis uzrāda lielu anomāliju ar augstu elektrovadītspēju, kas atradās mantijas pārejas zonā zem Sibīrijas trapiem to izvirduma laikā. Zinātnieki šo parādību interpretēja kā termisku anomāliju ar kausējuma pēdām perma anomālijas reģionā (41. att.).

Kopumā seismotomogrāfiskie modeļi, kas pēta 40–110 km dziļumu Austrumsibīrijas kratona

reģionā, uzrāda atšķirīgus rezultātus. Turklāt Sibīrijas teritorijā ir acīmredzams seismoloģisko datu trūkums, kas apgrūtina precīzu modeļu izveidi.

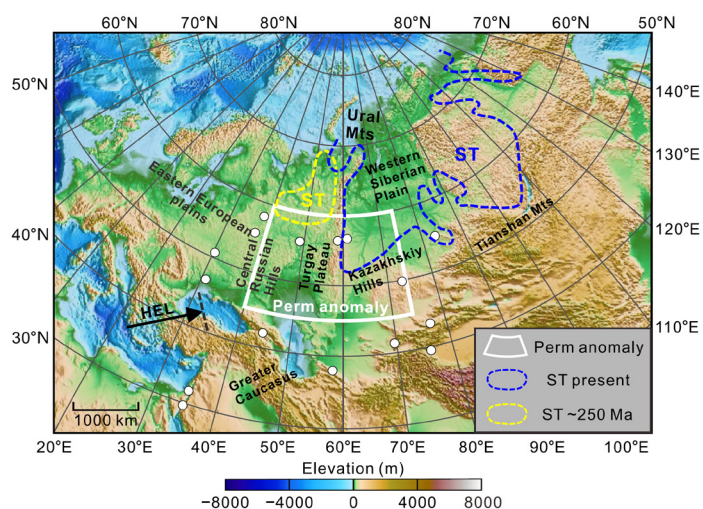
Mūsdienu tomogrāfiskie modeļi tiek veidoti, balstoties uz seismiskiem datiem, kas savākti ilgā laika posmā – aptuveni 30 gadu garumā. No klasiskā viedokļa par mantijas plumu attīstību, kas notiek miljoniem gadu, 30 gadu periods tiek uzskatīts par ārkārtīgi īsu. Tomēr esošie dati liecina, ka tieši šajā laika posmā Sibīrijas pluma struktūrā ir notikušas būtiskas izmaiņas. Šie novērojumi norāda uz nepieciešamību pārskatīt pastāvošos uzskatus par mantijas plumu attīstības ātrumu un to izpētes metodēm.

40. att.

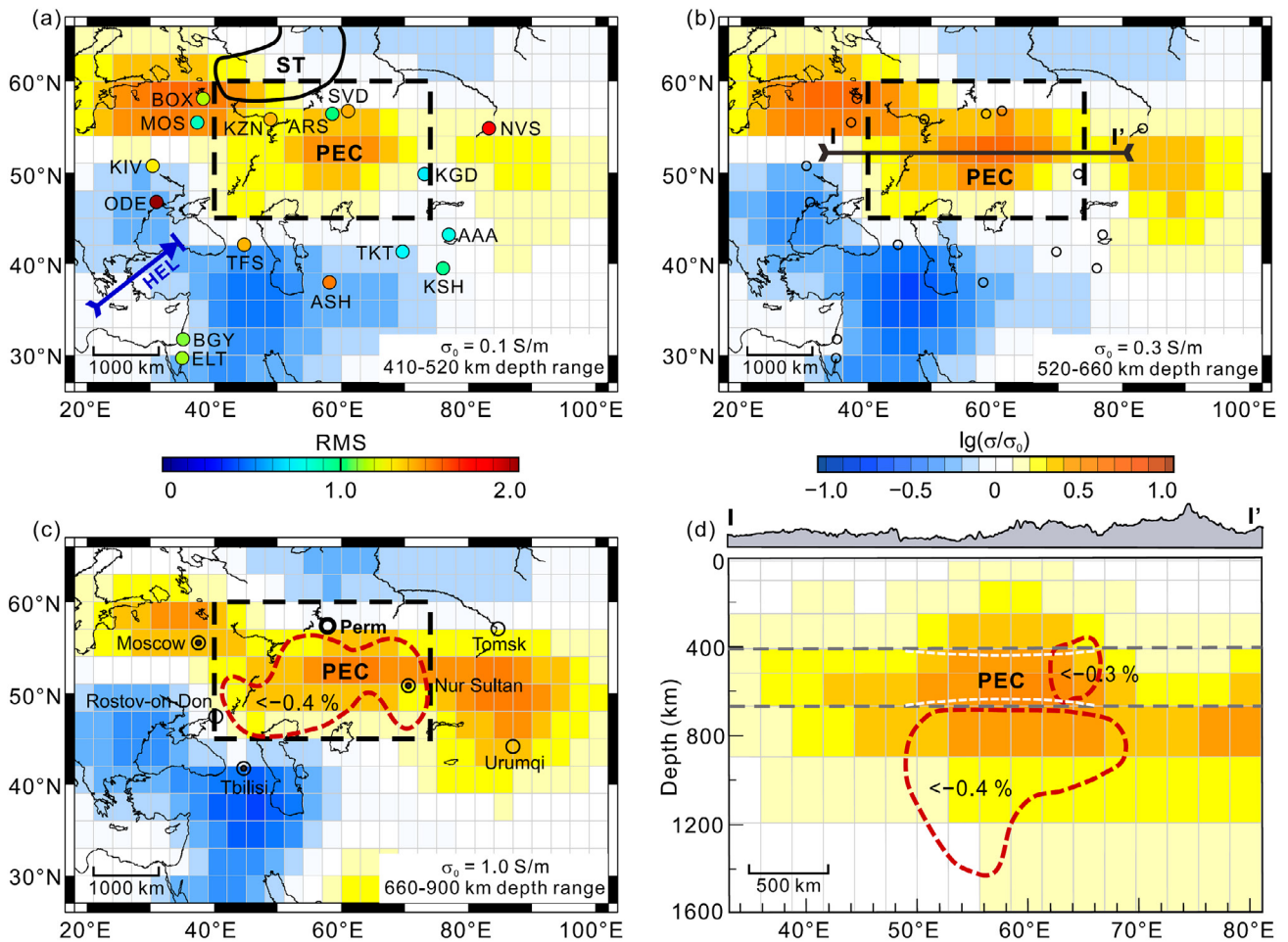
Baltie punkti apzīmē stacijas, kuru C-atbildes tika izmantotas šajā pētījumā. Perma anomālijas diapazons ir iezīmēts ar balto līniju. Sibīrijas trapu pašreizējā (zilā) un pagātnes (dzeltenā) atrašanās vieta ir norādīta ar punktētām līnijām

Avots: 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>



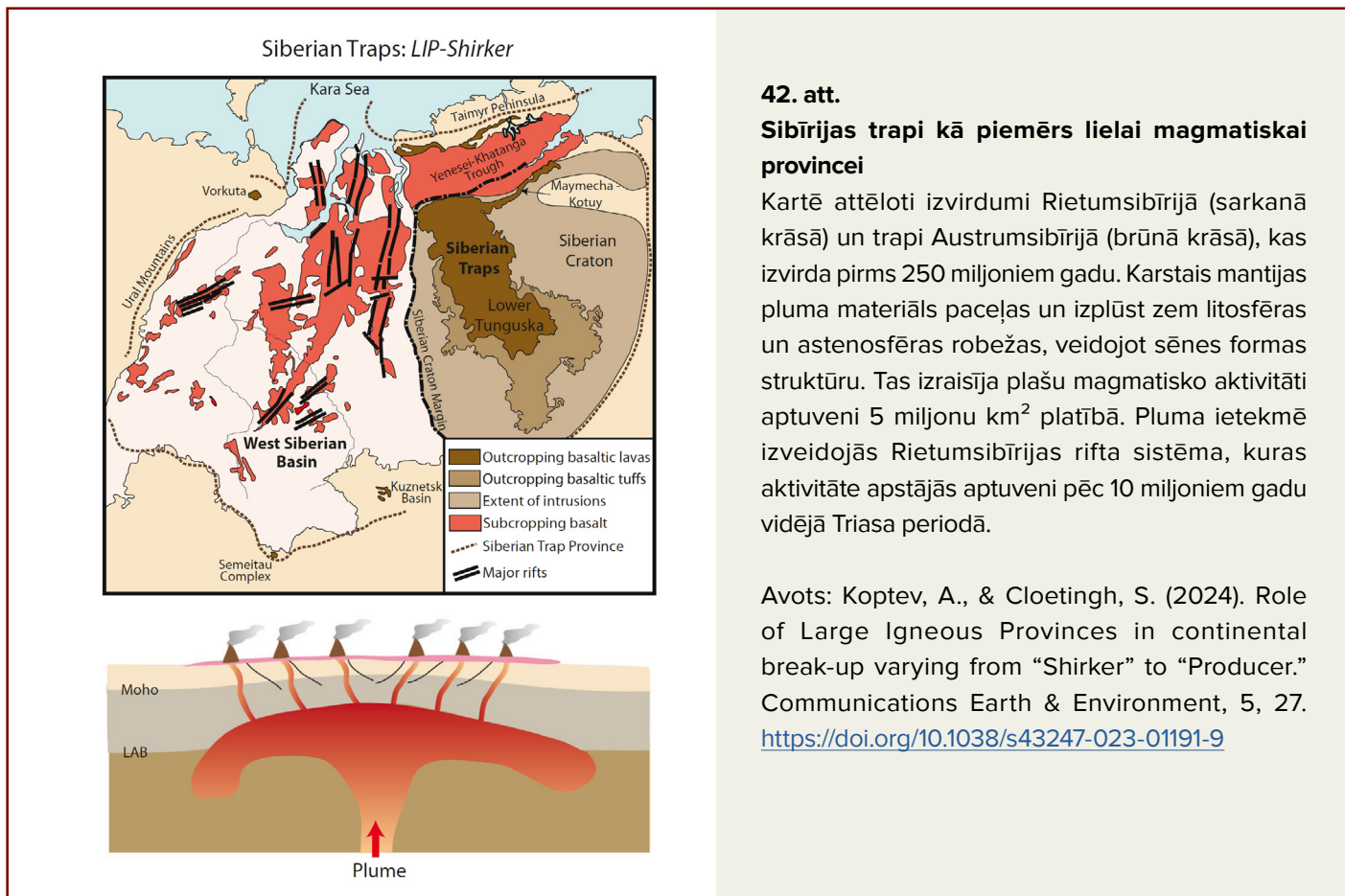
41. att.

Zinātnieki no Džjiliņas universitātes (Jilin University) un Šidzjadžuanas Tiedao universitātes (Shijiazhuang Tiedao University) izmantoja ģeomagnētiskā lauka datus no 16 stacijām Ziemeļāzijā, lai aprēķinātu mantijas elektrisko vadītspēju dažādos dziļumos. Viņi atklāja ievērojamu vadītspējas pieaugumu salīdzinājumā ar pasaules vidējo vadītspēju apgabalā zem Sibīrijas triapiem (attēlā dzeltenī-brūnas zonas). Zinātnieki noteica, ka šīs zonas 400–900 km dziļumā ir vidēji par 250 grādiem karstākas nekā apkārtējā mantija. Šajās zonās ir atrodama daļēji izkusušas mantijas frakcija.

Avots: 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>

Jāatzīmē, ka iepriekšējie izvirdumi pirms 250 miljoniem gadu (perma un triasa periodu robežā) notika tieši šajā reģionā. Epicentrs

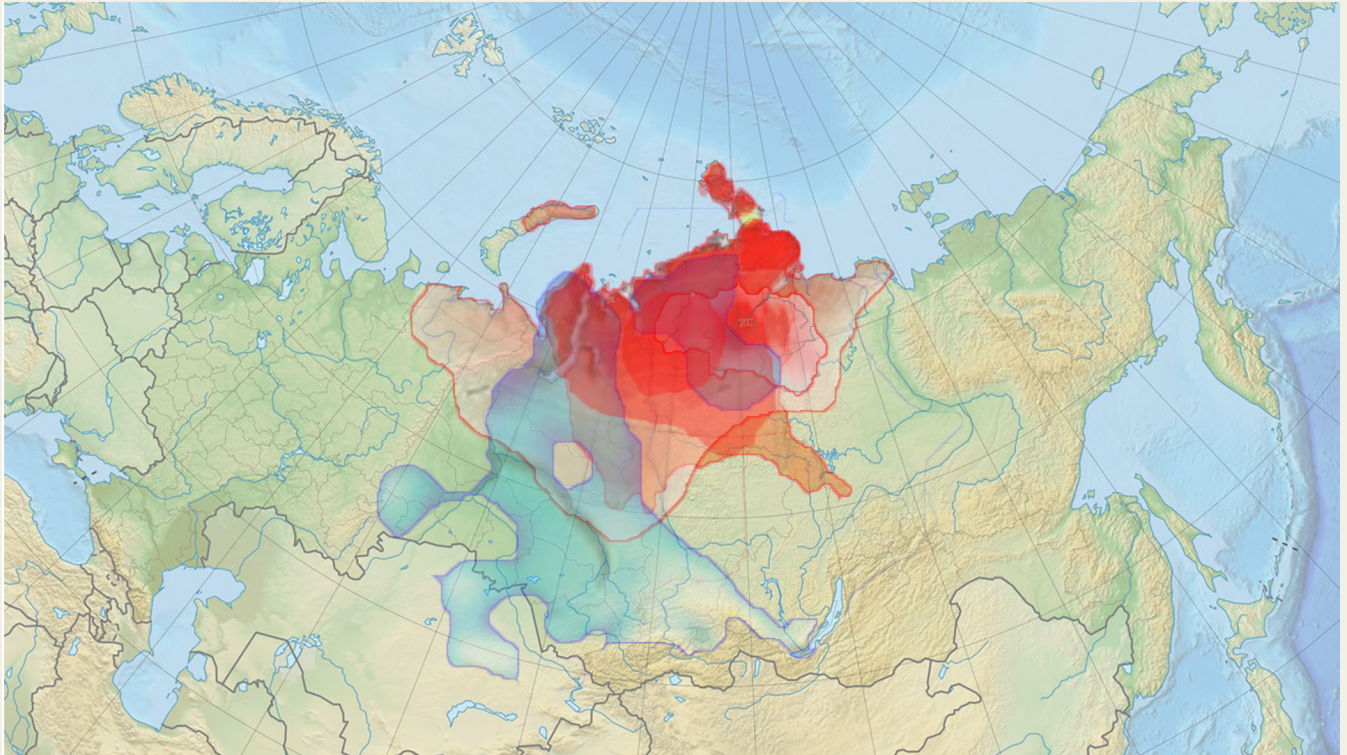
atradās zem Austrumsibīrijas kratona (zem Putoranas plato), bet izvirdumi notika visā Rietumsibīrijā un Austrumsibīrijā (42. att.).



Magmatiskā pluma lokalizācija

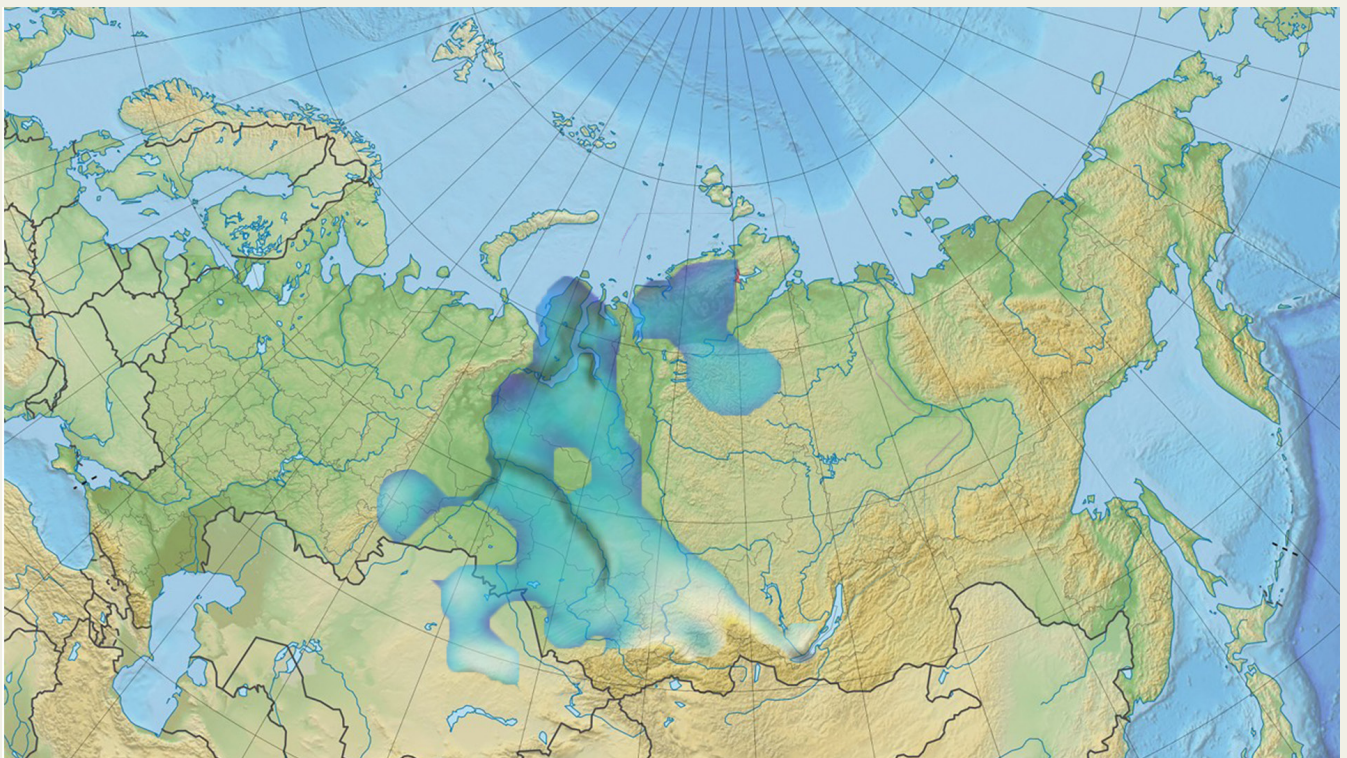
Apkopojot iepriekš minēto analīzi par augsnes temperatūras anomālijām, mūžīgā sasaluma atkusuma dziļumu, virsmas temperatūrām, pazeminātu seismisko ātrumu anomālijām mantijā

un magnētiskajām anomālijām, tas ļaus noteikt pluma pašreizējo atrašanās vietu un izmērus (43. att.).



43. att.

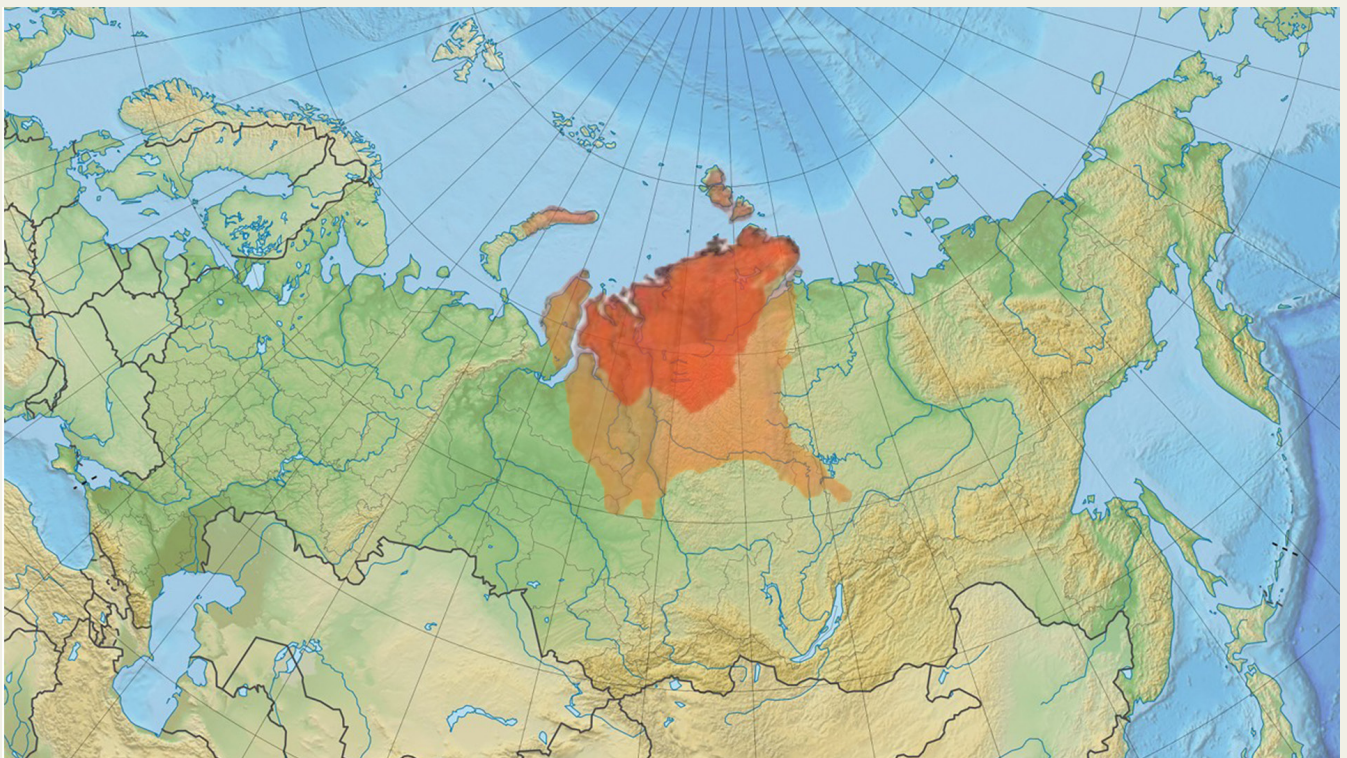
A. Karte ar dažādu parametru galveno anomāliju pārklājumu, kas norādīti zemāk:



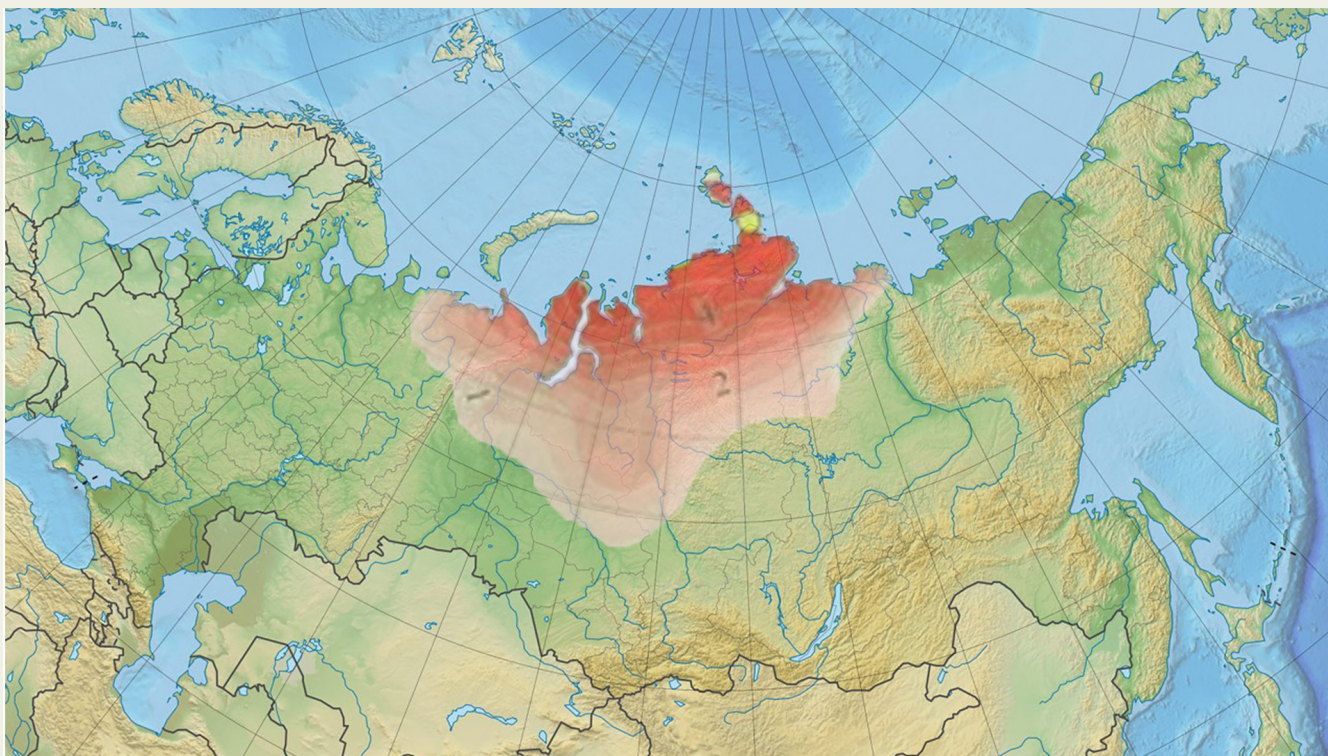
B. Karte ar pazeminātu seismisko ātrumu anomālijām (šķidrāka vide) 110 km dziļumā, balstoties uz seismotomogrāfijas datiem: Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023)



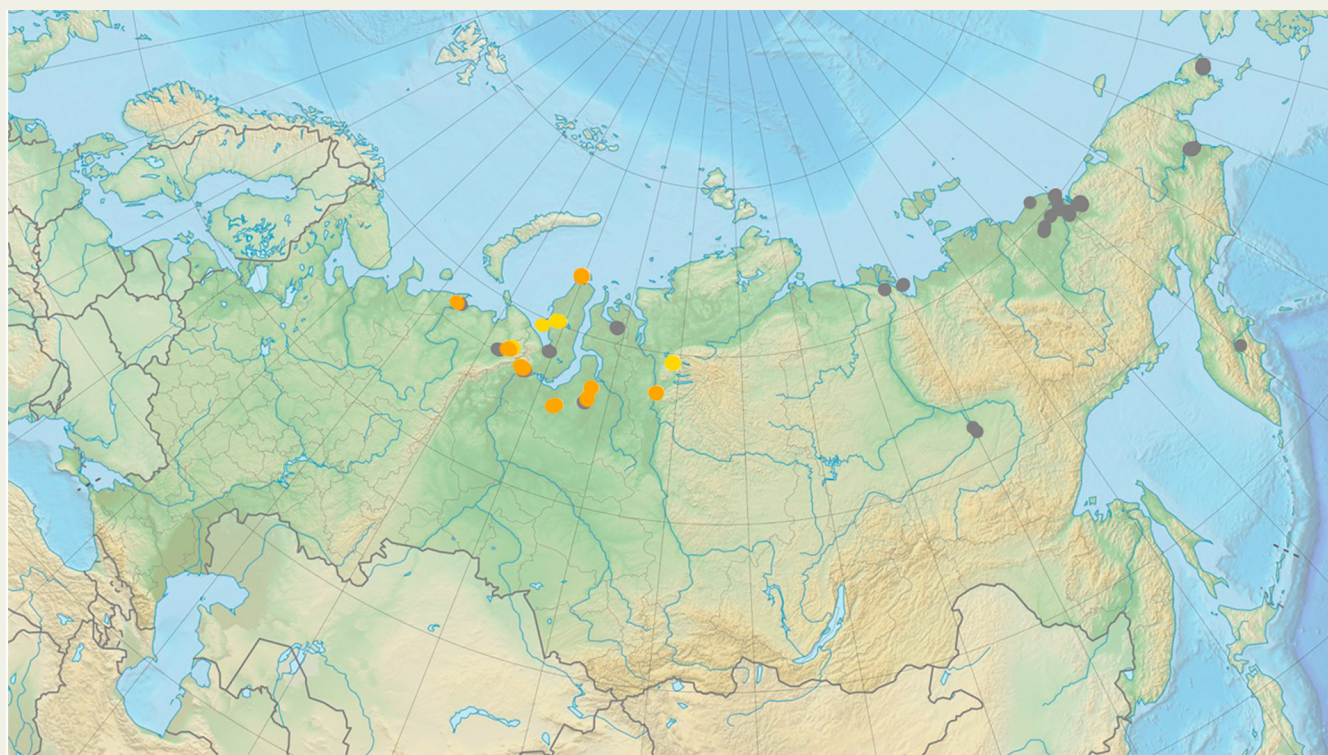
C. Jauna augsnes sasilšanas anomālija, salīdzinot tendences laika periodos 1976–2021 un 1976–2023, balstoties uz Roshidromet datiem (2021, 2023)



D. Mēneša vidējā gaisa temperatūras tendence janvārī 2001.-2021. gadā, balstoties uz Šerstjukova datiem (2023)



E. Vidējā sezonālā temperatūra no 2023. gada decembra līdz 2024. gada februārim, balstoties uz Roshidromet datiem



F. Zonas ar palielinātu sezonālās atkuššanas dziļumu daudzgadējā sasaluma slānī

Datu avots: <https://permafrost.su/>

Saskaņā ar hipotēzi pluma augšupejošā daļa atrodas uz dienvidiem no Gidanas un Taimiras pussalām un sastāv no vairākiem atzarojumiem. Pluma galvas diametrs tiek lēsts 1200–1500 km, savukārt magmatisko plūsmu izplatīšanās zona var sasniegt 2500–3000 km. Šī zona aptver Rietumsibīrijas plātnes un Austrumsibīrijas kratona tektoniskās struktūras.

Pašlaik pluma galvenā daļa rada ietekmi uz Austrumsibīrijas kratona pamatu, izplatot magmatiskās plūsmas zem tā teritorijas. Šis process, iespējams, veicina seismiskās

aktivitātes palielināšanos plātņu malās, piemēram, Baikāla un pat Urālu zonā. Šādu anomāliju cēlonis tieši plātņu perifērijas daļās ir šo plātņu destabilizācija, ko izraisa pamatā esošās astenosfēras mīkstināšanās un neliels Sibīrijas bloka centrālās daļas pacēlums. Tas attiecas uz Rietumsibīrijas plātni un Austrumsibīrijas kratona tektoniskajām struktūrām, kā arī Verhojanskas-Čukotkas krokotās sistēmas tektonisko struktūru.

Seismiskās aktivitātes pieaugums kā tektonisko plātņu destabilizācijas pazīme Sibīrijas magmatiskā pluma aktivitātes rezultātā

Seismiskās aktivitātes analīzes metodika ietvēra datu lejupielādi un tīpašu apstrādi, izmantojot informāciju no Starptautiskā seismoloģiskā centra (International Seismological Centre – ISC) tīmekļa vietnes. Tā kā dati ietver dažādus avotus no dažādām valstīm un pētniecības institūtiem, kā arī dažādus magnitūdu veidus (M_w, M_s, M_b, M_L, M_D utt.), tika izstrādāts noteikts datu apstrādes algoritms, lai izvēlētos piemērotāko magnitūdas tipu no dažādiem avotiem (skat. 1. Pielikumu). Galvenā algoritma ideja bija izvēlēties mediānas vērtību starp visbiežāk izmantotajiem magnitūdu veidiem katram notikumam, jo ISC datubāzē katram notikumam dažādi avoti sniedza atšķirīgus magnitūdu tipus un vērtības. Šāda apstrāde vidēji rada nelielu magnitūdas samazinājumu attiecībā pret maksimālo reģistrēto vērtību, taču, kā rāda pieredze, mediānas algoritms nodrošina adekvātu Gūtenberga-Rihtera likuma un citu likumsakarību

atbilstību. Šī pieeja labi saskan ar datiem no citām seismoloģiskām datubāzēm, piemēram, IRIS un USGS.

Algoritma rezultātā iegūtie dati tika filtrēti pēc notikumu veidiem ISC datubāzē (skat. 1. Pielikumu), lai izslēgtu cilvēka darbības izraisītus notikumus, kas saistīti ar kalnrūpniecību: sprādzienus, iespējamus sprādzienus, iežu nogruvumus, utt. Tā kā Krievijas teritorijā atrodas daudz kalnrūpniecības uzņēmumu, ISC datubāze tika salīdzināta ar Krievijas zinātņu akadēmijas Vienotā ģeofiziskā dienesta datiem⁴⁴ uz 2025. gada janvāri, kurā norādīti visi zināmie sprādzieni un iežu nogruvumi Krievijas teritorijā. Šie notikumi tika izslēgti, lai nodrošinātu, ka apkopotajos datos nepaliek notikumi, kas atbilst sprādzieniem.

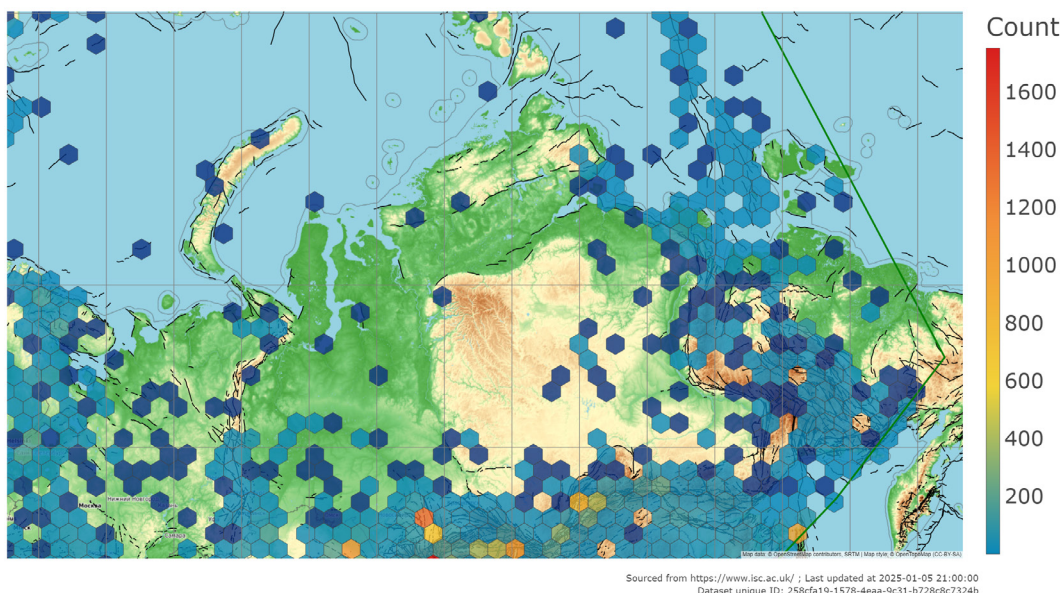
⁴⁴Federal Research Center, Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences <http://www.ceme.gsras.ru/zr/contents.html>

Apskatīsim datu analīzes rezultātus reģionā, kur notiek magmatiskā pluma pacelšanās, kā arī lielo tektonisko bloku malās, uz kurām tas tieši iedarbojas. Tā kā Sibīrijas kratons tiek uzskatīts par relatīvi stabilu, aseismisku platformu, pat neliela zemestrīču skaita parādīšanās tā robežās tiek uzskatīta par anomāliju.

44. attēlā parādīts zemestrīču blīvums Krievijas teritorijā. Sibīrijas reģionā lielākā zemestrīču koncentrācija loģiski

novērojama krokotajos apgabalos: Verhojanskas grēdā austrumos, Gakkela grēdā ziemeļos, Urālu kalnos rietumos un Altaja-Sajānu reģionā dienvidos. Atsevišķi notikumi fiksēti arī pašā Sibīrijā – dažas zemestrīces ar magnitūdu ap 4,0 reģistrētas uz dienvidiem no Taimiras pussalas. Apskatīsim sīkāk zemestrīču dinamiku lokālajos apgabalos Sibīrijas pluma reģionā un blakus esošajos apgabalos.

M3+ zemestrīču blīvums Sibīrijas teritorijā



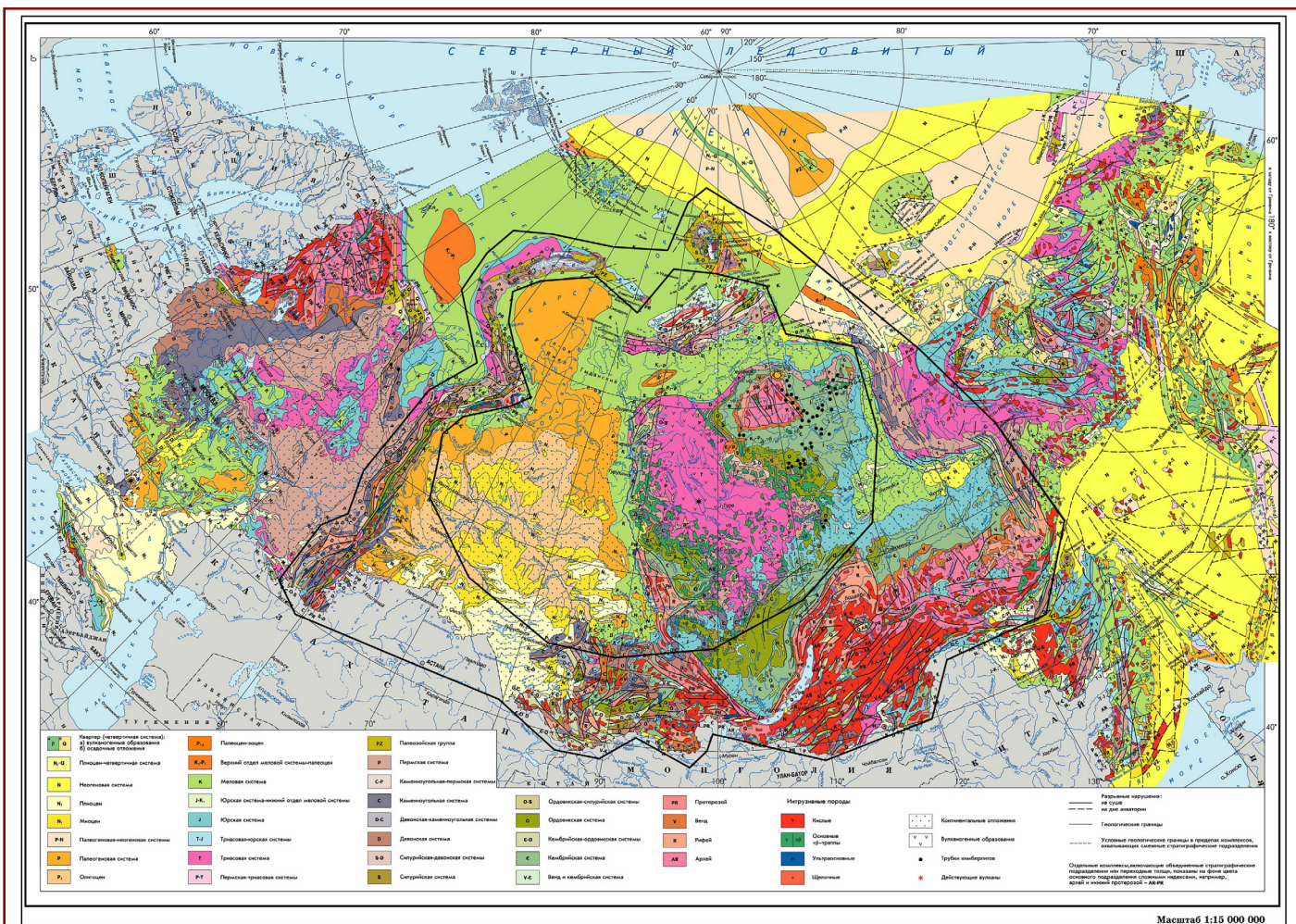
44. att.

M3+ zemestrīču blīvums Sibīrijas teritorijā laika posmā no 1990. līdz 2024. gadam

Datu avots: ISC

Pēc ģeoloģiskajām struktūrām ir izdalītas teritorijas, kurās mantijas plums var radīt dažāda veida ietekmi (45. att.). Tika izvēlēta paša pluma zona, kur iedarbība var būt saistīta ar magmas un fluīdu fāzes (magmatisko gāzu) iespiešanos

un spiedienu. Austrumsibīrijas platformas un Rietumsibīrijas plātnes malās pluma ietekme uz seismiskumu, visticamāk, ir saistīta ar blīvo zemes garozas bloku destabilizāciju.



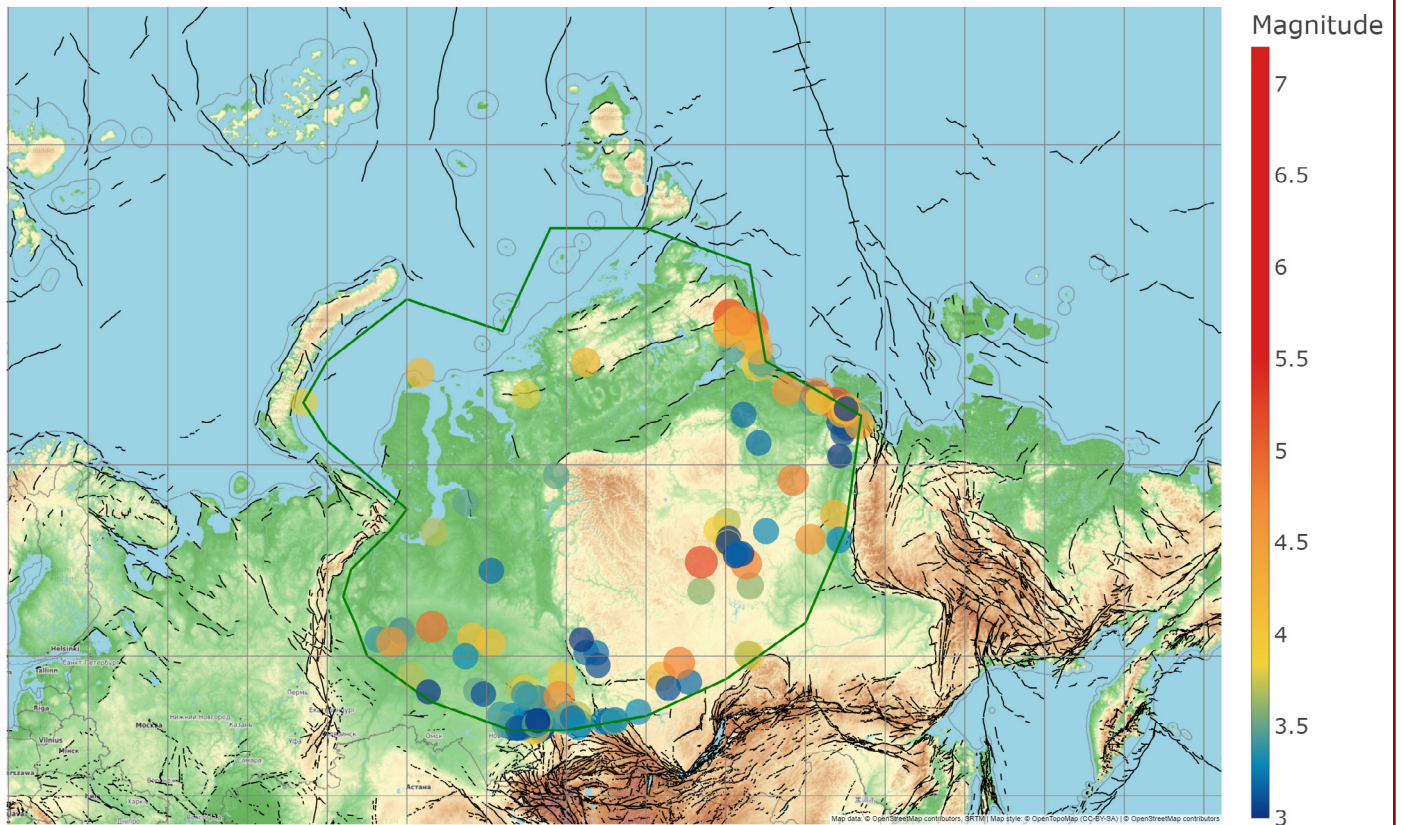
45. att.

Atbilstoši ģeoloģiskajām struktūrām sadalītais poligons Sibīrijas pluma iespiešanās un izplatīšanās reģionā (iekšējais melnais poligons) seismiskuma analīzei. Ārējais melnais poligons atbilst zonai, kur novērojami robežefekti no Sibīrijas pluma spiediena uz plātnēm

Tagad aplūkosim zemestrīces Sibīrijas pluma centrālajā apgabalā. 46. attēlā parādīta zemestrīču izvietojuma karte ar magnitūdu 3,0 un augstāk. Zemestrīces tiek reģistrētas Taimiras pussalas dienvidos. Īpašu satraukumu rada fakts, ka nesen, 2024. gada augustā un septembrī, šajā reģionā notika divas zemestrīces ar magnitūdām attiecīgi 3,5 un 3,8. Līdzīgas magnitūdas zemestrīces fiksētas arī Gidanas

pussalas dienvidos (M3,5) un Jamalas pussalā (M3,7 un M4,2) 10 km dziļumā. Šīs zemestrīces notika Sibīrijas pluma galvas lokalizācijas zonā, kas ir satraucoša tendence un ziņojumā tiks izskaidrota detalizētāk.

M3+ zemestrīces, Sibīrijas pluma reģions



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

46. att.

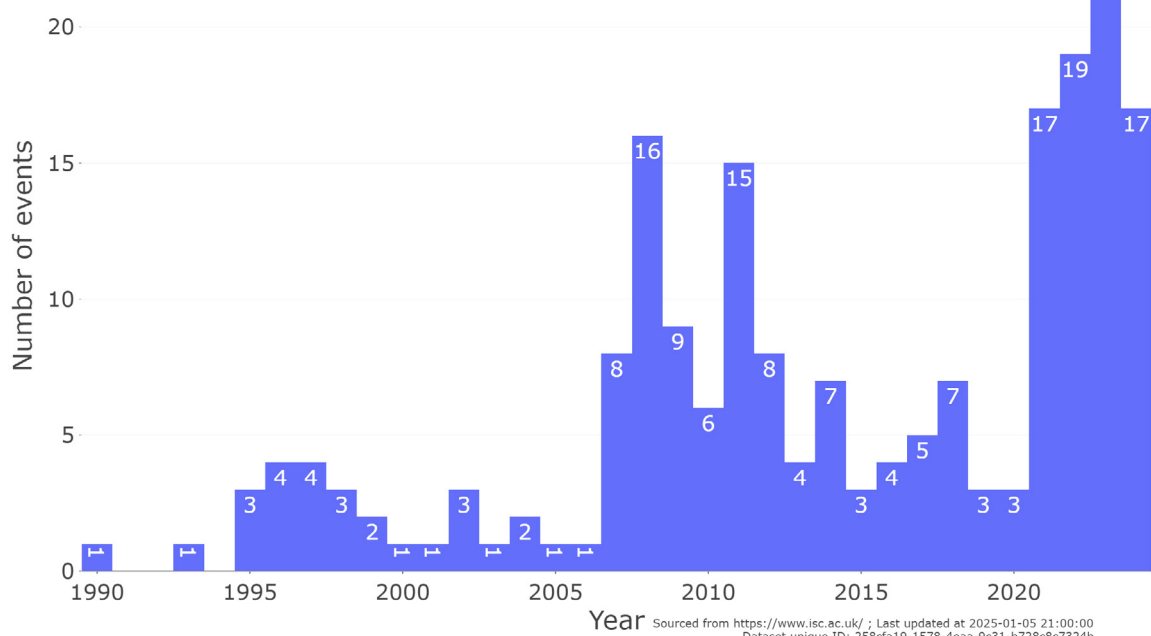
M3,0+ zemestrīču karte Sibīrijas pluma reģionā laika posmā no 1990. līdz 2024. gadam

Datu avots: ISC

No 1990. līdz 2024. gadam Sibīrijas pluma reģionā kopumā reģistrētas 205 zemestrīces ar M3,0+ magnitūdu. 1995. gadā tika novērots zemestrīču skaita pieaugums (47. att.), kas sakrīt ar globālo seismiskās aktivitātes palielināšanos tajā gadā, saistītu ar magmatisko aktivizāciju. Kopš 2007. gada novērots būtisks zemestrīču skaita pieaugums, kam sekoja pakāpeniska seismiskās aktivitātes samazināšanās. Taču

kopš 2021. gada zemestrīču skaits atkal strauji pieauga, pārsniedzot iepriekšējos ikgadējos rādītājus. Tādējādi Sibīrijas pluma reģionā novērojama viļņveidīga seismiskās aktivitātes pieauguma tendence. Pēdējos gados ir reģistrēti ievērojami vairāk notikumu, nekā iepriekš bija raksturīgi šim reģionam.

M3+ zemestrīces, Sibīrijas pluma reģions



47. att.

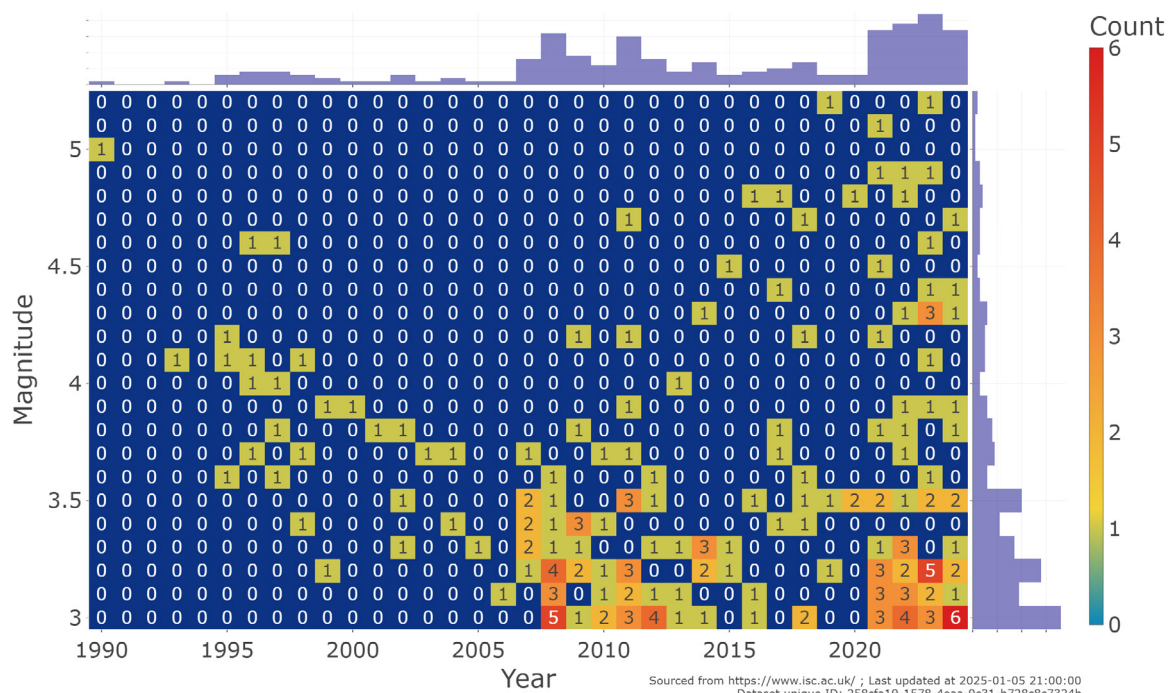
M3,0+ zemestrīču skaits Sibīrijas pluma reģionā no 1990. līdz 2024. gadam

Datu avots: ISC

Pēc M5,0 zemestrīces 1990. gadā, tika novērota pakāpeniska magnitūdu un zemestrīču skaita samazināšanās (48. att.). No 1990. līdz 2007. gadam reģistrētas tikai 3 zemestrīces ar magnitūdu virs 4,5. Kopš 2007. gada novērojams pakāpenisks zemestrīču magnitūdu pieaugums.

Pirmo reizi novērojumu vēsturē kopš 2019. gada parādījušās M5,1 un M5,2 zemestrīces. Visas zemestrīces ar magnitūdu M4,5+ atrodas pluma perifērijā (49. att.), un dažas no tām notiek stabilās zonās, kur nav zināmu lūzumu.

M3+ zemestrīces, Sibīrijas pluma reģions

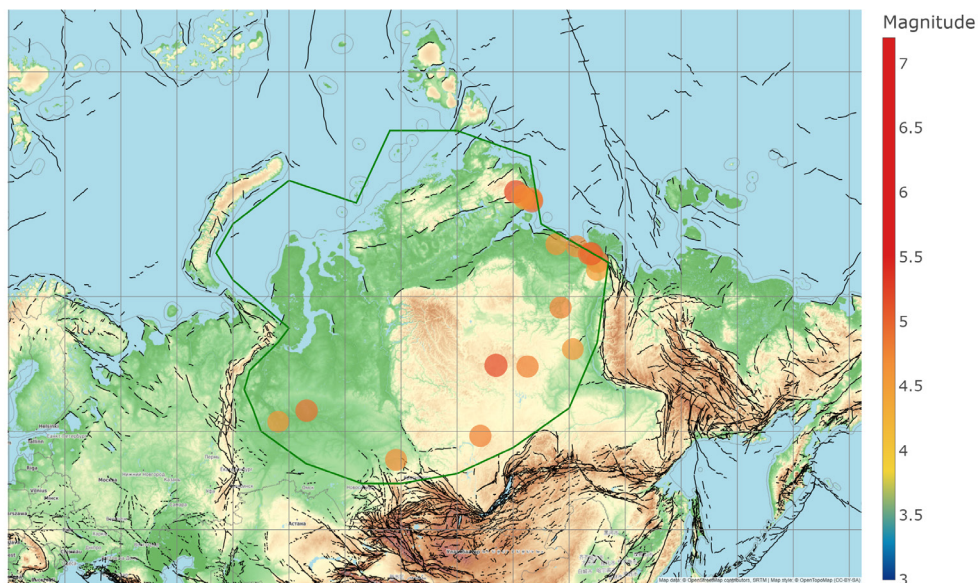


48. att.

Sibīrijas pluma reģionā notikušo zemestrīču sadalījums pēc magnitūdas no 1990. līdz 2024. gadam

Datu avots: ISC

M4,5+ zemestrīces, Sibīrijas pluma reģions



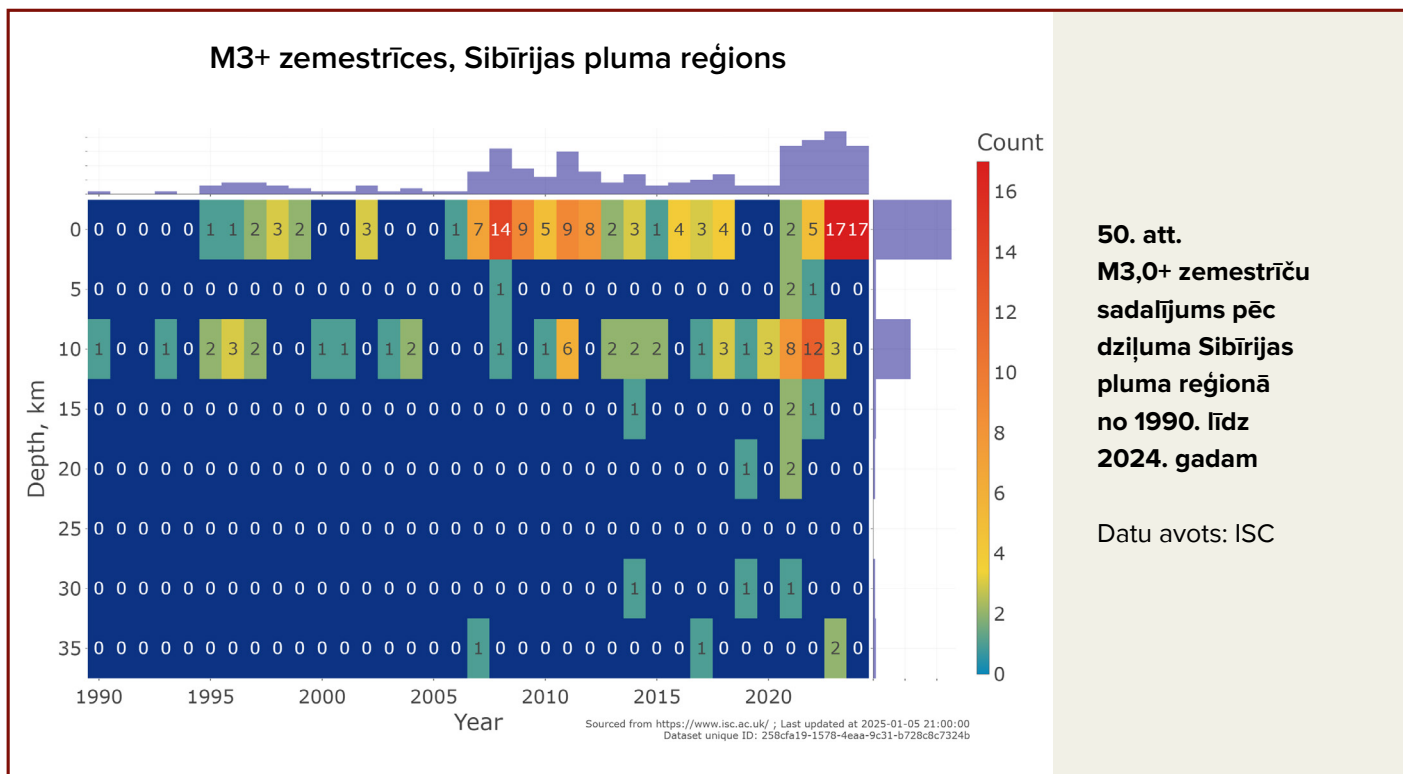
49. att.

M4,5+ zemestrīču karte Sibīrijas pluma reģionā no 1990. līdz 2024. gadam

Datu avots: ISC

Turklāt 2007. gadā pirmo reizi tika reģistrēta 3,7 magnitūdu zemestrīce 33 km dziļumā netālu no Moho robežas (50. att.). Pēc 2014. gada, zemestrīces Zemes garozas apakšējā robežzonā

30–35 km dziļumā sāka notikt ievērojami biežāk, un to magnitūda sasniedza pat 5,0. Visas šīs zemestrīces atradās pieļaujamā pluma perifērijā.



Veiktā zemestrīču analīze iespējamā Sibīrijas pluma reģionā rāda viļņveidīgu seismiskās aktivitātes pieaugumu: palielinās zemestrīču skaits, to magnitūdas kļūst lielākas, un parādās zemestrīces lielākā dziļumā. Tas liecina par plātnes deformācijas procesiem, ko izraisa milzīgs magmas spiediens no apakšas. Šo procesu progresēšana neizbēgami tuvākajā nākotnē novedīs pie Sibīrijas pluma izvirduma.

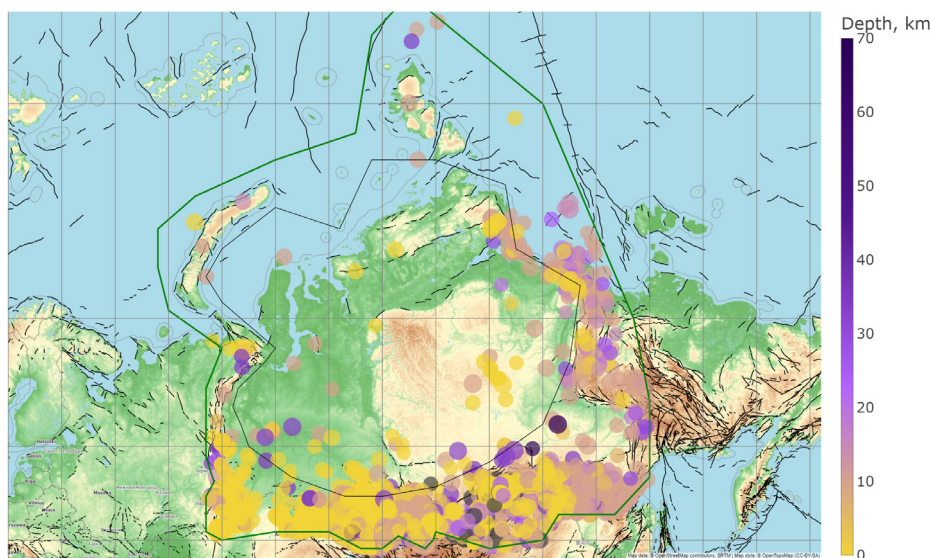
Austrumsibīrijas kratona pamatu stiprina magmatiskie un metamorfie ieži, kas veido blīvu

monolītu garozu. Tā izveidojusies pirms 250 miljoniem gadu notikušo izvirdumu rezultātā. Spēcīgu zemestrīču parādīšanās šajā reģionā ar magnitūdu 7,0 un augstāk nozīmētu, ka Sibīrijas kratona platformas struktūras piedzīvo deformācijas, kas pārsniedz iežu izturības robežu. Lai saprastu, kā monolītais Sibīrijas kratons varētu sašķelties pluma spiediena ietekmē, var izmantot analogiju ar stiklu, kas ieplaisā mirkli pirms pilnīgas sadrupšanas.

Pašlaik, lai iegūtu precīzāku priekšstatu par pluma virzību un Zemes garozas stabilitāti Sibīrijas magmatiskā pluma reģionā, ir ārkārtīgi svarīgi uzstādīt papildu seismiskos sensorus, vēlams vairāku kilometru dziļos urbumos. Tas ļautu veikt detalizētu seismotomogrāfisko analīzi Zemes garozai un mantijai, kā arī nodrošinātu pastāvīgu pluma atrašanās vietas un aktivitātes monitoringu (skat. sadaļu “3. Scenārijs. Plānota kontrolēta degazācija”).

Jāpievērš uzmanība zemestrīču sadalījumam pēc dziļuma Sibīrijas pluma reģionā un tā perifērijas zonās (51. att.). Zemestrīces dziļumā pie Moho robežas (vairāk nekā 30 km) un pašā mantijā galvenokārt notiek krokojuma apgabalos. Turklāt var novērot, ka tās apjož iespējamo Sibīrijas pluma atrašanās vietas.

M3,5+ zemestrīces, Sibīrijas pluma reģions



51. att.
M3,5+ Zemestrīču karte Sibīrijas pluma reģionā no 1990. līdz 2024. gadam. Krāsu mērogs atbilst dziļuma vērtībām

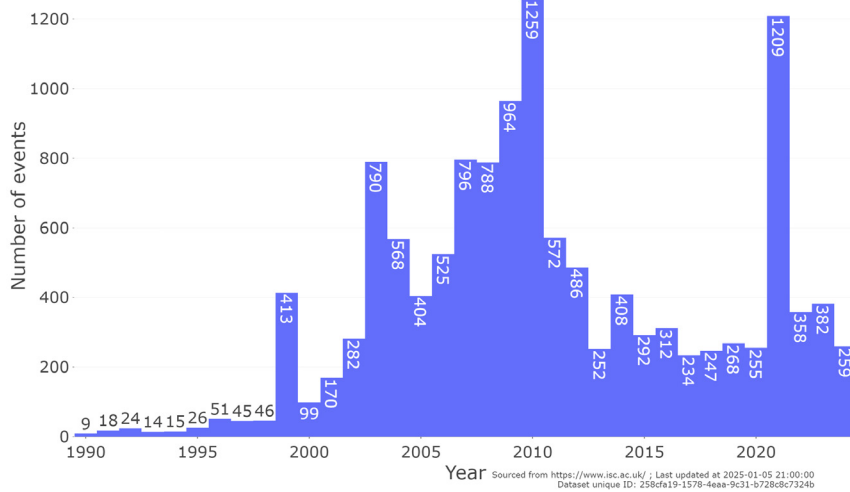
Datu avots: ISC

Apskatīsim seismisko aktivitāti tikai Sibīrijas pluma malās. Ģeoloģiski šīs zonas pieder krokojuma joslām – seismiski aktīviem reģioniem, kuros seismiskā aktivitāte var būt saistīta gan ar tektoniskām kustībām, gan ar magmatiskā pluma ietekmi. Zemestrīču skaita grafiks uzrāda jauktu ainu, kurā pārklājas dažādi seismiskuma faktori (52. att.). Dažos gados novērojami būtiski seismiskās aktivitātes uzliesmojumi. Lai precīzāk izprastu šo procesu raksturu, nepieciešams analizēt katru reģionu atsevišķi.

Aplūkojot Verhojanskas krokoto struktūru

un Laptjevu jūras gultnes lūzumu zonu (53. att.), redzam, ka spēcīgi M3,0+ zemestrīču uzliesmojumi notika 2013. gadā un 2021.-2022. gadā (54. att.). Šādi uzliesmojumi ir raksturīgi magmas iespiešanās etapiem, kas izraisa būtiskus Zemes garozas nepārtrauktības traucējumus un fluīdu fāzes izplūdi caur iežu plaisām un tuvējām lūzumu zonām. Šādus procesus papildina arī mazo magnitūdu zemestrīču skaita pieaugums un zemestrīču spietu veidošanās, un dažkārt pat vairāku seismisko spietu sērijas.

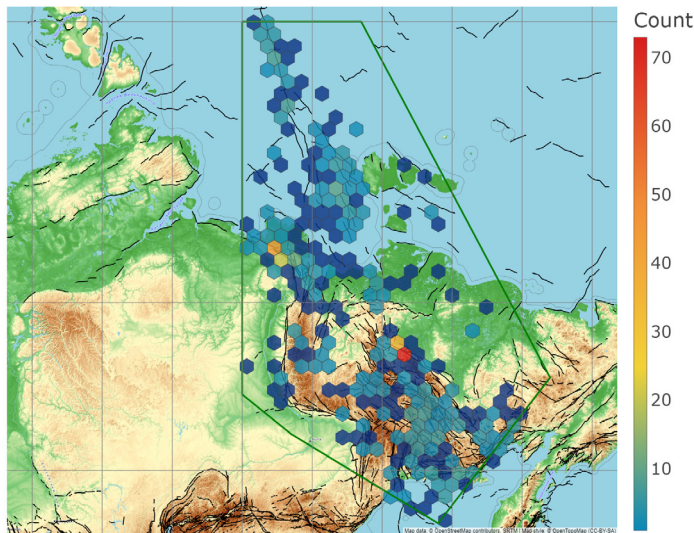
M3+ zemestrīces Sibīrijas pluma perifērijas daļās



52. att.
M3,0+ zemestrīču skaits Sibīrijas pluma malās no 1990. līdz 2024. gadam. Tika izslēgtas zemestrīces poligona iekšienē (47. att.)

Datu avots: ISC

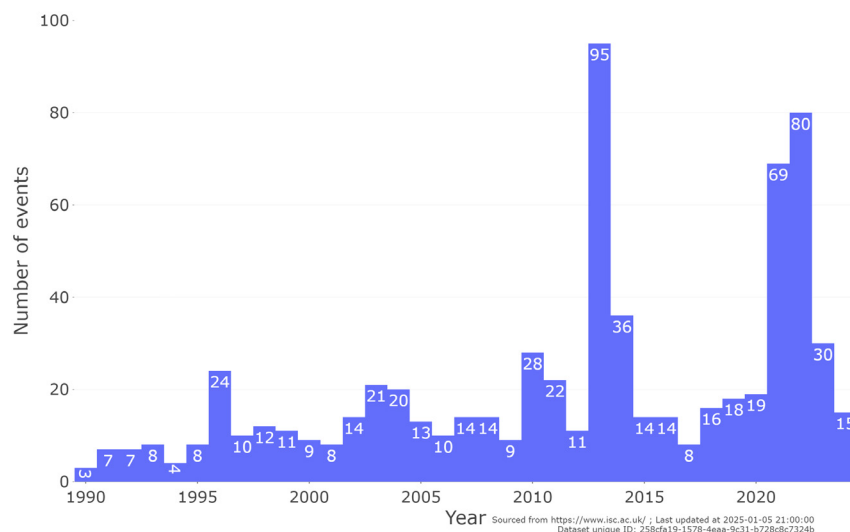
M3+ zemestrīču blīvums, Sibīrijas kratona ziemeļaustrumu daļa



53. att.
M3,0+ zemestrīču blīvums izvēlētajā Sibīrijas bloka ziemeļaustrumu malas posmā no 1990. līdz 2024. gadam. Melnā līnija apzīmē lūzumu zonas

Datu avots: ISC

M3+ zemestrīču blīvums, ziemeļaustrumu daļa



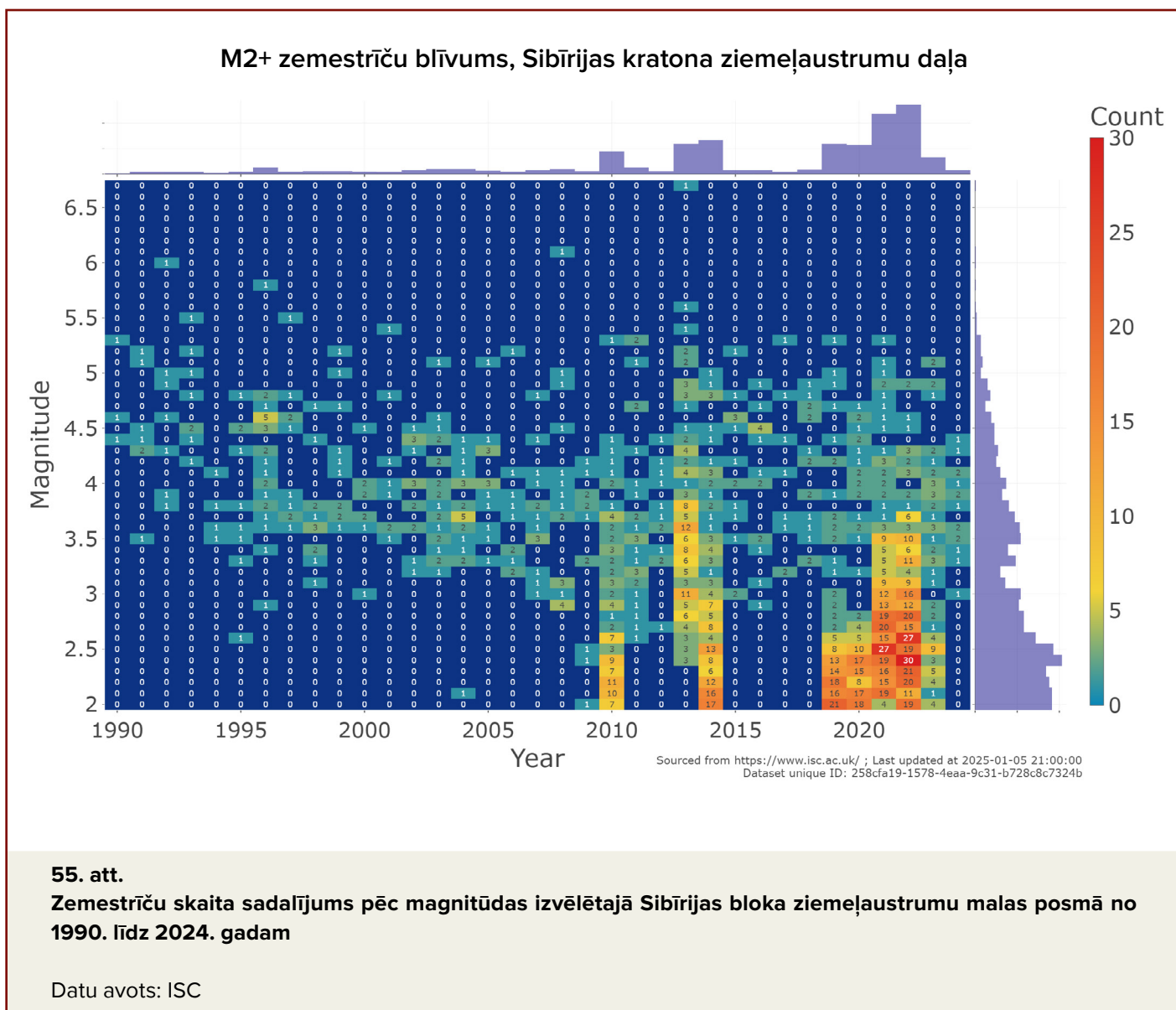
54. att.
M3,0+ zemestrīču skaita grafiks izvēlētajā Sibīrijas bloka ziemeļaustrumu malas posmā no 1990. līdz 2024. gadam

Datu avots: ISC

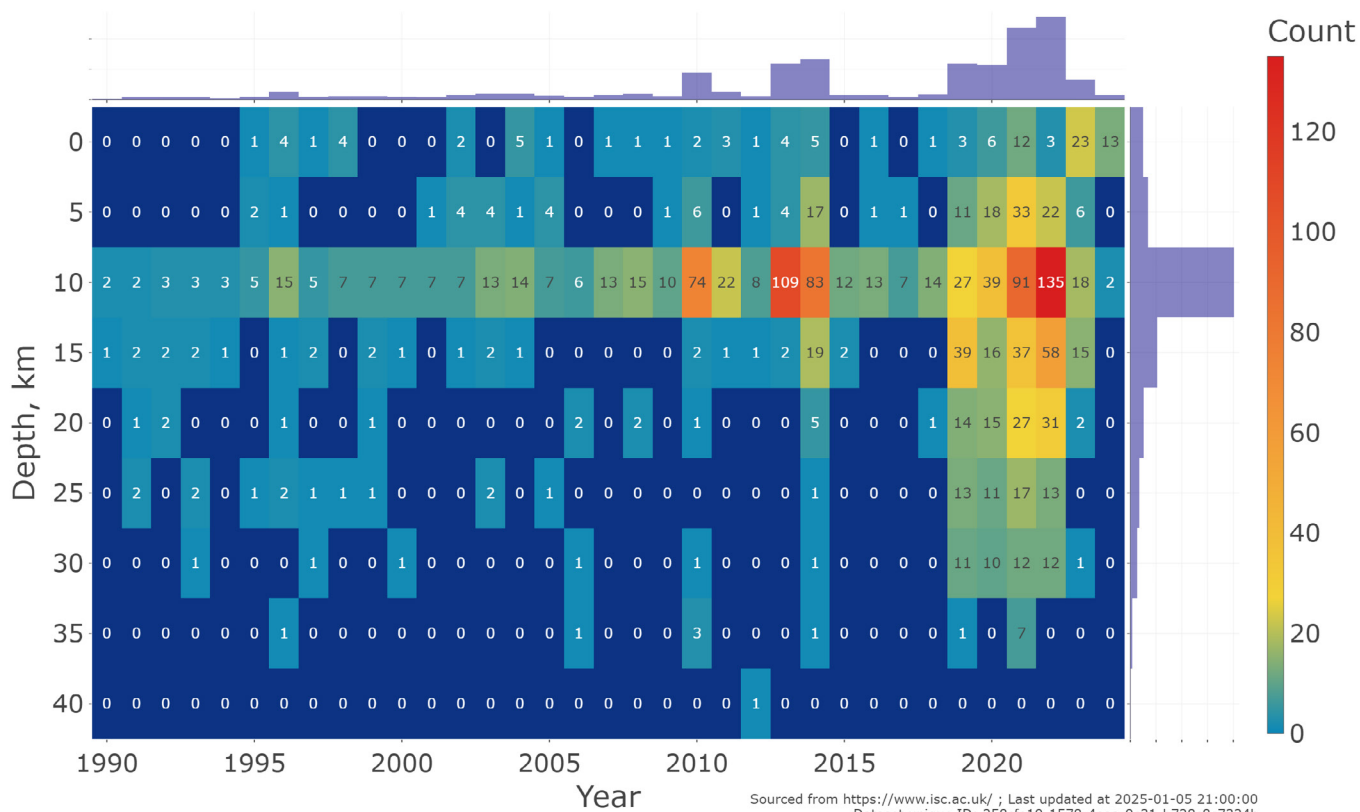
Pētījums par zemestrīču magnitūdām šajā zonā parāda zemestrīču skaita pieaugumu 2010. gadā un 2013.-2014. gadā ar magnitūdu no 2,0 līdz 3,0 un arī ievērojamu to pieaugumu kopš 2019. gada (55. att.). Kopš 2019. gada būtiski pieaudzis arī to zemestrīču skaits, kas ietekmē Zemes garozu praktiski līdz pašai pamatnei, līdz 35 km dziļumam (56. att.). 2013.

gadā šajā reģionā pirmo reizi tika reģistrēta M6,7 zemestrīce, kas skaidri norāda uz ilgstošu sprieguma uzkrāšanās fāzi vai uzkrāto magmatisko fluīdu izplūdi.

Atsevišķi aplūkosim zemestrīču grupu dienvidaustrumu virzienā no Taimiras pussalas (57. att.).



M2+ zemestrīču blīvums, Sibīrijas kratona ziemeļaustrumu daļa

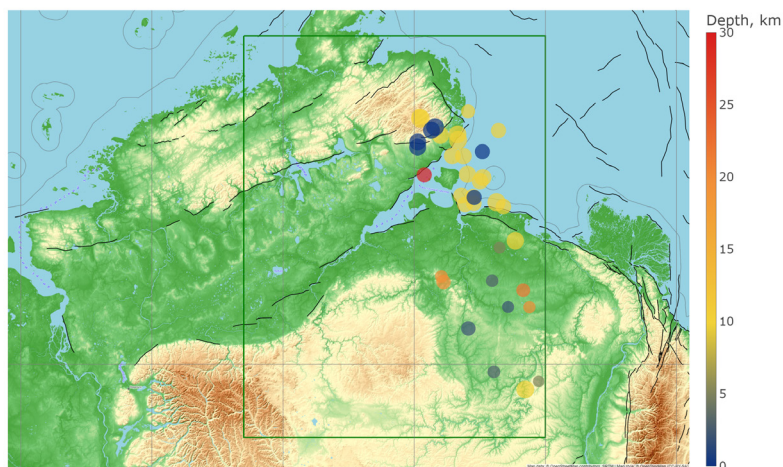


56. att.

M2,0+ zemestrīču skaita sadalījums izvēlētajā Sibīrijas bloka ziemeļaustrumu malas posmā no 1990. līdz 2024. gadam

Datu avots: ISC

M2+ zemestrīces uz ziemeļaustrumiem no Taimiras pussalas

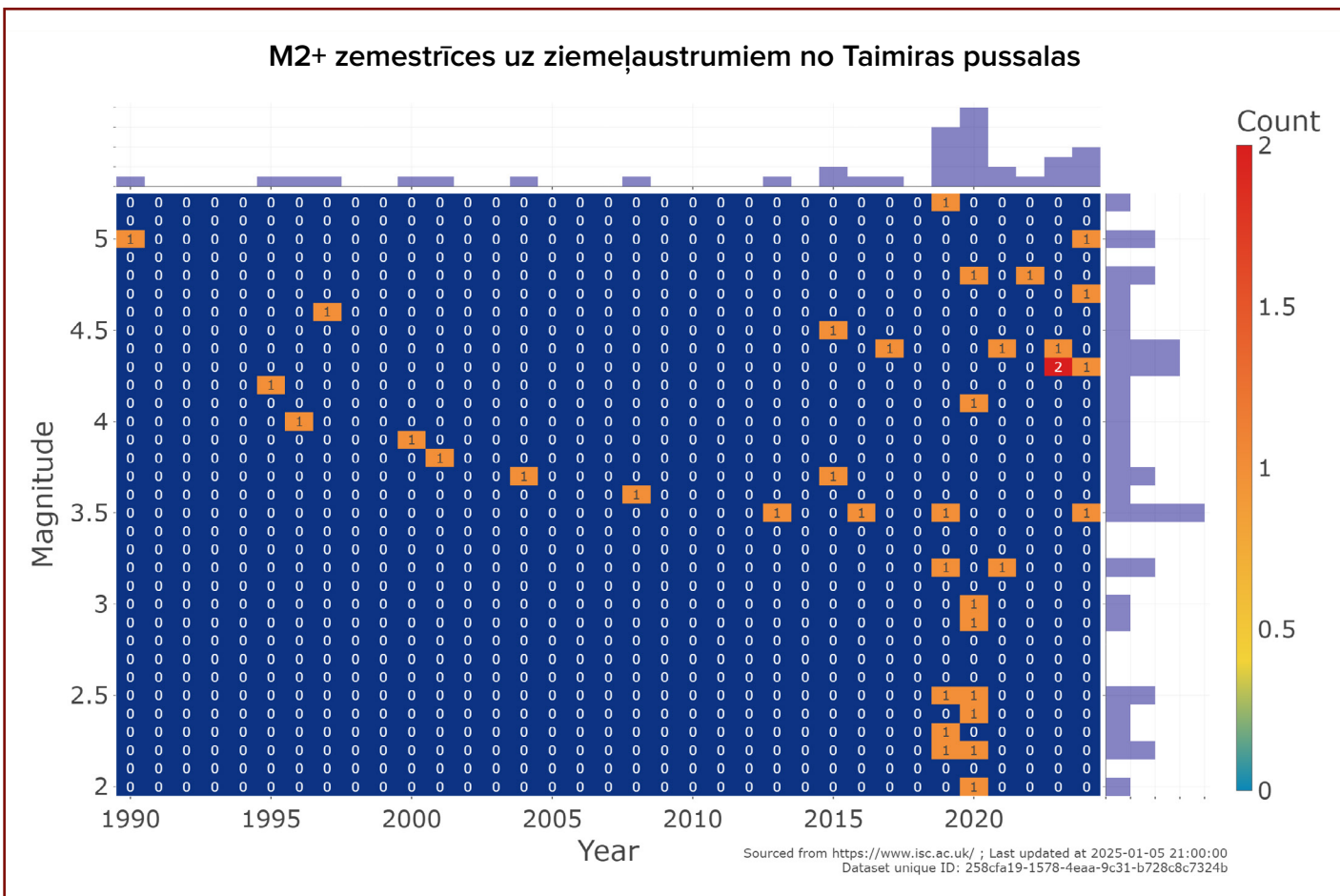
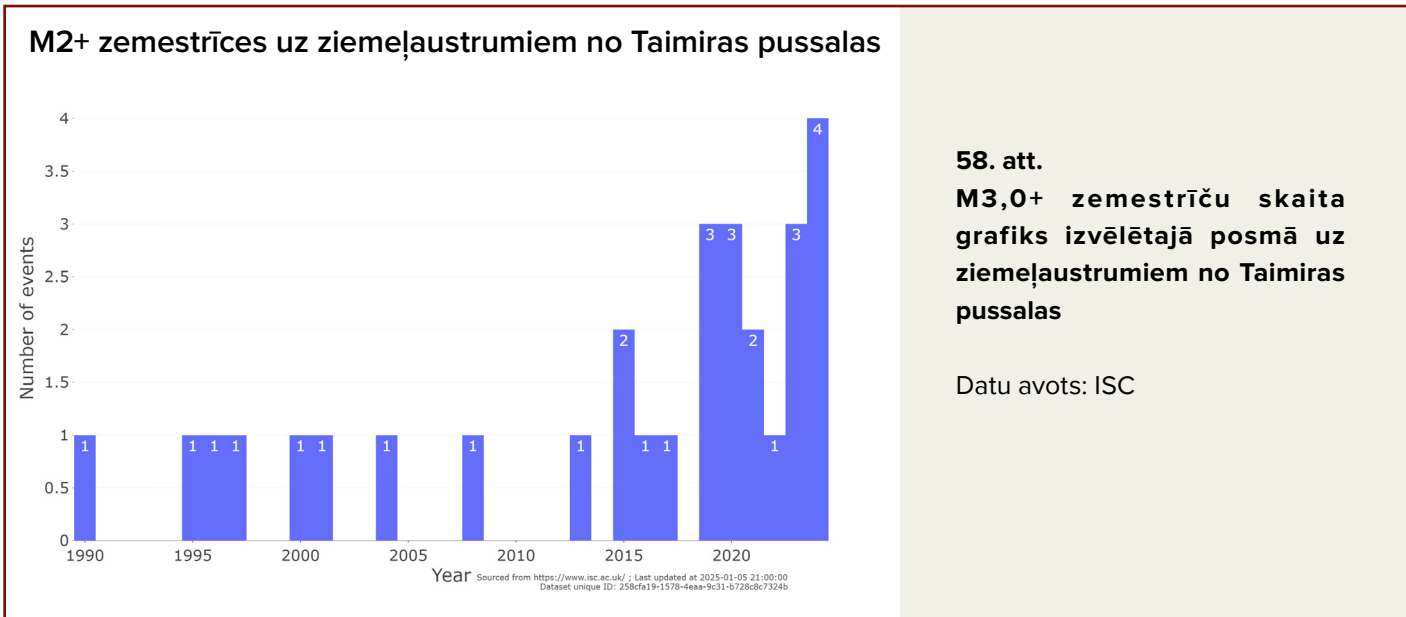


57. att.

M2,0+ zemestrīču izplatības karte izvēlētajā posmā uz ziemeļaustrumiem no Taimiras pussalas no 1990. līdz 2024. gadam

Datu avots: ISC

2019.–2020. gadā šajā reģionā tika novērots arī seismiskās aktivitātes pieaugums ar zemām un vidējām magnitūdām (58., 59. att.).

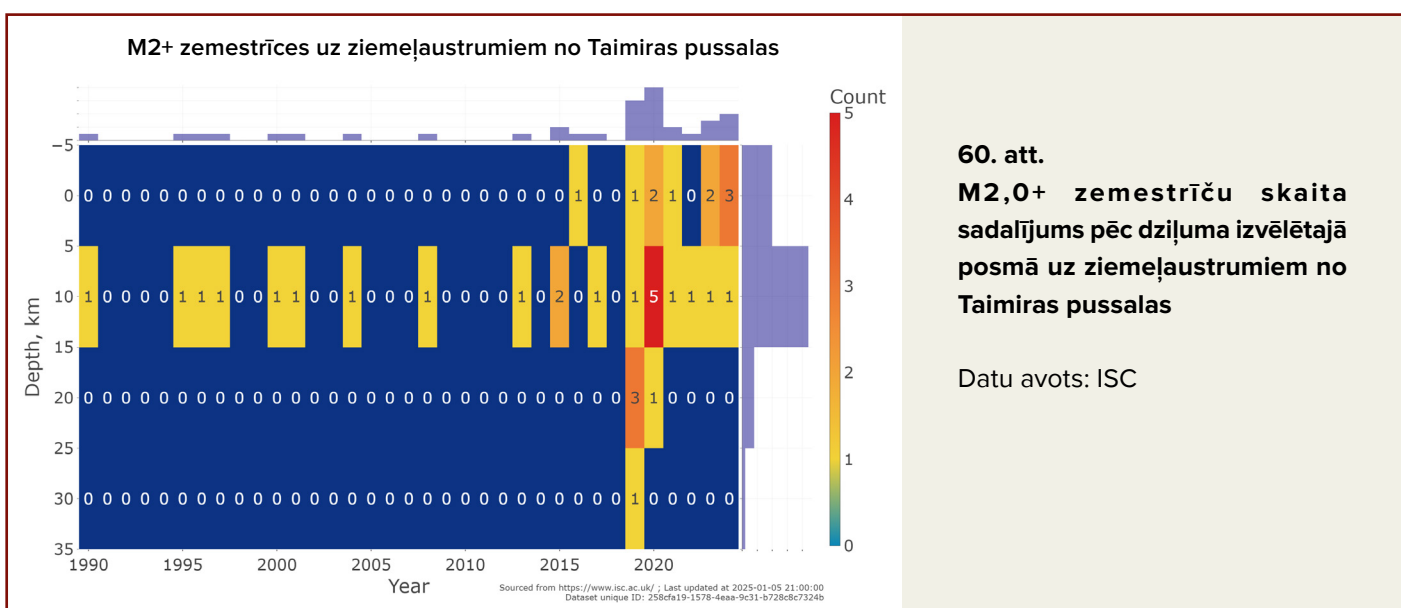


2019.–2020. gadā tika novērots arī zemestrīču dziļuma pieaugums līdz pat Zemes garozas apakšējai robežai (60. att.) tajos pašos laika periodos, kas fiksēti Verhojanskas krokojuma struktūrās reģionā.

Jāuzsver, ka šī zona atrodas Sibīrijas pluma galvas ietekmes apgabalā, un, neskatoties uz nelielo zemestrīču skaitu, tajā novērojama līdzīga tendence – palielinās gan dziļums, gan zemestrīču skaits, tāpat kā Verhojanskas

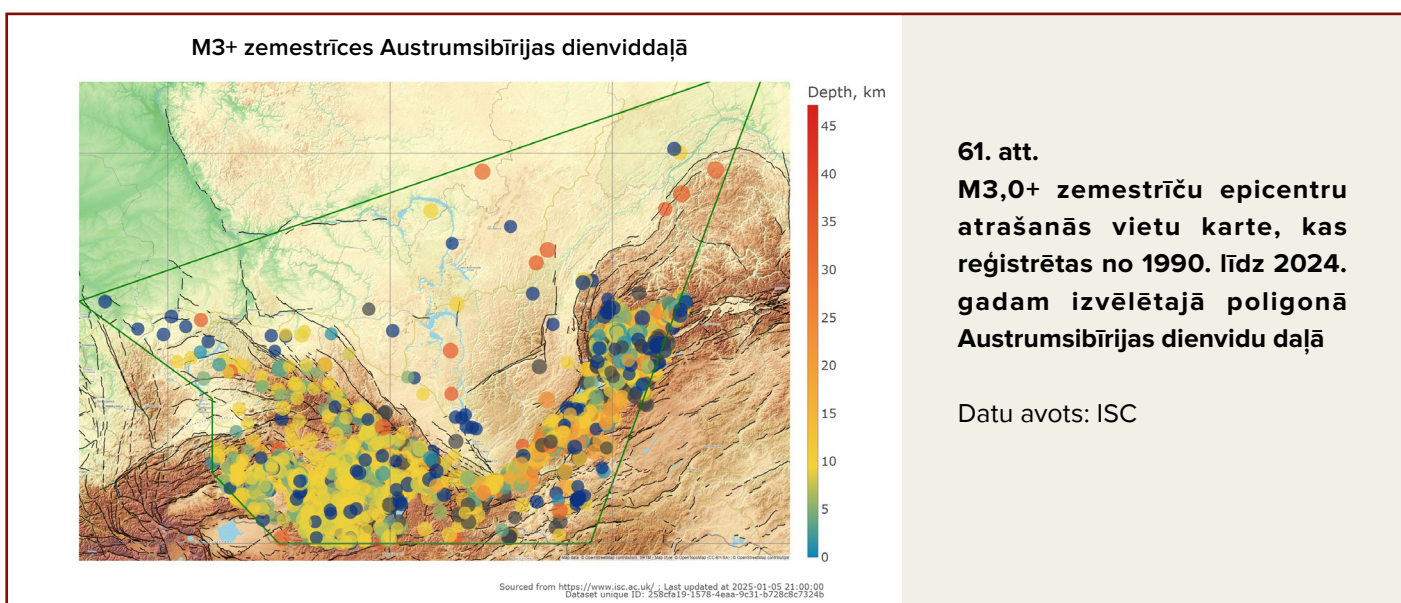
krokojuma struktūrās, tikai sākot no 2019. gada.

Apskatāmās teritorijas dienvidu daļā ietilpst Altaja-Sajānu krokojuma zona un Baikāla reģions (61. att.). Tas ir tektoniski aktīvs un seismiski nestabils reģions. Šeit novērots zemestrīču skaita pieaugums 1999. un 2021. gadā (62. att.). Kopš 2007. gada zemestrīču magnitūdas sāka pieaugt, 2021. gadā sasniedzot pat 6,8 magnitūdas (63. att.).



60. att.
M2,0+ zemestrīču skaita sadalījums pēc dziļuma izvēlētajā posmā uz ziemeļaustrumiem no Taimiras pussalas

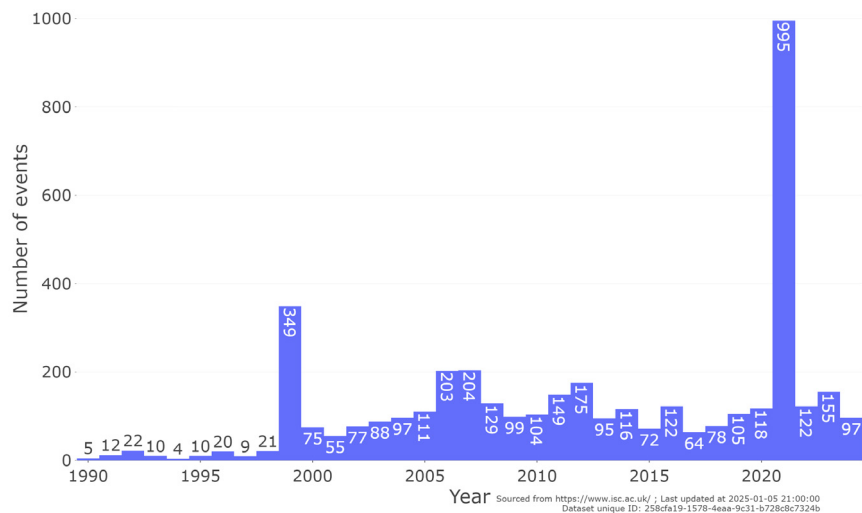
Datu avots: ISC



61. att.
M3,0+ zemestrīču epicentru atrašanās vietu karte, kas reģistrētas no 1990. līdz 2024. gadam izvēlētajā poligonā Austrumsibīrijas dienvidu daļā

Datu avots: ISC

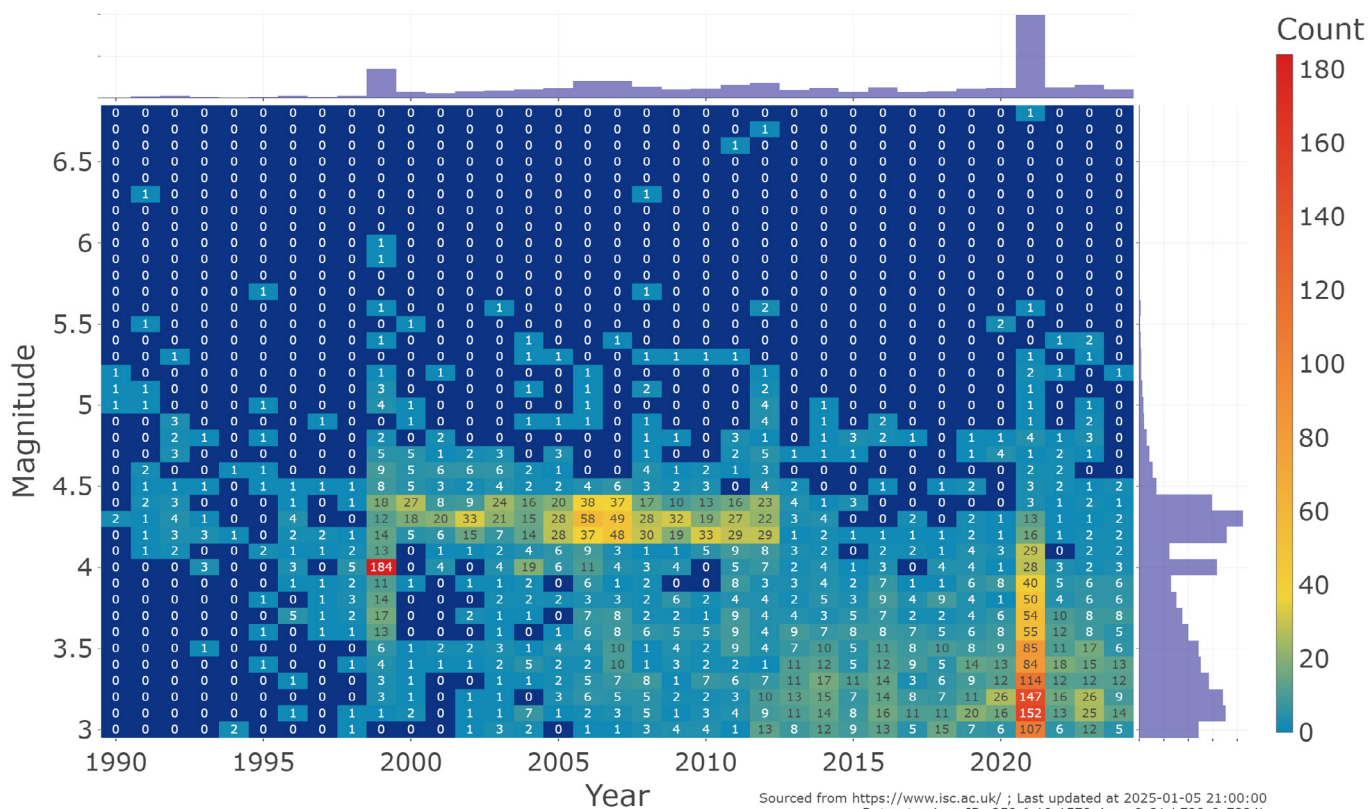
M3+ zemestrīces Austrumsibīrijas dienviddaļā



62. att.
M3,0+ zemestrīču skaits Austrumsibīrijas dienvidu daļā

Datu avots: ISC

M3+ zemestrīces Austrumsibīrijas dienviddaļā



63. att.
Zemestrīču sadalījums pēc magnitūdas izvēlētajā poligonā Austrumsibīrijas dienvidu daļā no 1990. līdz 2024. gadam

Datu avots: ISC

Ir svarīgi atzīmēt mantijas zemestrīču parādīšanos zem Sibīrijas kratona. Jau 1998. gadā Viļujas sineklīzes reģionā tika reģistrēta 3,3 magnitūdu zemestrīce 211 km dziļumā. Tas bija negaidīts atklājums, taču vēl unikālāks notikums bija 2023. gadā tajā pašā reģionā notikušī 5,1 magnitūdas zemestrīce, kas sasniedza 627 km dziļumu (64. att.).

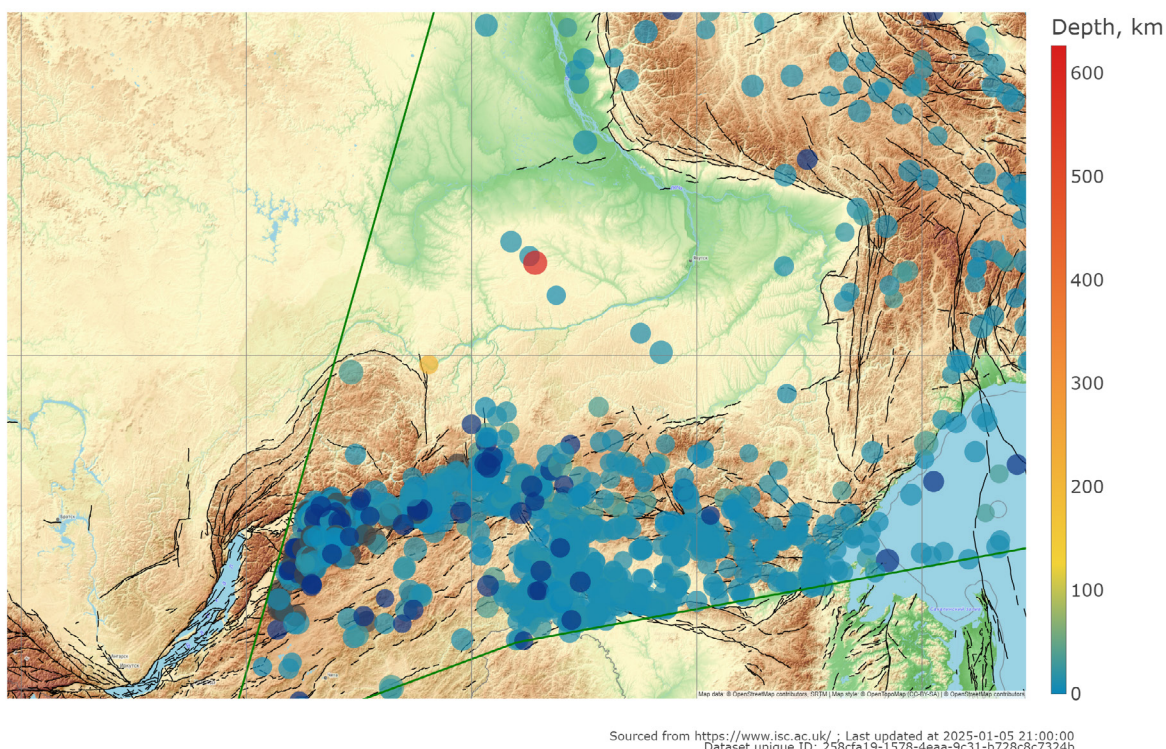
Pati dziļfokusa seismiskuma izpausme zem stabilā Zemes garozas kratona bloka ir ārkārtējs notikums. Parasti tiek pieņemts, ka šādas iekšmantijas zemestrīces notiek tā dēvētajās subdukcijas zonās, tomēr tuvākā šāda zona atrodas tūkstošiem kilometru attālumā un nevar ietekmēt šo reģionu.

Ziņojuma autori uzskata, ka dziļfokusa zemestrīču cēlonis ir ārkārtīgi spēcīgi

iekšmantijas sprādzieni, kas notiek, kad relatīvi karstākas magmas plūsmas saskaras ar salīdzinoši aukstākām plūsmām. Saskaņā ar seismotomogrāfisko modeli seismisko viļņu ātruma anomālijas tiek novērotas abu dziļfokusa zemestrīču vietās. Šīs anomālijas atbilst reģioniem ar relatīvi viskozākiem un plūstošākiem masveida kustības procesiem, kas, visticamāk, atspoguļo temperatūras atšķirības.

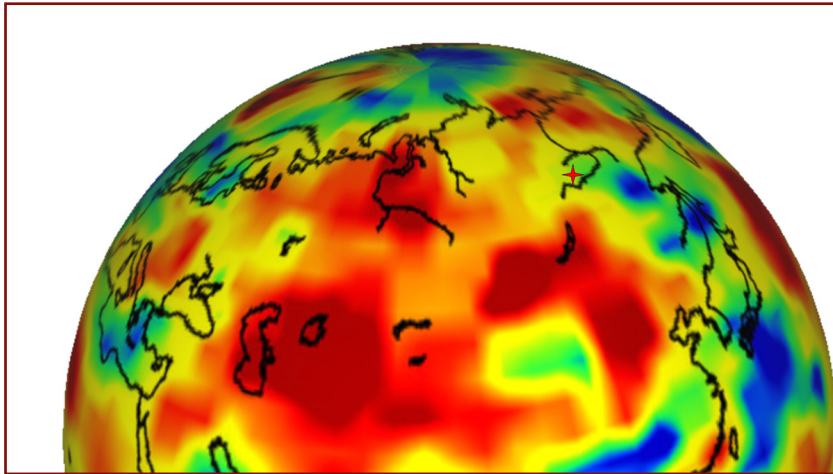
Tādējādi šīs divas mantijas zemestrīces notika vietās, kur saskārās relatīvi aukstas un karstas mantijas plūsmas (65. att.), kas izraisīja lielu enerģijas izlādi un radīja akustiskos viļņus, kurus seismiskie sensori fiksēja kā zemestrīces. Tas nepārprotami norāda uz būtisku mantijas plūsmu aktivitāti šajā reģionā.

Dziļo zemestrīču izvietojums Sibīrijā



64. att.

Kartē atzīmēts M5,1 dziļfokusa zemestrīces epicentrs 627 km dziļumā (sarkanais marķieris) zem Sibīrijas platformas 2023. gadā un M3,3 zemestrīce 211 km dziļumā 1998. gadā (dzeltenais marķieris)



65. att.

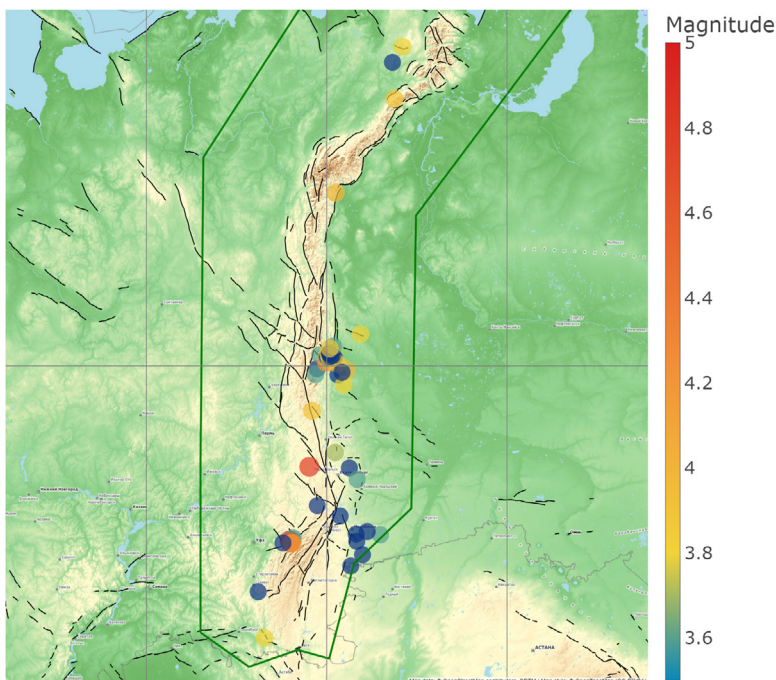
Seismisko viļņu pazemināta ātruma zonas mantijā aptuveni 600 km dziļumā. 2023. gada M5,1 zemestrīces hipocentrs atrodas reģionā, kur saskaras relatīvi karstās un aukstās mantijas zonas

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

Sibīrijas bloka malu svārstības izraisa seismiskās aktivitātes pieaugumu Urālu reģionā. Analīzei izmantotie dati tika filtrēti, izslēdzot iežu nogrūvumus, ko radījusi kalnrūpniecības darbība. Tāpat tika izvēlētas tikai zemestrīces ar

magnitūdu 3,5 un augstāk, lai garantētu cilvēka darbības izraisīto notikumu izslēgšanu (66., 67. att.).

M3,5+ zemestrīces Urālos

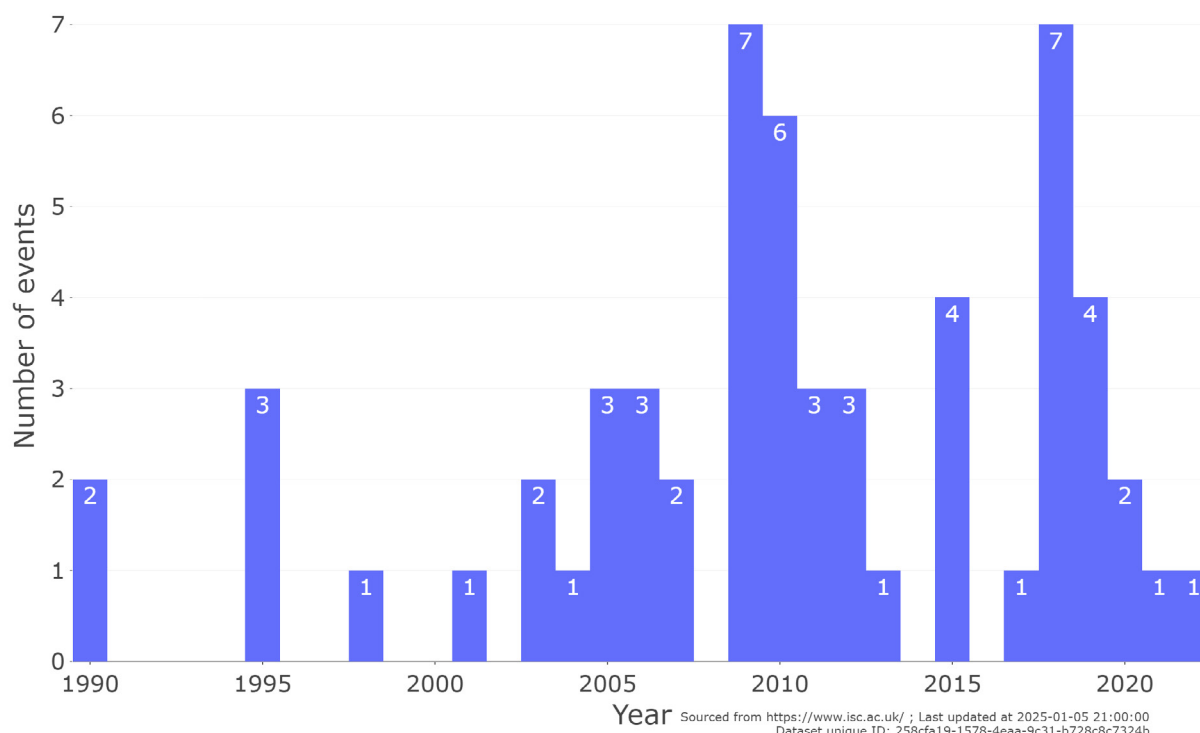


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

66. att.

Epicentru atrašanās vietu karte M3,5+ zemestrīcēm, kas reģistrētas Urālu reģionā no 1990. līdz 2022. gadam

M3,5+ zemestrīces Urālos



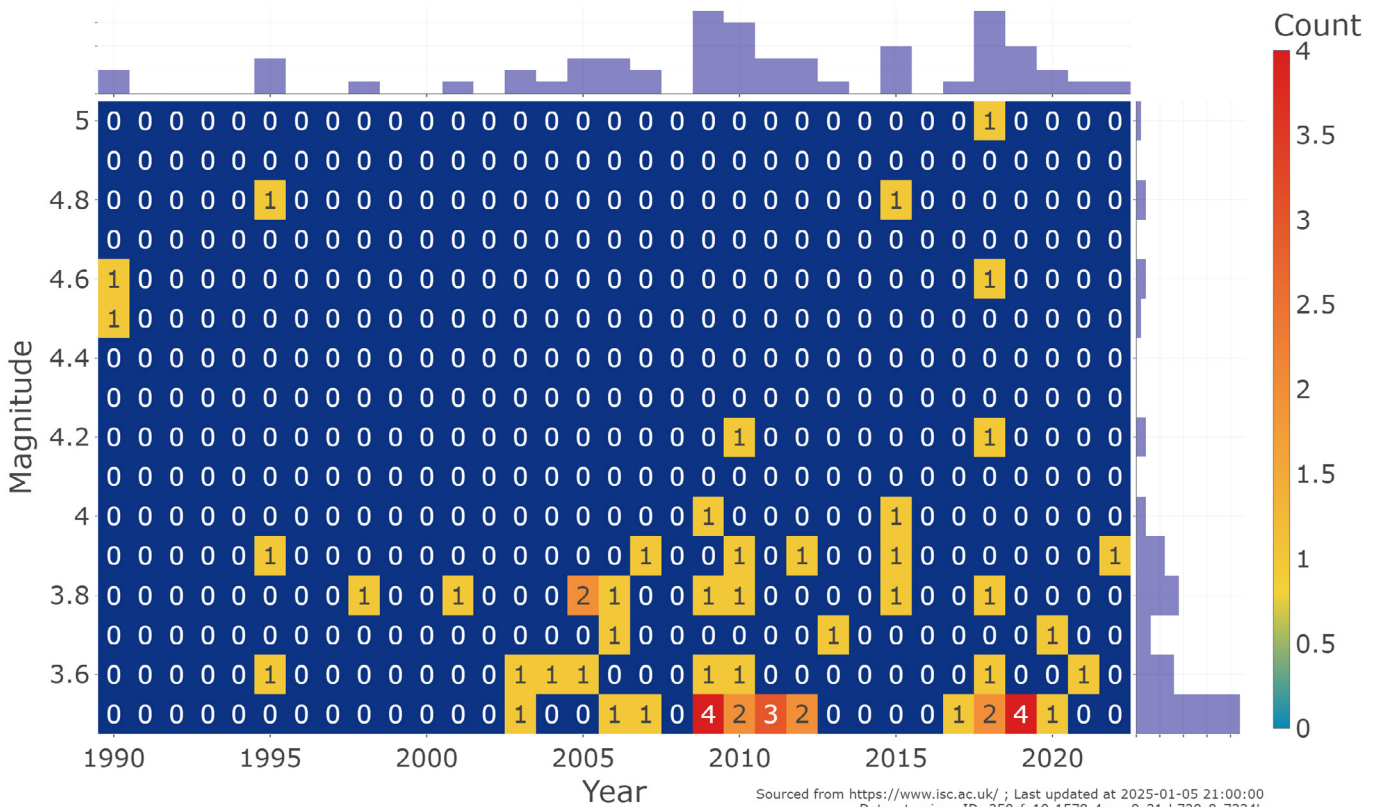
67. att.

M3,5+ zemestrīču skaits, kas reģistrētas Urālu reģionā no 1990. līdz 2022. gadam

Turklāt reģionā ir parādījušās no 4,0 līdz 5,0 magnitūdu zemestrīces, kas arī liecina par dabisku zemestrīču pieaugumu (68. att.).

Seismiskās aktivitātes pieaugums Urālu reģionā nenotiek vienmērīgi, bet viļņveidīgi, kas atbilst dabiskām likumsakarībām.

M3,5+ zemestrīces Urālos



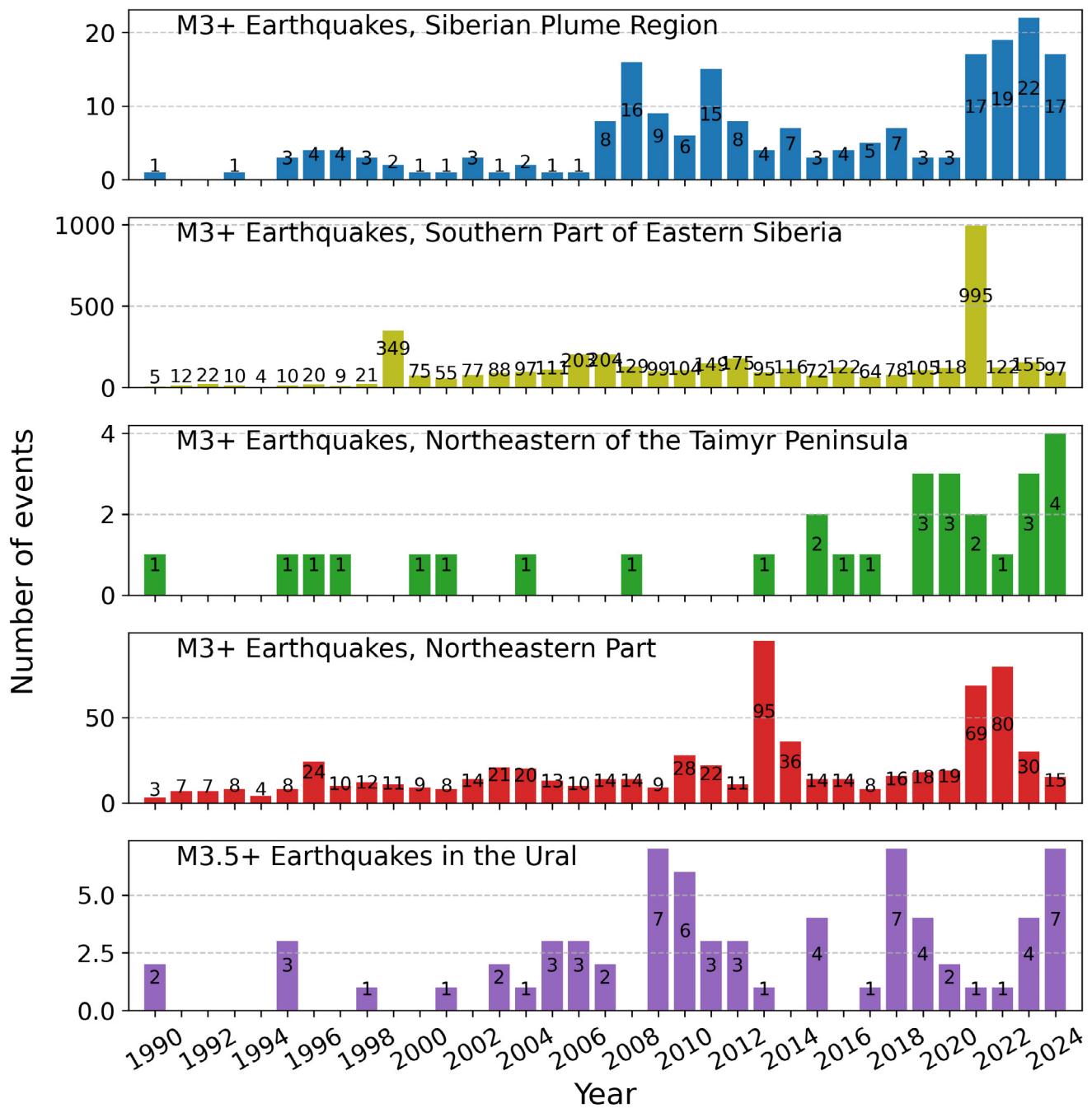
68. att.

Urālu reģionā reģistrēto zemestrīču sadalījums pēc magnitūdas no 1990. līdz 2022. gadam

Datu avots: ISC

Lai salīdzinātu seismiskās aktivitātes maksimumu laika sakritību dažādās Sibīrijas pluma zonās un tās perifērijas daļās, tika izveidots grafiks (69. att.). 2021. gadā notika seismiskās aktivitātes pieaugums visos apskatītajos reģionos, izņemot Urālus. Grafīkā redzams, ka visos reģionos notiek seismiskā aktivitāte, kas pēdējos gados palielinās. Pieaugums nenotiek vienlaicīgi, bet viļņveidīgi un ar pulsējošiem uzliesmojumiem dažādos reģionos. Tajā pašā laikā novērojama zināma likumsakarība, kas atgādina pakāpenisku plātnes svārstīšanos virzienā no rietumiem uz austrumiem un no ziemeļiem uz dienvidiem.

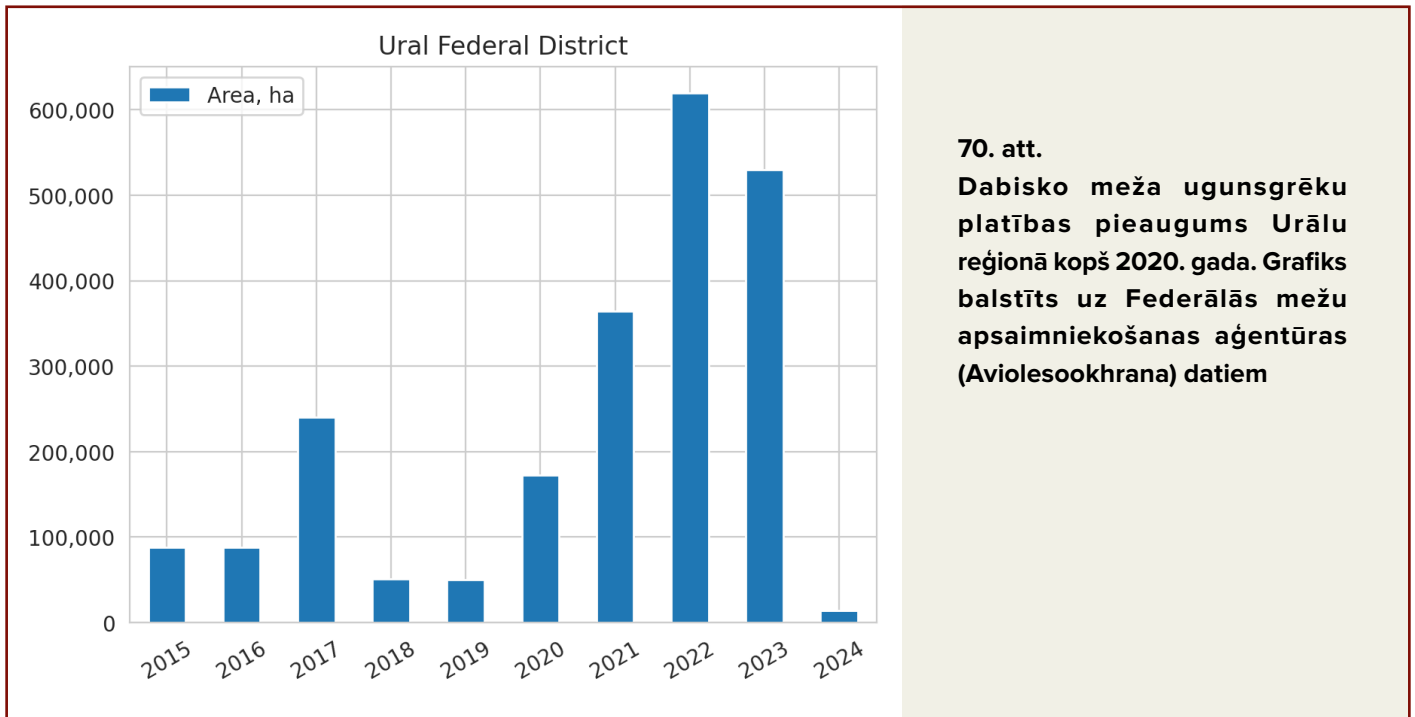
Apskatīsim meža ugunsgrēku izplatību dažos reģionos. Ugunsgrēku platības pieaugums reģionā var norādīt uz Zemes dzīļu aktivitātes palielināšanos, jo ugunsgrēki bieži izceļas lūzumu zonās, kur notiek uzliesmojošu gāzu izplūde. Šāda veida ugunsgrēkus ir grūti nodzēst, un tie ļoti ātri izplatās lielās teritorijās. Urālu reģionā kopš 2020. gada novērojams straujš dabisko ugunsgrēku platības pieaugums (70. att.). Grafiks sagatavots, balstoties uz Federālās mežu apsaimniekošanas aģentūras (Aviolesoohrana) datiem.



69. att.

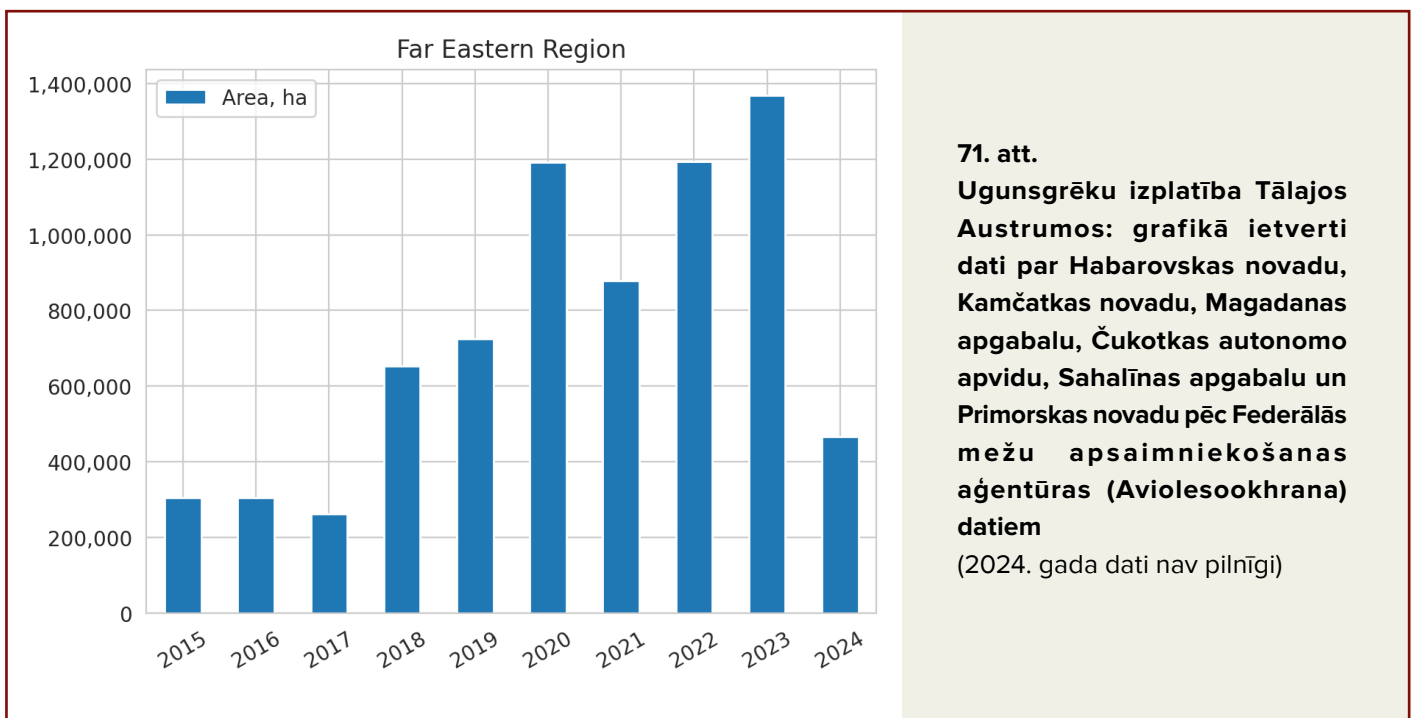
Seismiskās aktivitātes pīķu sadalījums Verhojanskas reģionā (austrumos no Sibīrijas platformas), Austrumsibīrijas dienvidu daļā, Urālos (rietumos no Austrumsibīrijas) un Centrālsibīrijā (ieskaitot Rietumsibīrijas plātni un Austrumsibīrijas platformu) pa gadiem no 1990. līdz 2024. gadam. M3,0+ zemestrīces

Datu avots: ISC



70. att.
Dabisko meža ugunsgrēku platības pieaugums Urālu reģionā kopš 2020. gada. Grafiks balstīts uz Federālās mežu apsaimniekošanas aģentūras (Aviolesookhrana) datiem

Arī Tāajos Austrumos ugunsgrēku skartā platība pieaug eksponenciāli, ko uzskatāmi parāda grafiks (71. att.).



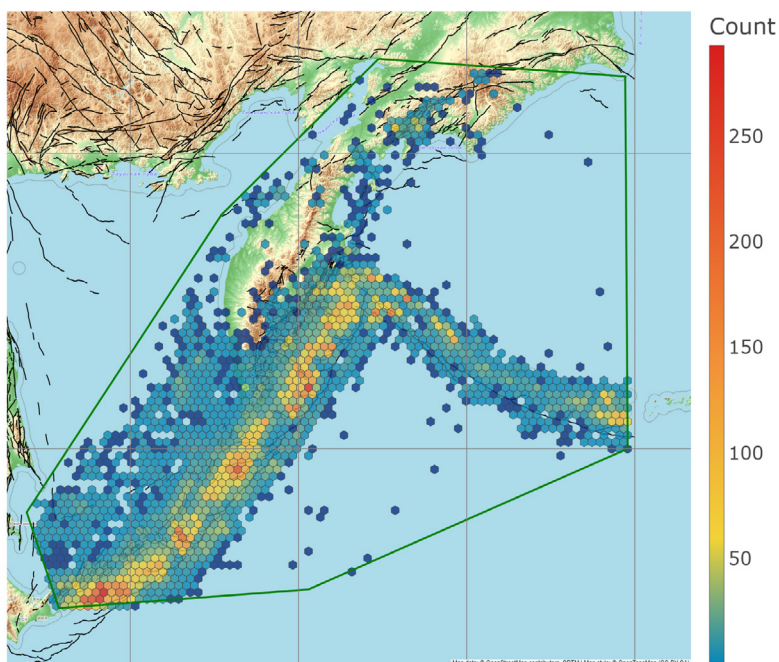
71. att.
Ugunsgrēku izplatība Tāajos Austrumos: grafikā ietverti dati par Habarovskas novadu, Kamčatkas novadu, Magadanas apgabalu, Čukotkas autonomo apvidu, Sahalīnas apgabalu un Primorskas novadu pēc Federālās mežu apsaimniekošanas aģentūras (Aviolesookhrana) datiem (2024. gada dati nav pilnīgi)

Līdzīgi ugunsgrēku pieauguma procesi notiek arī Sibīrijas un Tālo Austrumu Zemes garozas bloka otrā pusē, uz robežas ar Klusā okeāna plātņi.

Tiek pieļauts, ka Sibīrijas pluma iespiešanās ietekmē arī Kuriļu-Kamčatkas reģionu kā kontinentālās Zemes garozas bloka beigu daļu, kas atrodas pluma spiediena ietekmē. Seismisko datu analīze Kamčatkas un Kuriļu salu

reģionā parāda ievērojamu M4,0+ zemestrīču skaita pieaugumu (72., 73. att.). Reģions ir daļa no Klusā okeāna uguns loka (74. att.) un attiecīgi demonstrē seismiskās aktivitātes pieauguma tendenci, kas atbilst šīs tektoniskās struktūras attīstībai. Tomēr lielākajai daļai seismiskās aktivitātes uzliesmojumu ir neatkarīgs raksturs. Tas var liecināt par to, ka Sibīrijas plums rada savu personīgo ietekmi uz Kamčatkas un Kuriļu salu reģionu.

**M4+ zemestrīču blīvums
Kamčatkas pussalā un Kuriļu salās**

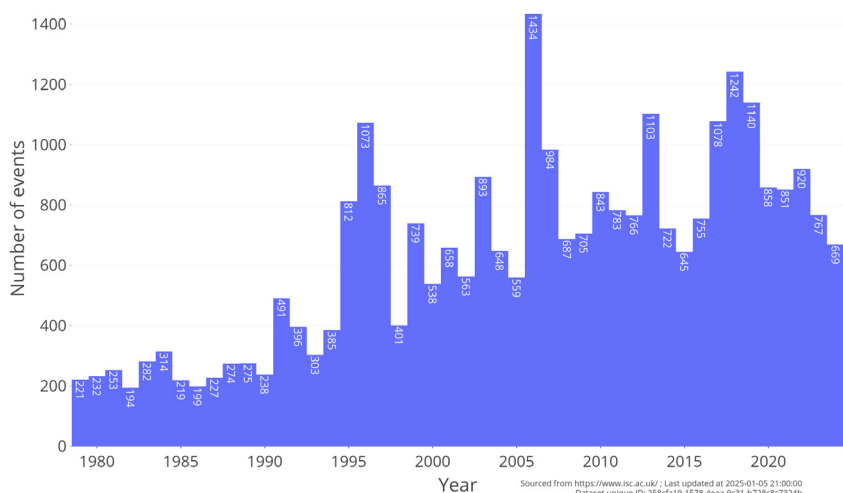


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

72. att.
**M4,0+ zemestrīču blīvums
Kamčatkas pussalas un Kuriļu
salu reģionā no 1979. līdz 2024.
gadam**

Datu avots: ISC

M4+ zemestrīces Kamčatkas pussalā un Kuriļu salās

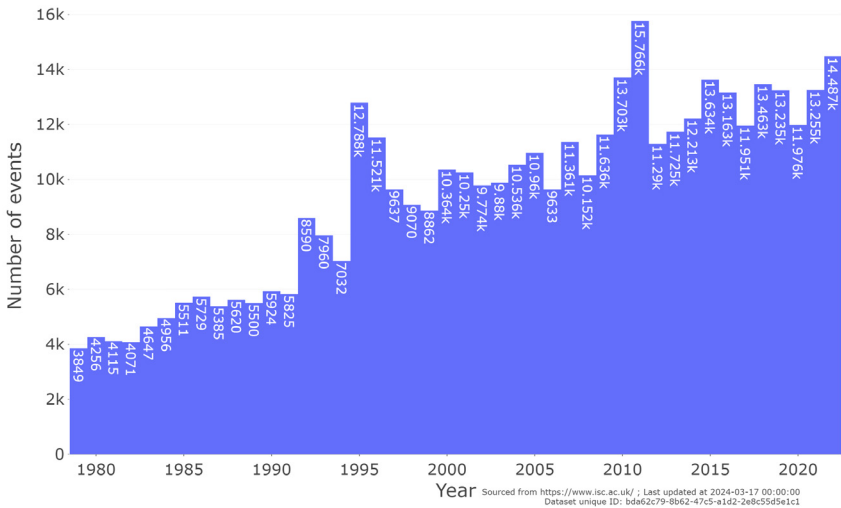


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

73. att.
**M4,0+ zemestrīču skaita
pieaugums Kamčatkas pussalas
un Kuriļu salu reģionā no 1979.
līdz 2024. gadam**

Datu avots: ISC

M4+ zemestrīces Uguns gredzenā 1979-2022



74. att.

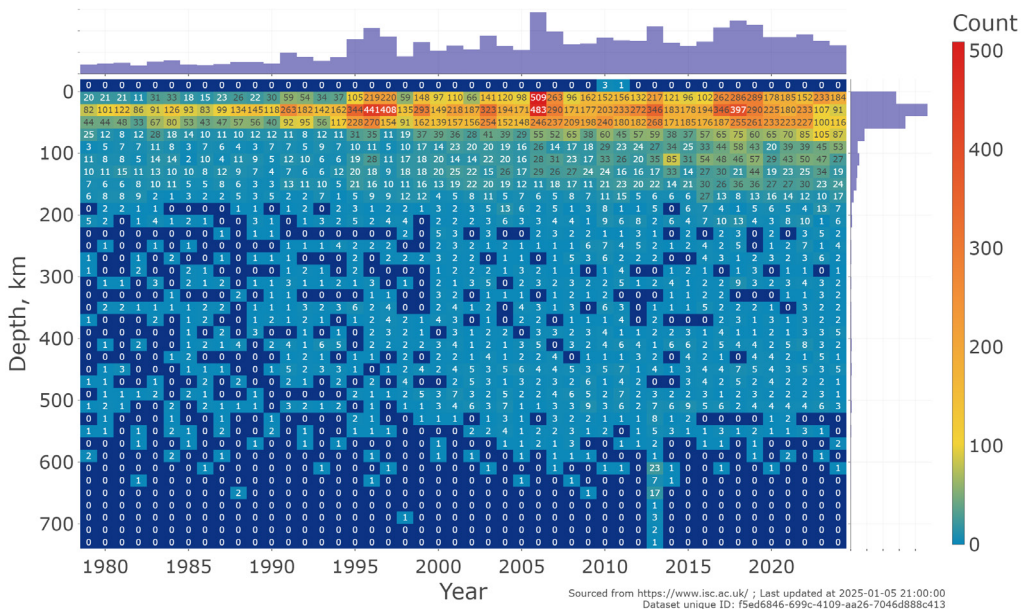
M4,0+ zemestrīču skaita pieaugums Klusā okeāna uguns loka reģionā no 1979. līdz 2022. gadam

Datu avots: ISC

Jāatzīmē, ka Kuriļu-Kamčatkas reģionā tiek novērots arī zemestrīču dziļuma pieaugums (75. att.). Tas liecina par to, ka litosfēras plātņu saskares zona kļūst kustīgāka Sibīrijas magmatiskā pluma ietekmē. Sagaidāms vulkāniskās aktivitātes pieaugums Kuriļu-Kamčatkas reģionā, kā arī

anomālijas, kas saistītas ar dziļās magmas strauju pacelšanos un strauju izvirdumu sastāva maiņu uz mafiskākām magmām. Šādu sastāva pāreju uz dziļākas izcelsmes magmu demonstrēja Bezimennija vulkāns savā 2017. gada izvirdumā.⁴⁵

M4+ zemestrīces Kamčatkas pussalā un Kuriļu salās



75. att.

M4,0+ zemestrīču sadalījums pēc dziļuma izvēlētajā poligonā Kamčatkas pussalā un Kuriļu salu reģionā no 1979. līdz 2024. gadam

Datu avots: ISC

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

Seismiskās aktivitātes, meža ugunsgrēku un vulkāniskās aktivitātes anomāliju pieaugums ir malu efekti paceļoties Zemes garozas Sibīrijas blokam, kas rodas Sibīrijas pluma iespiešanās ietekmē.

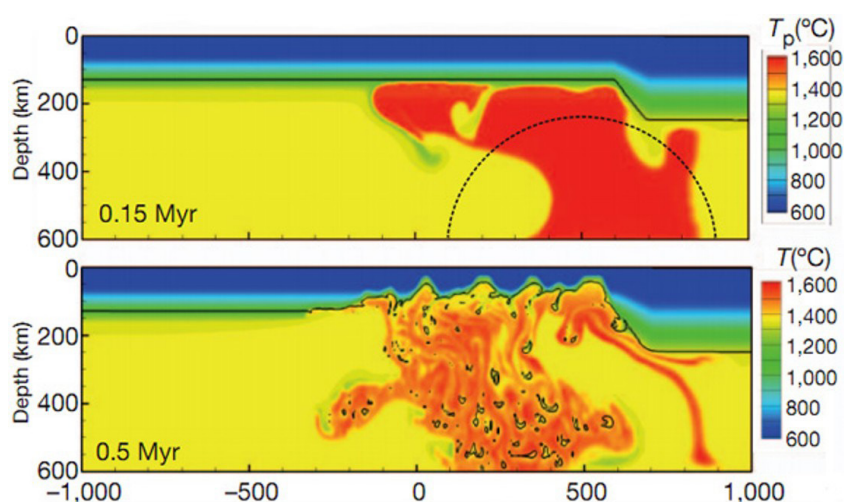
Seismiskās aktivitātes pieaugums ne tikai Sibīrijā, bet īpaši Rietumsibīrijas plātnes un Austrumsibīrijas kratona malās norāda, ka plātnes pacelšanās magmatiskā pluma spiediena ietekmē jau ir sākusies. Tas liecina par pluma vērienīgo un nozīmīgo ietekmi uz plātņi.

Tradicionālie modeļi pieņēma, ka mantijas plumi, paceļoties un uzsildot apkārtējos iežus, izraisa būtisku Zemes virsmas pacēlumu līdz pat 2 km augstumā, pirms notiek magmas

izlaušanās. Tomēr ģeoloģiskie pierādījumi šādam dramatiskam pacēlumam Sibīrijas trapu reģionā, kas radās magmatiskā pluma ietekmē pirms 250 miljoniem gadu, nav atrasti.

Balstoties uz Sibīrijas trapu magmatisko iežu izpēti, zinātnieki no Krievijas, Vācijas un Francijas institūtiem secināja,⁴⁶ ka plums nevis pacēla litosfēru kā burbuli, bet pakāpeniski to erodēja no apakšas (76. att.).

Kad erozija kontakta zonā starp pluma izkusušo materiālu un augšējās mantijas iežiem sasniedza 50 km dziļumu, sākās plaša mēroga lavas izplūde un izviridumi uz Zemes virsmas.



76. att.

Sibīrijas trapu veidošanās sākotnējo posmu rekonstrukcija

Vertikālā ass attēlo dziļumu (km). Dažādas krāsas apzīmē iežu temperatūru. Mantijas pluma sākotnējā virsotnes pozīcija ir attēlota ar punktētu pusloku. Plums tuvojas litosfēras apakšējai robežai (nepārtraukta melna līnija) un izplatās zem tās.

Apakšējā - pluma virsotne erozijas rezultātā (redzami litosfēras atlūzu nogrimšanas procesi) izlauzusi sev ceļu caur augšējo mantiju līdz Zemes garozai. Tas atbilst trapu magmatisma galvenās fāzes sākumam.

Avots: Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutsкая, N. A., Petrunin, A. G., Arndt, N. T., Radko, V. A., & Vasiliev, Y. R. (2011). Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. *Nature*, 477, 312-316. <https://www.nature.com/articles/nature10385>

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

Mūsdienu pluma aktivitāte, visticamāk, notiek pēc tāda paša mehānisma. Tādēļ nav sagaidāms būtisks virsmas pacēlums tikai vienā vietā pluma galvas intrūzijas rezultātā, taču šis mehānisms neizslēdz visas Austrumsibīrijas platformas plaša mēroga reģionālu pacelšanos nelielā apmērā. Saskaņā ar tektonofizisko modelēšanu pat šāds pacēlums var būt pietiekams, lai izraisītu magmas izlaušanos, kas spiediena ietekmē izraisīs izkusušo materiālu izplūdi uz virsmas, radot milzīgu katastrofu.

Paredzamā pluma galvas centra atrašanās vieta ir reģions uz ziemeļiem no Putoranas plato, aptuveni 225 km uz ziemeļaustrumiem no Noriļskas. Turklāt izlaušanās varētu skart visu plāno Rietumsibīrijas plātņi, kur, visticamāk, atkal atvērsies senās Zemes garozas šuves — rifti un dziļie lūzumi.

Sibīrijas pluma izvirduma neizbēgamības pamatojums

Mūsdienu Sibīrijas pluma magmas izlaušanās augstais risks pašreizējā periodā ir saistīts ar šādiem apstākļiem:

Pēdējos 30 gados Zeme piedzīvo pakāpenisku ģeofizisko anomāliju pieaugumu tiešu ārējo spēku ietekmes rezultātā, kas pastiprina siltumenerģiju planētas kodola tuvumā. Taču pašreizējā situācija ievērojami atšķiras no iepriekšējā perioda. **2024. gada beigās planēta iegāja pastiprinātas enerģētiskās ietekmes fāzē uz planētas kodolu. Aprēķini liecina, ka līdz 2030. gadam tiks sasniegts šīs fāzes maksimums.**

Kritisks faktors, kas saasina situāciju, ir globālais okeāna piesārņojums antropogēnās ietekmes dēļ, tostarp ar ogļūdeņražiem, mikroplastmasu un nanoplastmasu. Šis piesārņojums ir būtiski mainījis okeāna ūdens siltumvadītspēju, pasliktinot tā spēju efektīvi izkliedēt siltumu no Zemes dzīlēm. Vēsturiski okeāns ir darbojies kā galvenais planētas termoregulators, taču tagad ir zaudējis ievērojamu daļu savas siltumvadītspējas. Tā rezultātā mantijā notiek anomāla siltumenerģijas uzkrāšanās, kas izraisa tik intensīvu mantijas kušanu, kāda Zemes vēsturē vēl nav bijusi.

Ģeofiziskie pētījumi liecina par vēl nepieredzētu dziļfokusa zemestrīču skaita pieaugumu, kas ir tiešs aktīvas mantijas kušanas indikators. Izkausētā magma, palielinoties apjomā, rada milzīgu spiedienu uz Zemes garozu. Šo procesu var salīdzināt ar pakāpenisku gaisa balona piepūšanu — kādā brīdī spiediens pārsniegs

apvalka izturības robežu.

Sibīrijas reģions ir īpaši neaizsargāts pret šiem procesiem specifiskās ģeoloģiskās struktūras dēļ: tieši šeit paceļas spēcīgs magmatiskais plums — augšupejoša izkusušās mantijas vielas plūsma, ko izraisīja kodola nobīde šajā virzienā 1997.–1998. gadā. Temperatūras anomāliju pieaugums Sibīrijā liecina, ka magmas apjoms zem Sibīrijas kratona turpina pieaugt ģeometriskā progresijā. Pamatojoties uz ģeoloģiskajiem datiem un mūsdienu novērojumiem, ar lielu pārliecību var apgalvot, ka Sibīrijas plums atrodas kritiskā izvirduma gatavības fāzē.

Īpašas bažas rada fakts, ka vienlaikus ar Sibīrijas plumu kritiska situācija veidojas arī Marianas dziļvagag reģionā. Tā ir dziļākā vieta okeāna dzelmē, kur Zemes garoza ir visplānākā un visneaizsargātākā. Šajā reģionā arī novērojams izkusušās magmas pacēlums, ko pavada būtisks seismiskās aktivitātes pieaugums. Okeāna gultnes pārrāvuma draudi šajā vietā rada reālu planētas iznīcības scenāriju.

Pastāv divi iespējamie scenāriji. Pirmais ietver Sibīrijas pluma izvirdumu, kas jebkurā brīdī var notikt pieaugošā magmas spiediena dēļ. Otrais ietver pārrāvumu Marianas dziļvagā, kas var notikt pirms Sibīrijas katastrofas. Sibīrijas plums neizvirdīs, ja vispirms notiks Marianas dziļvagag pārrāvums.

Marsa ģeoloģiskā vēsture sniedz skarbu šāda scenārija seku piemēru — Marineras ieleja kalpo kā mēma šādas katastrofas lieciniece, kad pluma izvirdums zem okeāna noveda pie katastrofāliem rezultātiem visai planētai.

Saskaņā ar aprēķiniem, kuros ņemtas vērā pašreizējās ģeofiziskās aktivitātes pieauguma tendences, Marianas dziļvagas pārrāvuma kritiskā robeža var tikt sasniegta līdz 2036. gadam. Tomēr ir svarīgi saprast, ka šis termiņš ir nosacīts. Zemes garoza Sibīrijā var neizturēt pieaugošo spiedienu krietni agrāk. Ņemot vērā pašreizējo notikumu attīstību, Sibīrijas pluma izlaušanās vai Zemes garozas pārrāvums Marianas dziļvagā ir neizbēgams Zemes dzīlēs notiekošo procesu rezultāts. Vienīgā nenoteiktība ir precīzs

katastrofas laiks un vieta, bet ne pats tās tuvošanās fakts.

Aplūkosim trīs iespējamus notikumu attīstības scenārijus saistībā ar Sibīrijas plumu. Pirmais scenārijs — pēkšņs Sibīrijas pluma izvirdums. Notiks negaidīta un vienreizēja Sibīrijas pluma izlaušanās. Otrais scenārijs — pakāpenisks Sibīrijas pluma izvirdums. Lavas izvirdumi Sibīrijā notiks lēni un pakāpeniski, līdzīgi kā Sibīrijas trapu veidošanās procesā. Trešais scenārijs — plānota un kontrolēta degazācija. Šis scenārijs ir iespējams gadījumā, ja cilvēce veic nepieciešamos pasākumus, lai degazētu Sibīrijas pluma sekundārās magmatiskās kameras Zemes garozā.

1. scenārijs

Straujš Sibīrijas pluma izvirdums

Lai novērtētu iespējamus pēkšņa Sibīrijas pluma izvirduma radītos postījumus, var izmantot salīdzinošo metodi, balstoties uz ģeoloģiskās vēstures piemēriem. Tomēr ir svarīgi ņemt vērā, ka tādi apstākļi kā pašlaik uz Zemes nekad iepriekš tās vēsturē nav bijuši — īpaši spēcīgā 24 000 gadu cikla sakritība ar antropogēno piesārņojumu, kas ietekmē planētas galveno dzesēšanas sistēmu — okeānus. Šī iemesla dēļ pēkšņa Sibīrijas pluma izlaušanās tiek uzskatīta par visiespējamāko scenāriju, ja vien cilvēce neveiks nekādus pasākumus šī izvirduma riska mazināšanai.

Lai novērtētu vulkānu izvirdumu jaudu, tiek

izmantots izsviestā materiāla apjoms. Piemēram, viens no spēcīgākajiem Jeloustonas supervulkāna izvirdumiem, kas notika pirms 2,1 miljona gadu, izmeta aptuveni 2 500 km³ magmas, kā ir noskaidrots, pētot tufa nogulumus Ziemeļamerikā.⁴⁷ Šī izvirduma laikā pelnu un gāzu izmeši pacēlās 50 km augstumā, sasniedzot augšējo stratosfēras robežu. Mēroga ziņā tas bija līdzvērtīgs Tobas supervulkāna izvirdumam Sumatras salā, kas notika pirms aptuveni 72 000–74 000 gadu un bija visspēcīgākais izvirdums 25 miljonu gadu laikā.

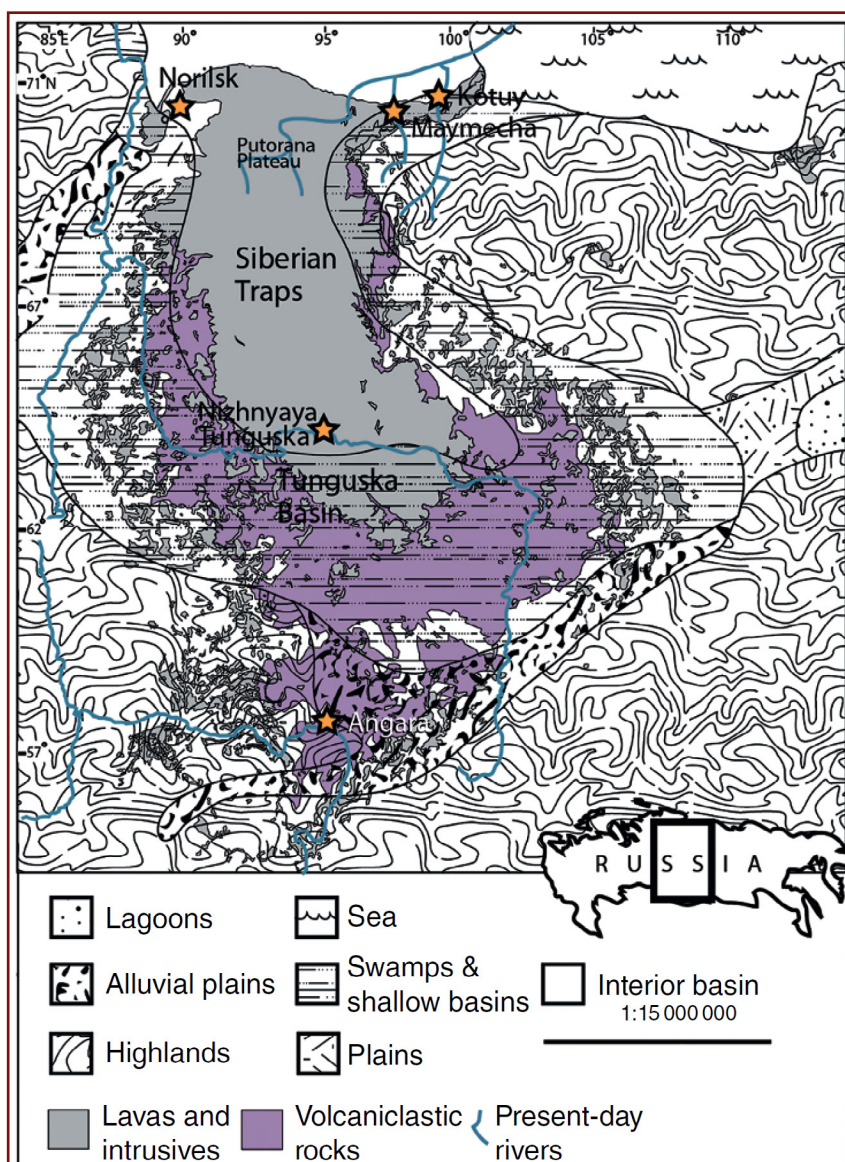
⁴⁷ Swallow, E. J., Wilson, C. J. N., Charlier, B. L. A., & Gamble, J. A. (2019). The Huckleberry Ridge Tuff, Yellowstone: evacuation of multiple magmatic systems in a complex episodic eruption. *Journal of Petrology*, 60, 1371-1426. <https://doi.org/10.1093/petrology/egz034>

Sibīrijas trapu izvirdumu laikā, kas notika aptuveni pirms 250 miljoniem gadu, izsviestā materiāla apjoms pēc dažādām aplēsēm sasniedza 3 līdz 4 miljonus km³ lavas un tufu⁴⁸ (77. att.).

Tas nozīmē, ka Sibīrijas trapu izvirdums bija 1 000 reižu lielāks pēc izsviestā materiāla apjoma nekā spēcīgākais Jeloustonas kalderas vai Tobas

supervulkāna izvirdums.

Ņemot vērā pēkšņo potenciālā Sibīrijas pluma izvirduma raksturu, tā aktivizācija varētu izraisīt notikumu, kura jauda 1 000 reižu pārsniegtu šos vēsturiskos izvirdumus, piemēram, Jeloustonas kalderas vai Tobas supervulkāna izvirdumus.



77. att.
Sibīrijas trapu paleoģeogrāfiskā karte, kas parāda galveno vulkānoklastisko izvirdumu un teritoriju mērogus. Pēc Maliča u.c. (1974), Polozova u.c. (2010), Black u.c. (2015) datiem, ar vienkāršotu vēlā perma paleoģeogrāfiju, pielāgotu no Czamanske et al. (1998)

Avots: 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>

Tiek pieņemts, ka gadījumā, ja notiks vienlaicīgs Sibīrijas pluma pārrāvums, izvirdumam būs eksplozīvs raksturs, kas izveidos vienu kalderu. Saskaņā ar hipotēzi sagaidāms, ka Sibīrijas pluma izrāviena rezultātā radusies kaldera būs aptuveni 75 000 km² liela ar 150 km rādiusu (vai, piemēram, 380 km reiz 250 km). Sibīrijas trapu izvirdumu laikā pirms 250 miljoniem gadu ar lavu pārklātās teritorijas platība, pēc literatūras datiem,⁴⁹ bija no 4 līdz 7 miljoniem km².⁵⁰ Tāda paša mēroga teritorijas var tikt skartas arī šī izvirduma gadījumā.

Uzskats, ka lavas straumes ir visbīstamākās vulkāniskās parādības, ir kļūdaini. Patiesībā pelni bieži kļūst par galveno nāvējošo seku cēloni. Supervulkāniem, kuriem raksturīga augsta eksplozivitāte, nozīmīga daļa magmas nepaspēj pārtapt lavā. Tā vietā magma eksplozijas laikā fragmentējas, radot milzīgu daudzumu sīku vulkānisko pelnu daļiņu — sakarsētas, asu un robainu iežu drumslas, kas izplatās atmosfērā. Ieelpojot šos pelnus, cilvēka plaušās veidojas cementam līdzīgs maisījums, kas noved pie nenovēršamas nāves.

Tiek pieņemts, ka Sibīrijas pluma izvirduma laikā šādu sakarsētu pelnu izplatīšanās rādiuss būs aptuveni 9000 km, kas nozīmē, ka tie pārklās apmēram 255 miljonus km² lielu teritoriju. Tā kā visas Zemes virsmas platība ir nedaudz vairāk nekā 510 miljoni km², tad elpošanai kaitīgo pelnu skartais rādiuss aptvers pusi planētas — šī teritorija veidos aptuveni 50% no Zemes virsmas.

Tādējādi pēkšņa Sibīrijas pluma izrāviena gadījumā ir sagaidāmas trīs nāvējošas zonas.

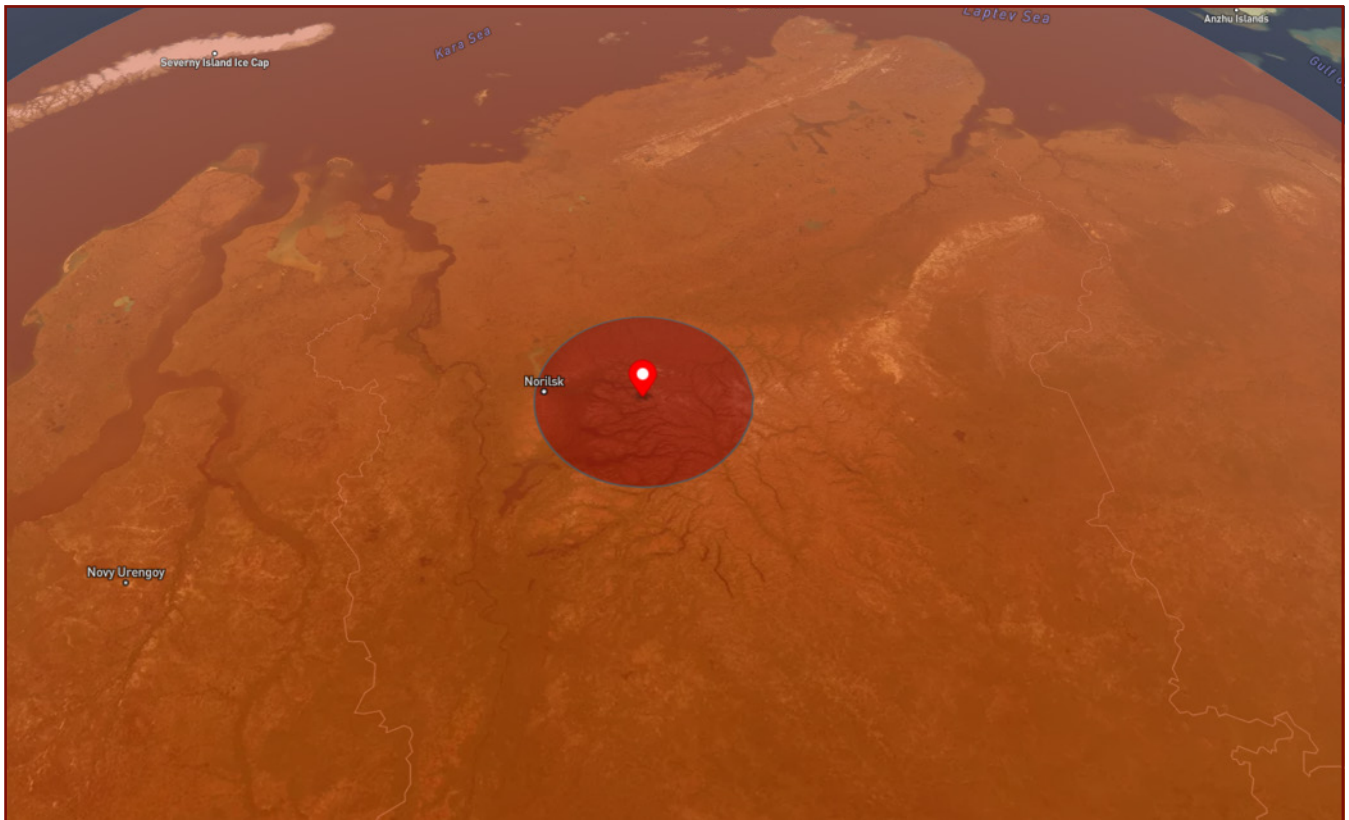
Pirmā (centrālā) ietekmes zona ir 150 km rādiusa apgabals ar centru Putoranas plato ziemeļrietumu daļā, kur paredzama kalderas izveidošanās (78. att.). Šajā zonā ietilpst Krasnojarskas novada pilsētas Noriļska, Dudinka un Talnaha. Pluma aktivizācijas gadījumā šajā zonā notiks tūlītēja visu objektu iznīcināšana triecienviļņa un sakarsētu piroklastisko plūsmu ietekmē jau izvirduma sākuma fāzē.

Otrā ietekmes zona (ar 1500 km rādiusu) ir teritorija, kurā izplatīsies lava un smagie vulkāniskie materiāli (79. att.). Tā aptvers plašas teritorijas Ziemeļsibīrijā, ieskaitot Jamalas-Ņencu autonomo apvidu, Taimiras pussalu, daļu no Hantu-Mansu autonomā apvidus, Krasnojarskas novada ziemeļus, Jakutijas rietumu daļu, Krievijas Eiropas daļas ziemeļaustrumus. Šajā zonā ietilpst tādas lielās pilsētas kā Igarka, Novijurengoja, Nadima, Saleharda, Vorkuta, Narjanmara, Mirnija, Kogalima, Ņesosibiriska, Surguta, Krasnojarska, Hantimansijska, Tomska, Ņižņevartovska.

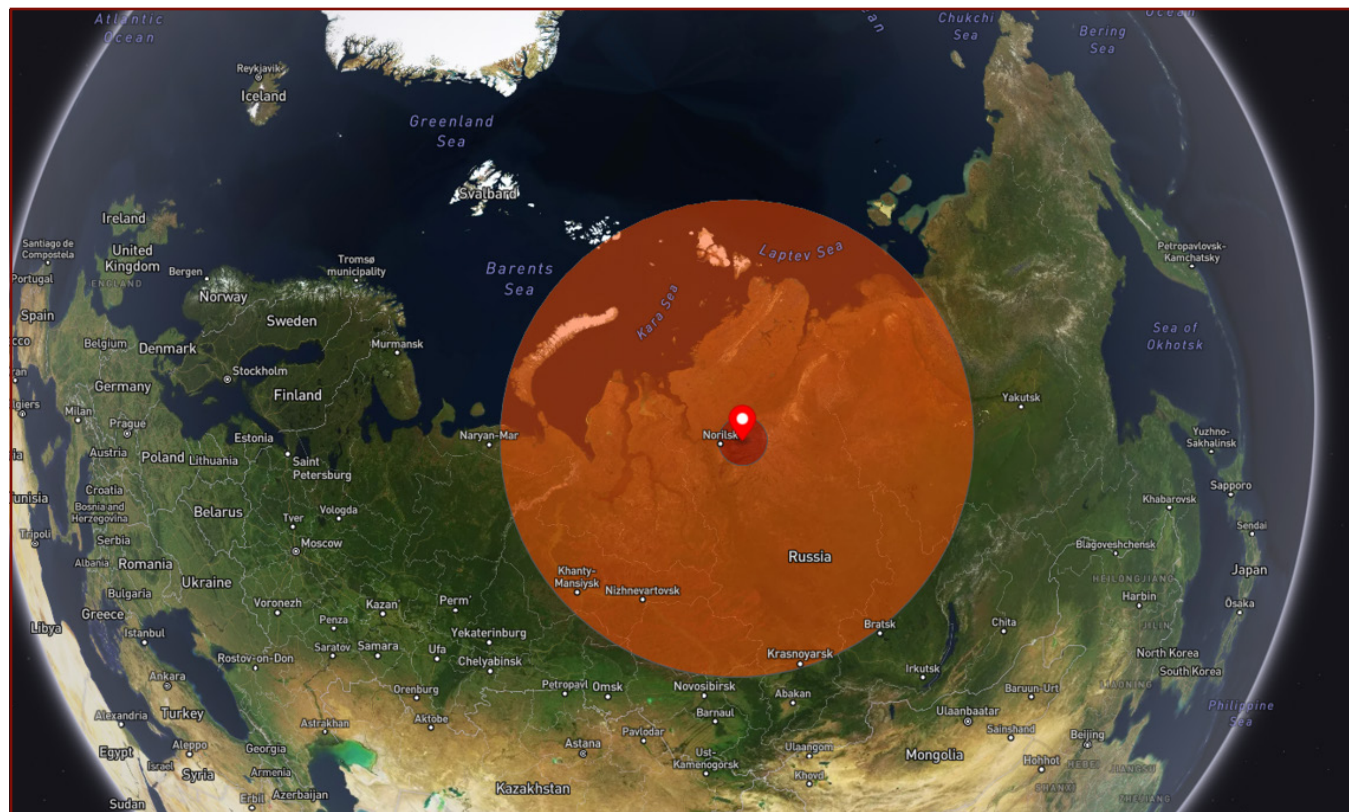
Izvirduma pirmajās stundās šo teritoriju lielā ātrumā (līdz 700 km/h) sasniegs sakarsētu gāzu, pelnu un lavas plūsmas. Šīs straumes iznīcinās visu dzīvo un pārklās teritoriju ar biezu vulkānisko materiālu slāni, kas apraks zem sevis pilsētas un dabas resursus.

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>

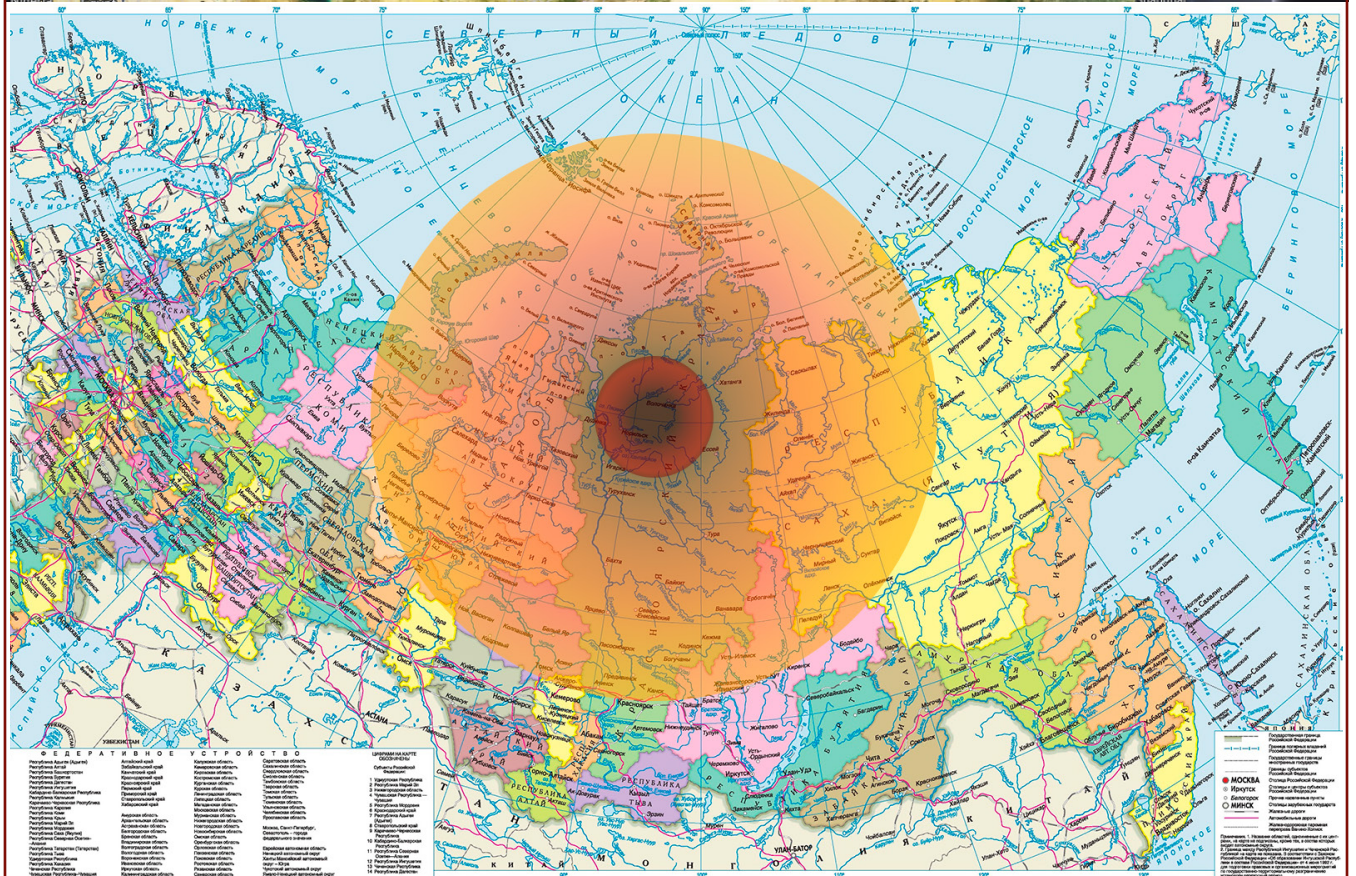
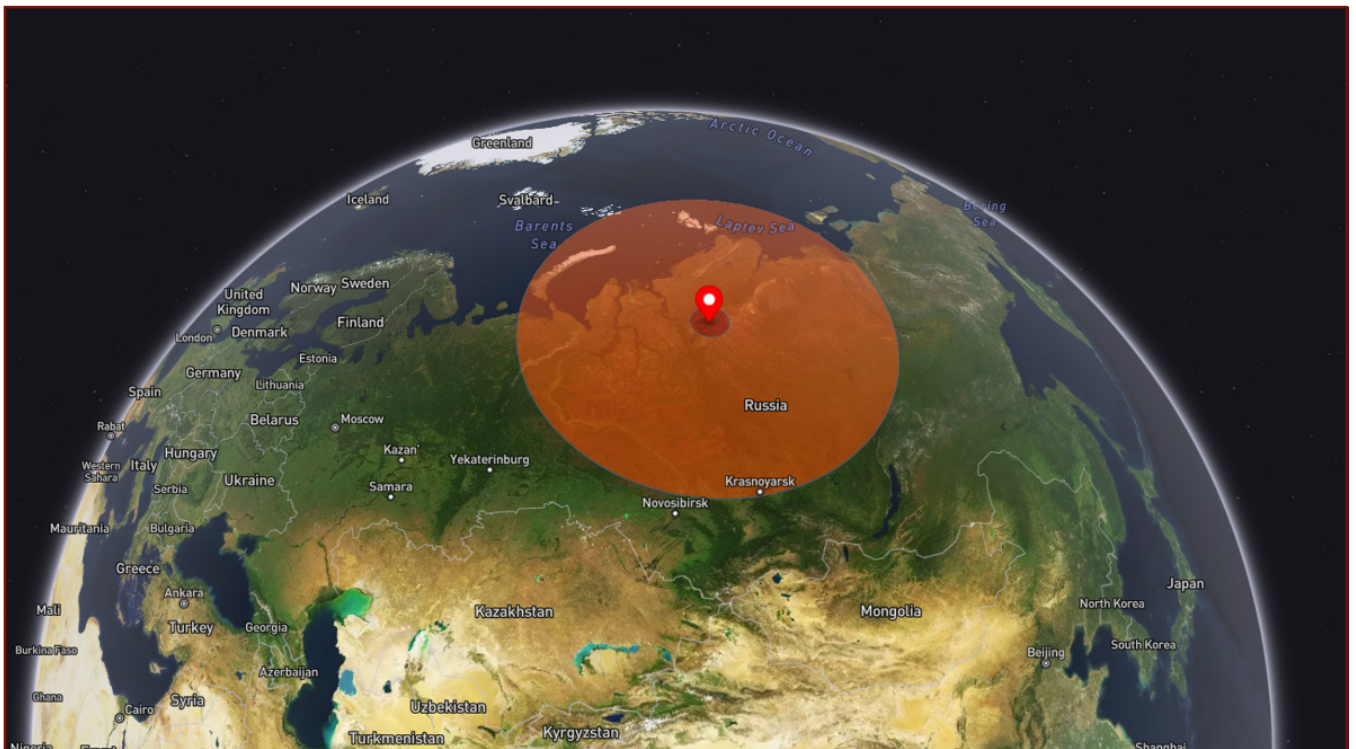
⁵⁰ Ivanov, A.V., He, H., Yan, L., Ryabov, V.V., Shevko, A.Y., Palesskii, S.V., Nikolaeva, I.V., 2013. Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism. *Earth-Science Reviews*,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



78. att.
 Ar sarkanu parādīta kalderas veidošanās zona ar rādiusu aptuveni 150 km



79. att.
 Ar oranžu krāsu parādīta lavas izplūšanas un smago piroklastisko frakciju izmešu zona – aptuvenais rādiuss ap 1500 km



79. att.

Ar oranžu krāsu parādīta lavas izplūšanas un smago piroklastisko frakciju izmešu zona – aptuvenais rādiuss ap 1500 km

Trešā ietekmes zona ar aptuveni 9 000 km rādiusu ietver smalko piroklastisko materiālu un vulkānisko pelnu izkliedes apgabalu, aptverot aptuveni 50% Zemes virsmas (80. att.).

Sākotnējā posmā (pirmajās 24 stundās pēc izvirduma) pelnu nogulsnes galvenokārt skars Krievijas Federācijas, kontinentālās Āzijas,

Eiropas, Arābijas pussalas, Ziemeļāfrikas un Ziemeļamerikas teritorijas. Turpmāko 7–10 dienu laikā pelnu masas, visticamāk, izplatīsies uz Austrāliju, Dienvidameriku un Antarktīdu.



80. att.

Ar dzeltenu krāsu parādīts smalko vulkānisko pelnu izplatības apgabals — rādiuss aptuveni 9000 km



80. att.

Ar dzeltenu krāsu parādīts smalko vulkānisko pelnu izplatības apgabals — rādiuss aptuveni 9000 km

Pētījumi par ģeoloģiskajiem procesiem liecina, ka Sibīrijas pluma aktivizācija izraisīs virkni papildu katastrofisku parādību. Ir paredzama spēcīga triecienviļņa rašanās, ārkārtīgi spēcīgas zemestrīces (ar magnitūdu aptuveni 10), postoši cunami un iespējama citu lielu vulkānisko sistēmu aktivizēšanās uz Zemes. Izvirduma laikā atbrīvotā enerģija var izraisīt ķēdes reakciju, kas novedīs pie supervulkānu un lielu vulkānisko apgabalu aktivizēšanās uz visas planētas. Šie secinājumi balstās uz matemātiskiem aprēķiniem par

enerģētiskajiem procesiem un to ietekmi uz Zemes garozu.

Tālāk aplūkosim papildu riska faktorus, kas apdraud cilvēci pēkšņa Sibīrijas pluma izvirduma rezultātā.

Triecienvilnis

Saskaņā ar publiski pieejamiem datiem, Jeloustounas supervulkāna izvirdums var atbrīvot aptuveni 900 000 megatonnas enerģijas un izraisīt zemestrīci ar 11,2 magnitūdu. Tā kā magnitūdu skala ir logaritmiska (katrs pieaugums par vienu vienību nozīmē enerģijas pieaugumu 32 reizes), tad Sibīrijas pluma izvirdums, kas ir 1000 reizes spēcīgāks par Jeloustounu, var izraisīt zemestrīci ar 13,2 magnitūdu. Tas būtu 350 000 reizes spēcīgāk par visu laiku stiprāko reģistrēto zemestrīci – Lielo Čīles zemestrīci (9,5 magnitūda, 1960. gads) – un būtu salīdzināms ar liela asteroīda triecienu.

Izvirduma laikā atbrīvotā enerģija aptuveni 10^{24} J apjomā radīs ārkārtīgi spēcīgu triecienvilni globālā mērogā. Izvirduma centrā spiediens būs tik augsts, ka ieži acumirkļi iztvaikos un tiks izmesti augšējos atmosfēras slāņos. Virsskaņas triecienvilnis dažu minūšu laikā izraisīs postījumus tūkstošiem kilometru attālumā, līdzīgi kā

Tunguskas meteorīta sprādzienā, taču daudzkārt stiprāk.

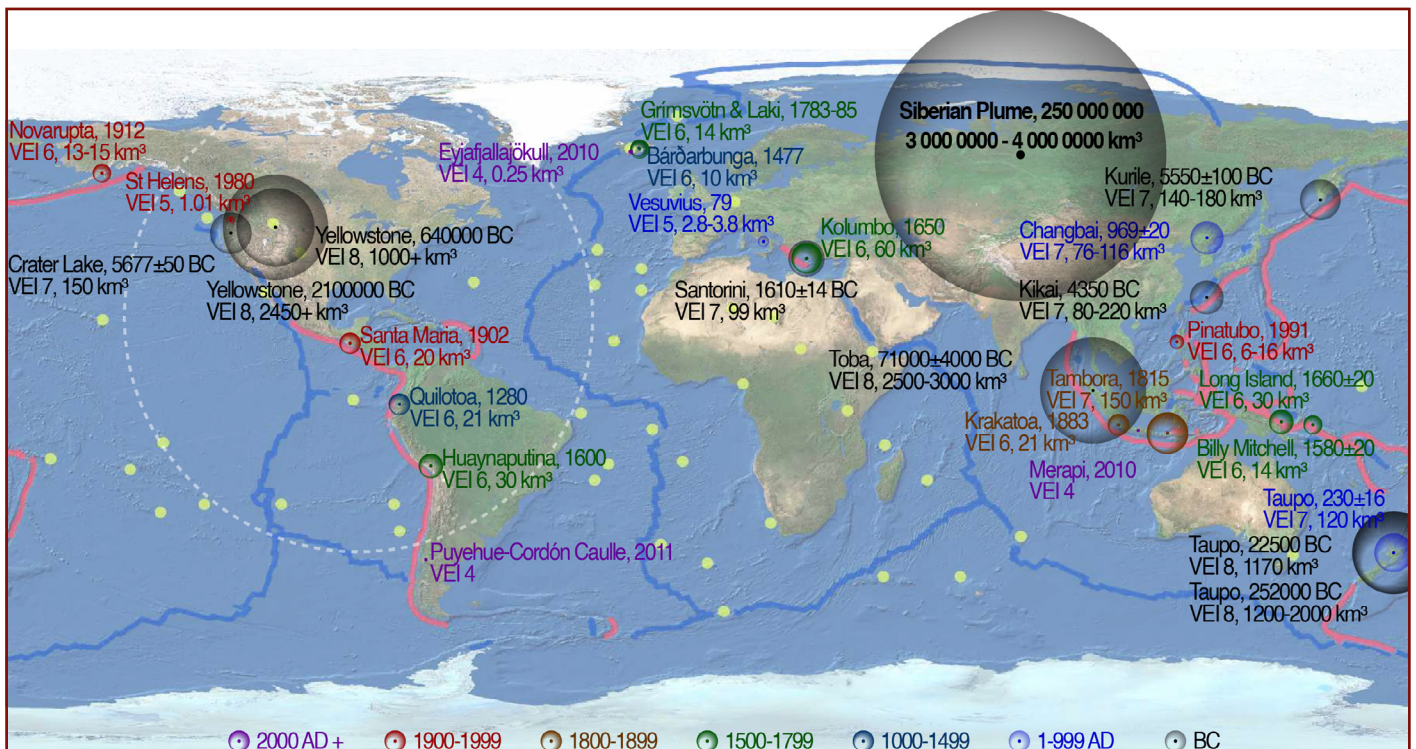
Sibīrijas taigā izcelsies plaši ugunsgrēki, un milzīgas teritorijas tiks pārklātas ar biezu vulkānisko pelnu slāni. Notiks strauja mūžīgā sasaluma izkušana tūkstošiem kilometru platībā, atbrīvojot ievērojamu daudzumu siltumnīcefekta gāzu. Ģeogrāfiskā ainava piedzīvos plašus postījumus, aktivizējoties Zemes garozas lūzumiem. Seismiskie viļņi izplatīsies pa visu planētu, izraisot jaunas zemestrīces, kas pārsniegs 10 magnitūdas.

Ziemeļu Ledus okeānā veidosies gigantiski cunami, kuru augstums sasniegs simtiem metru, apdraudot Krievijas, Kanādas, Grenlandes un Skandināvijas piekrastes. Sekundārie cunami skars Indonēzijas, Japānas, Austrālijas, Ziemeļamerikas un Dienvidamerikas krastus. Globālie atmosfēras traucējumi veicinās īpaši spēcīgu viesuļu un vētru rašanos.

Supervulkānu un vulkānisko sistēmu aktivizēšanās

Seismiskie viļņi no izvirduma izplatīsies ne tikai pa gaisu un Zemes virsmu, bet arī dziļi mantijā. Tā kā visi supervulkāni ir savstarpēji saistīti pa izkusušajiem mantijas slāņiem, tik spēcīgi seismiskie viļņi no Sibīrijas pluma izvirduma, visticamāk, jau pirmajās 24 stundās (81. att.) izraisīs citu supervulkānu ķēdes reakcijas

izvirdumus. Ir sagaidāma lielāko vulkānisko sistēmu aktivizēšanās, tostarp Jeloustonas un Longvelli kalderas (Ziemeļamerikā), Flegras lauku (Apenīnu pussalā), Tobas (Zundu arhipelāgā), Airas (Japānas salās) un Taupo vulkāniskā kompleksa (Jaunzēlandē).



81. att.

Karte attēlo pasaules lielāko vulkānisko izvirdumu izplatību, klasificējot tos pēc ģeoloģiskajiem periodiem no pirmskembrija līdz mūsdienām

Simbolu izmērs ir proporcionāls izvirduma materiāla apjomam (km³). Kartē izcelta hronoloģiskā izvirdumu secība ar vulkāniskās eksplozivitātes indeksu (VEI) ≥ 4, īpaši uzsvērt tādus notikumus kā Toba (71 000 ± 4 000 g. p.m.ē., 2 500–3 000 km³), Jeloustonas (640 000 g. p.m.ē., >1 000 km³) un Tamboras (1815. g., 150 km³) izvirdumi. Tamlīdzīgi izvirdumi ir sagaidāmi arī Sibīrijas pluma sprādziena gadījumā, kas būs lielākais notikums (3–4 miljoni km³). Sarkanās līnijas kartē apzīmē tektonisko plātņu robežas, parādot telpisko korelāciju ar lielāko izvirdumu atrašanās vietām.

Papildus supervulkānu izvirdumiem, visticamāk, sāksies daudzu vulkānu izvirdumi, kas atrodas gar Klusā okeāna uguns loku un citās seismiski aktīvās zonās. Pastāv augsta iespējamība, ka atjaunosies tādu vulkānu aktivitāte kā Fudzijama (Japāna), Krakatau un Merapi (Indonēzija), Vezuvs un Etna (Itālija), Popokatepetls (Meksika), Kamčatkas vulkānu grupas, Andu un Aļaskas vulkāniskās joslas, kā arī zemledus vulkāniskās sistēmas

Rietumantarktīdā.

Iespējama arī neaktīvo vulkānisko struktūru reaktivācija, tādu kā stratovulkāns Ararats (Anatolijas plakankalnē), Kilimandžāro un Niragongo (Austrumāfrikas rifta sistēmā), Elbrusa vulkāniskais masīvs (Kaukāza reģionā), Lāhera ezera vulkāns (Centrāleiropā) un Arābijas pussalas vulkāniskais centrs.

Skābie lieti

Katastrofālie vulkānisko pelnu un sēra dioksīda izmeši izvirduma rezultātā novedīs pie tā, ka nokrišņi visā planētā pārvērtīsies par skābajiem lieti. Lai ilustrētu izmešu apjomu, var atsaukties uz Jeloustounas supervulkāna izvirdumu pirms 630 000 gadu, kad atmosfērā tika izsviestas aptuveni 500 megatonnas sēra dioksīda. Mērogojot šos datus, ņemot vērā hipotētiskā Sibīrijas pluma izvirduma jaudu, var pieņemt, ka sēra dioksīda izmešu apjoms sasniegtu aptuveni 1 500 000 megatonnas (jeb $1,5 \times 10^{12}$ tonnas), kas aptuveni miljons reižu pārsniedz Tamboras izvirduma izmešus 1815. gadā ("gads bez vasaras"). Jāuzsver, ka šis aprēķins neietver citu vulkānu izmešus, kas var aktivizēties ķēdes reakcijas rezultātā.

Šāda sēra dioksīda izmešu koncentrācija izraisīs globālu aerosola daļiņu rašanos stratosfērā, kuras pakāpeniski tiktu izskalotas no atmosfēras vairāku desmitgažu laikā skābo lietu veidā. Galvenais skābo nokrišņu periods, pēc prognozēm, ilgs no 3 līdz 10 gadiem atkarībā no klimata procesiem un vielu cirkulācijas atmosfērā. Reģionos, kas atrodas tuvāk šo izmešu epicentram, piemēram, mūsdienu Sibīrijas teritorijā, būs nokrišņi ar pH līmeni zem 1,5, kas ir līdzvērtīgi atšķaidītai sērskābei.

Tas izraisīs veģetācijas bojāeju, tostarp

sakņu sistēmu, lapotnes un zaru bojāeju, kā arī minerālu izskalošanos no augsnes, padarot to nepiemērotu dzīvības uzturēšanai. Ūdens ekosistēmas piedzīvos strauju paskābināšanos: ūdenstilpnes pārvērtīsies par skābiem ezeriem ar pH līmeni 2–3, kas padarīs tos toksiskus lielākajai daļai dzīvības formu.

Papildus tam skābe, kas nonāks ūdensapgādes sistēmās, padarīs dzeramo ūdeni nederīgu lietošanai bez sarežģītas filtrācijas. Infrastruktūra, ieskaitot ēkas, kas būvētas no cementa, marmora un metāliem, tiks pakļauta paātrinātai korozijai sulfātu savienojumu ietekmē.

Tomēr maksimālā skābo lietu koncentrācija saglabāsies tikai pirmajos mēnešos pēc izvirduma, pēc tam nokrišņi pakāpeniski lokalizēsies noteiktos reģionos. Iestājoties vulkāniskajai ziemei, lielākā daļa nokrišņu pārvērtīsies sniegā, kas samazinās skābes slodzi uz ekosistēmām, taču līdz tam laikam skābo nokrišņu izraisītie globālie floras un faunas postījumi jau būs neatgriezeniski.

Ekosistēmām nodarītais kaitējums būtiski ietekmēs dabiskos un antropogēnos procesus ilgi pirms globālās atdzišanas sākuma.

Vulkāniskā ziema

Kopējā Sibīrijas pluma izvirduma ietekme, ko pastiprinās vienlaicīga daudzu vulkānu aktivizācija, radīs milzīgu, katastrofisku efektu, kas izpaudīsies globālās klimata un ekoloģiskās sistēmas izmaiņās. Masveida vulkānisko pelnu, gāzu (īpaši sēra dioksīda — SO_2) un aerosolu izmeši atmosfērā radīs nepārvaramu barjeru Saules starojumam uz vairākām desmitgadēm.

Augsta sulfātu aerosolu koncentrācija stratosfērā atstaros lielāko daļu Saules radiācijas, izraisot planētas enerģētiskā līdzsvara traucējumus. Sagaidāms straujš ienākošā siltuma samazinājums, kas novedīs pie ekstremālas klimata atdzišanas — stāvokļa, ko var raksturot kā “hipervulkānisko ziemu”. Šo procesu rezultātā Zeme pārvērtīsies par “ledus lodi”, kur dzīvības uzturēšanai piemēroti apstākļi saglabāsies tikai ierobežotos reģionos, galvenokārt ekvatoriālajā zonā.

Iespējamās ietekmes novērtējumi balstās uz vēsturiskiem datiem par nozīmīgiem izvirdumiem. Piemēram, Jeloustounas maksimālā izvirduma laikā pirms 2,1 miljona gadu globālā temperatūra pazeminājās vidēji par 3–5°C. Saskaņā ar aprēķiniem, Sibīrijas pluma izvirduma laikā, kura mērogs daudzkārt pārsniedz minēto notikumu, vidējā Zemes temperatūra samazināsies par aptuveni 24–31°C.

Polārajos reģionos temperatūras kritums sasniegs 28–36°C un vairāk, kas novedīs pie pilnīgas lielāko ūdenstilpju sasalšanas, tostarp

Ziemeļatlantijas un ievērojamas Klusā okeāna daļas. Vidējos platumu grādos temperatūra pazemināsies par 24–31°C, kas iznīcinās visu veģetāciju un izraisīs masveida dzīvo organismu bojāeju.

Okeāna ekosistēmas strauji ies bojā. Sasalšana sāksies no okeāna virsmas un piekrastes zonām, izraisot jūras biotas izzušanu globālā mērogā. Ekvatoriālajos reģionos temperatūra pazemināsies par 20–27°C, padarot pat tropu zonas pārāk aukstas, lai tajās varētu pastāvēt dzīvība.

Praktiski visas sauszemes teritorijas kļūs neauglīgas globālā aukstuma, tumsas un fotosintēzes apstāšanās dēļ. Barības ķēdes tiks iznīcinātas, izraisot lauksaimniecības sabrukumu, masveida floras, faunas un ievērojamas cilvēces daļas izmiršanu. Dzīvotspējīgas paliks tikai atsevišķas mikrobu ekosistēmas, kas pielāgojušās ekstremāliem apstākļiem.

Sulfātu aerosoli, kas ilgstoši atradīsies stratosfērā, turpinās bloķēt saules gaismu vairāku desmitgažu garumā. Taču “hipervulkāniskās ziemas” sekas būs jūtamas ievērojami ilgāk. Pat pēc tam, kad pelni un aerosoli būs nosēdušies, planētai būs nepieciešami simti vai pat tūkstoši gadu, lai atjaunotu dabisko klimata un ekoloģisko līdzsvaru, ņemot vērā okeānu sasalšanu, ledāju veidošanos un radikālās izmaiņas biosfērā.

Secinājumi par 1. scenāriju: Sibīrijas pluma izvirdums

Straujš Sibīrijas pluma izvirdums kļūs par katastrofālu ģeoloģisku un klimatisku notikumu, izraisot globālas izmaiņas atmosfērā, hidrosfērā un biosfērā. Spēcīgs sprādziens Putoranas plakankalnē acumirkļi iznīcinās visu 150 km rādiusā, izveidojot gigantisku kalderu, savukārt piroklastiskie plūdi un lava aptvers teritoriju 1500 km rādiusā, pārvēršot Sibīriju izdedzinātā tuksnesī. Puse no planētas virsmas tiks pārklāta ar vulkānisko pelnu slāni.

Zemestrīce ar magnitūdu līdz pat 13,2 magnitūdu, ko izraisīs pluma eksplozija, radīs postošus seismiskos viļņus, kas izplatīsies pa visu planētu, aktivizējot lūzumu līnijas, sekundāras zemestrīces un simtiem metru augstus megacunami, kas applūdinās kontinentu piekrastes zonas.

1,5 miljoni megatonnu sēra dioksīda (SO₂) izmešu izraisīs skābos lietus ar pH zem 1,5, kas iznīcinās augsni, veģetāciju un ūdens ekosistēmas. Ūdenstilpnes kļūs nepiemērotas dzīvošanai, bet sauszeme ātri zaudēs auglību. Fotosintēzes un barības ķēžu sabrukums izraisīs masveida floras, faunas un, attiecīgi, cilvēciskās

civilizācijas izmiršanu.

Masveida supervulkānu aktivizācija, tostarp Jeloustounas, Kampi Flegrei un Tobas, pastiprinās globālās klimata izmaiņas, palielinot vulkānisko pelnu, sēra dioksīda (SO₂) un aerosolu izmešus. To uzkrāšanās stratosfērā bloķēs saules gaismu, izraisot planētas atdzišanu (“hipervulkānisko ziemu”) un temperatūras pazemināšanos par vairākiem desmitiem grādu. Polārajos reģionos temperatūra pazemināsies par 28–36°C, mērenajos platuma grādos par 24–31°C, bet tropu reģionos par 20–27°C, kas izraisīs okeānu sasalšanu, okeāniskās cirkulācijas apstāšanos, ekosistēmu sabrukumu un gigantisku ledāju veidošanos uz sauszemes.

“Hipervulkāniskās ziemas” ietekme padarīs Zemi praktiski neapdzīvojamu, un dabisko apstākļu atjaunošanās prasīs no tūkstošiem līdz miljoniem gadu. Šis notikums kļūs par lielāko izmiršanu Zemes ģeoloģiskajā vēsturē.

2. scenārijs

Pakāpenisks Sibīrijas pluma izvirdums

Otrais Sibīrijas pluma izvirduma scenārijs paredz nevis pēkšņu sprādzienu, bet pakāpenisku izvirdumu sēriju ar gāzu un lavas straumju izplūšanu pa Zemes garozas plaisām un novājinātajām zonām. Šo procesu var salīdzināt ar Sibīrijas trapu veidošanos, kas notika perma perioda beigās pirms 250 miljoniem gadu tajā pašā reģionā.

Sibīrijas trapu provinču rašanās iezīmēja lielāko sauszemes vulkānisma izpausmi. Šajā laikā Zeme piedzīvoja lielāko ekoloģisko

katastrofu savā vēsturē – perma-triasa sugu masveida izmiršanu, kuras laikā izzuda līdz 90% jūras un 70% sauszemes sugu (82., 83. att.).

Ģeoloģiskie dati⁵¹ liecina, ka Sibīrijas izvirdumi Austrumsibīrijas kratona teritorijā varēja būt ārkārtīgi eksplozīvi (Campbell et al., 1992), bet piroklastisko nogulumu biezums sasniedza 800 metrus (Khain, 1985). Sprādziena jauda bija tik liela, ka no Zemes dzīlēm dažkārt tika izsviesti nogulumieži pat no 10 km dziļuma.



82. att. Māksliniecisks Sibīrijas izvirdumu attēlojums perma-triasa sugu izmiršanas laikā

Ilustrācija: Tigran Nshanyan

83. att. Māksliniecisks attēlojums: listrozauri, kas pārdzīvoja masveida izmiršanu, dominē izpostītajā ainavā, ilustrējot ekosistēmas izmaiņas pēc perma-triasa krīzes

Ilustrācija: Hulio Laseda (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>

Vulkāniskā aktivitāte reģionā norisinājās vairākos etapos, radikāli izmainot ģeoloģisko ainavu. Sākotnēji magma iekļuva nogulumiežu slāņos, veidojot dažādus intruzīvus ķermeņus, piemēram, sillas. Pēc tam izvirdumu raksturs kļuva eksplozīvs, izraisot milzīga daudzuma piroklastiskā materiāla izsviešanu un biezu vulkānisko nogulumu veidošanos. Šī procesa kulminācija bija vērīnīga bazalta lavas izlīšana, kuras apjoms sasniedza simtiem tūkstošu kubikkilometru. Kopējais vulkānisko iežu apjoms, ieskaitot intrūzijas, piroklastiskos nogulumus un lavas plūsmas, tiek lēsts aptuveni 3 miljonu km³ apmērā. Svarīgi atzīmēt, ka šis skaitlis atspoguļo tikai līdz mūsdienām saglabājušos iežus, un var droši apgalvot, ka sākotnējie izvirdumu mērogi bija ievērojami lielāki, taču vēlāk tie tika pakļauti erozijai.

Sibīrijas trapu veidošanās izraisīja milzīgus oglekļa dioksīda (CO₂), sēra dioksīda (SO₂), ūdeņraža hlorīda (HCl) un citu gaistošo vielu izmešus. Šie gāzu izmeši strauji pastiprināja siltumnīcas efektu un pēc vulkāniskās ziemas izraisīja strauju klimata sasilšanu. CO₂ koncentrācija atmosfērā sasniedza 8000 ppm, kas 20 reizes pārsniedz mūsdienu līmeni. Tā rezultātā tropisko jūru temperatūra pieauga no 22–25°C līdz 30°C, bet okeāni sāka paskābināties, iznīcinot karbonāta skeletu organismus.

Kopējais izmešu apjoms sasniedza līdz 7800

gigatonnām sēra, 8700 gigatonnām hlora un 13600 gigatonnām fluora.⁵²

Vulkāniskie pelni un aerosoli bloķēja saules gaismu, izjauca fotosintēzi, izraisīja masveida mežu izžušanu un barības ķēžu sabrukumu, kas pastiprināja gan augu, gan dzīvnieku sugu izmiršanu.

Tā laika ekoloģiskā krīze kalpo kā liecība par iespējamo seku mērogu pat gadījumā, ja Sibīrijas pluma izvirdums norisināsies pakāpeniski.

Saskaņā ar pētījumiem, izvirdumu periodu, kas sākās pirms 250 miljoniem gadu, izraisīja mantijas pluma pacelšanās – spēcīgas magmas straumes, kas pacēlās no Zemes dziļēm mūsdienu Putoranas plato rajonā. Šāda scenārija atkārtotāšanās mūsdienās novedīs pie vērīnīgu lavas plato veidošanās – vieniem no lielākajiem ģeoloģiskajiem veidojumiem uz planētas, kas iznīcinās gandrīz visu dzīvību vairāku tūkstošu kilometru rādiusā, aptverot Sibīrijas teritoriju un kaimiņu reģionus. Ģeoloģiskie dati liecina, ka šādas katastrofas, kurām raksturīga milzīga bazalta lauku izplūšana,⁵³ ir notikušas vairākkārt, katru reizi izraisot plašus masveida izmiršanas procesus (84. att.).

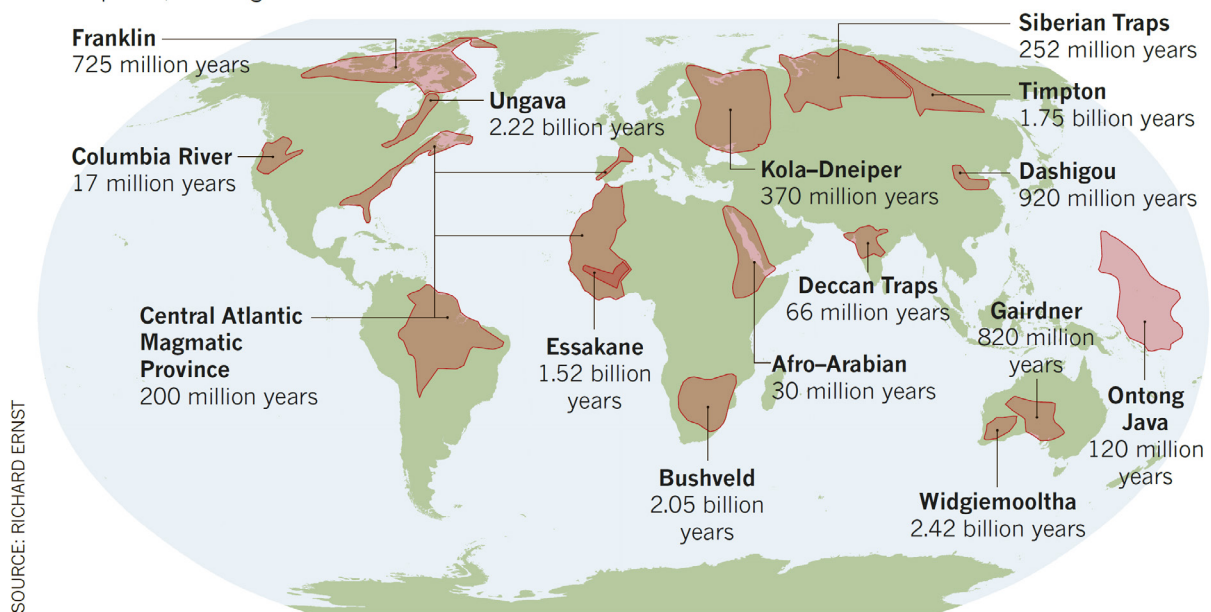
⁵²Benjamin A. Black, Linda T. Elkins-Tanton, Michael C. Rowe, Ingrid Ukstins Peate, Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps, *Earth and Planetary Science Letters*, Volumes 317–318, 2012, Pages 363–373, ISSN 0012-821X, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001>

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



84. att.

Attēlā redzama karte ar lielākajiem vulkāniskajiem izvirdumiem Zemes vēsturē, norādot šo notikumu rezultātā izveidojušos lavu plato ģeogrāfisko atrašanās vietu un vecumu

Ilustrācija: Richard Ernst

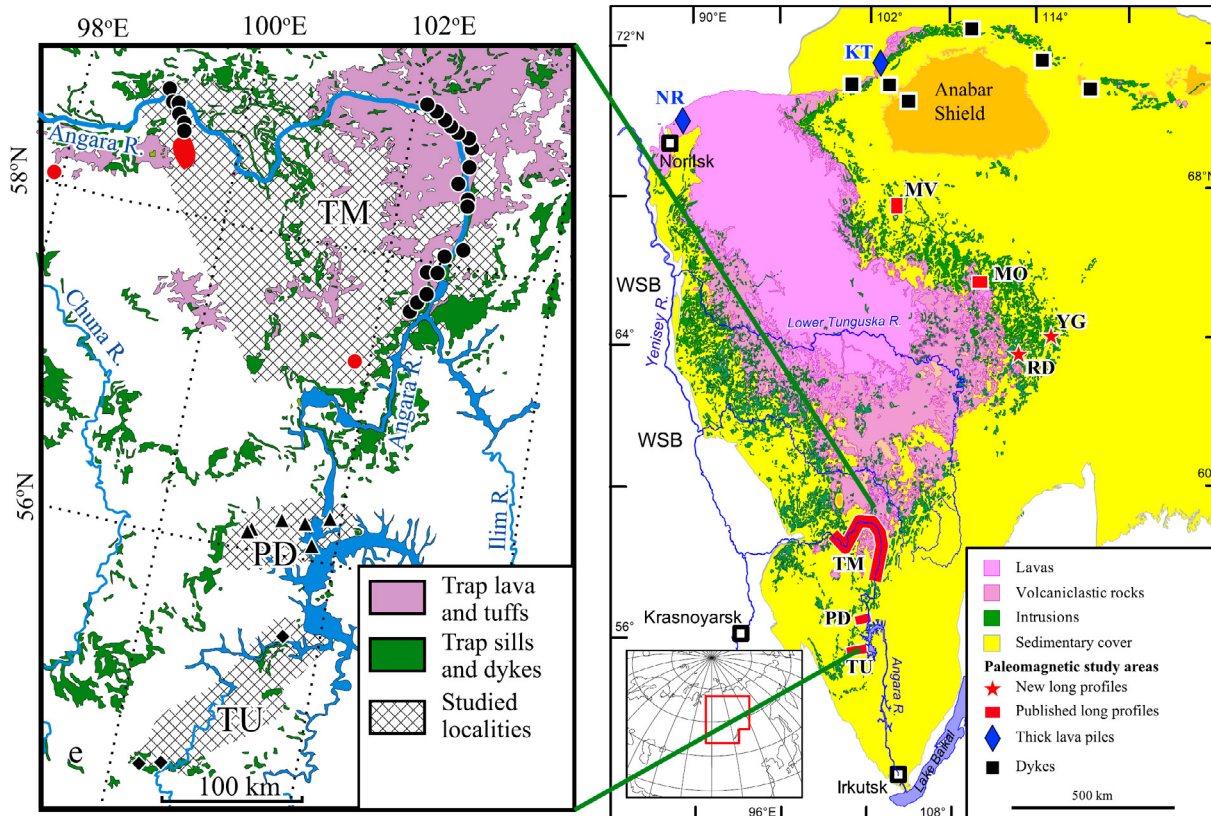
Avots: Witze, A. (2017). Earth's lost history of planet-altering eruptions revealed. *Nature*, 543, 295-296.

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

Tāpat kā iepriekšējos ģeoloģiskajos laikmetos, magma pacelsies no mantijas, iekļūstot pa plaisām Zemes garozā, līdzīgi tam, kā mīksta viela izsūcas caur blīvu filtru. Šis process izraisīs virsmas pārkaršanu, daudzu iekšgarozas magmas intrūziju veidošanos un litosfēras kušanu.

85. attēlā parādīts effuzīvo iežu sadalījums Sibīrijā: lavas plūsmas attēlotas ar violetu, magmatiskie ķermeņi, kas sacietējuši Zemes

garozā - ar zaļu. Zaļās zonas kartē demonstrē, kā magma, noārdot Zemes garozu, veidoja plaisas un izplatījās gar šīm novājinātajām zonām. Līdzīgs pastiprināts magmas spiediens var atkal izraisīt analogisku procesu.



85. att.

Pa labi: karte ar Sibīrijas trapu provinci (vienkāršota un modificēta pēc Svensen et al., 2009). Kartē dažādās krāsās attēlotas galvenās ģeoloģiskās struktūras: rozā – lavas plūsmas, zaļā – intruzīvie ķermeņi, dzeltenā – nogulumiežu slānis. Pa kreisi: detalizētā kartē parādīts trapu magmatisma sadalījums: violetā krāsā apzīmētas lavas un tufi, zaļā – sillas un daikas

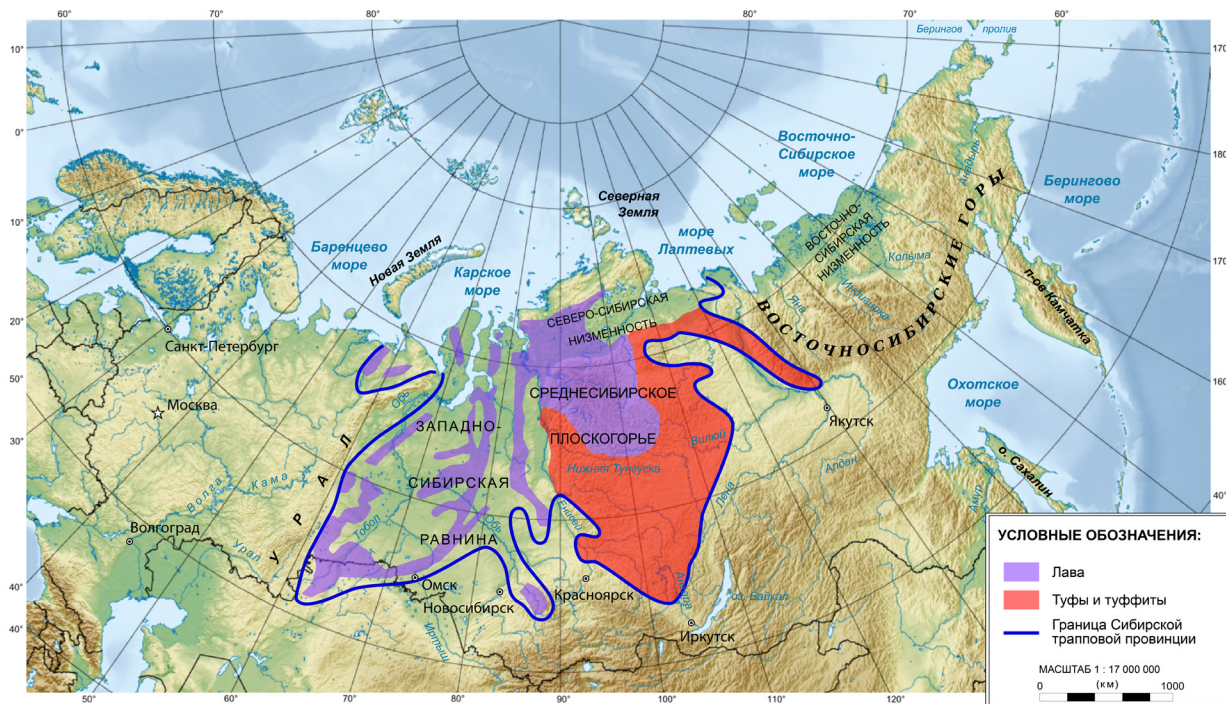
Avots: Konstantinov, K. M., Bazhenov, M. L., Fetisova, A. M., & Khutorsky, M. D. (2014). Paleomagnetism of trap intrusions, East Siberia: Implications to flood basalt emplacement and the Permo–Triassic crisis of biosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 242–253.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029>

Scenārijs ar pakāpenisku izvirdumu ir salīdzināms ar pēkšņu Sibīrijas pluma eksploziju, tikai ilgākā laika posmā. To var iedomāties kā virkni vulkānu, kas izvirst katru nedēļu, kā arī pēkšņu plaisu rašanos, pa kurām bazalta lavas plūdīs pa visu Rietumsibīriju.

Kartē (86. att.) ar violetu krāsu apzīmētas lavas plūsmas zonas. Blīvākas un stabilākas garozas apgabalā Austrumsibīrijas platformā lava izplatījās plašās teritorijās, savukārt Rietumsibīrijā, kur garoza ir plānāka, jaunāka un neviendabīgāka, izvirdumi notika gar izstieptām ieplakām vai riftiem. Kartē ar sarkanu atzīmētas tufa zonas,

kas sastāv no sacementētiem piroklastiskiem fragmentiem un pelniem.

Jāatzīmē, ka Austrumsibīrijas un Rietumsibīrijas izvirdumi atšķirsies. Zem Austrumsibīrijas magma saskaras ar blīvo Arhaja kratonu, kas rada ievērojamu barjeru. Ceļoties augšup, magma “ieēdas” apkārtējos iežos, atdziest un piesātinās ar gaistošiem komponentiem, kas var novest pie eksplozīviem izvirdumiem ar lielu pelnu izmešu apjomu un iespējamu skābas, viskozas magmas veidošanos.



86. att.

Sibīrijas trapu provinces karte attēlo galvenās ģeoloģiskās struktūras: violetā krāsā - apgabali ar lavas plūsmu izplatību; purpura krāsā - tufa un tuftu zonas. Zilās līnijas apzīmē Sibīrijas trapu provinces robežas

Avots: wikipedia.org, based on data from Masaitis, 1983

Savukārt zem Rietumsibīrijas, kur garoza ir plāna un jauna, dominēs šķidro bazalta lavu izplūšana.

Sagaidāms, ka lavas plūsmas un tufu klātā teritorija Rietumsibīrijā un Austrumsibīrijā sastādīs aptuveni 7 miljonus km², kas ir pielīdzināms mūsdienu Austrālijas teritorijai. Tomēr degradācijas skartās platības, visticamāk, pārsniegs desmitiem miljonu kvadrātkilometru. Šīs teritorijas piedzīvos plašus ugunsgrēkus, erozijas ietekmētus skābos lietus, pelnu nosēšanos, nogrūvumus un dubļu straumes, kas nesīs vulkāniskos nogulumus. Visa Sibīrijas mūžīgā sasaluma zona tiks pilnībā iznīcināta.

Jāatzīmē, ka Taimiras pussalā, uz rietumiem no Putoranas plato, atrodas pasaulē lielākās niķeļa, vara un platīna grupas metālu atradnes, kuras izstrādā uzņēmums Nornickel. Šīm atradnēm

ir magmatiska izcelsme, un tās ir izveidojušās aptuveni pirms 250 miljoniem gadu Sibīrijas trapu magmatiskās provinces izvirdumu rezultātā, veicinot unikālu rūdu mezglu izveidi. Augsta niķeļa koncentrācija tā laika magmā, visticamāk, bija saistīta ar Zemes kodola vielu iznešanu uz virsmu.

Pašlaik tiek novērota magmatiskā pluma pacelšanās Sibīrijā, kā paātrināšanos 1998. gadā izraisīja kodola nobīde Taimiras pussalas virzienā, ko noteicis zinātņu doktors Jurijs Barkins. Tuvākajā nākotnē pastāv augsts Sibīrijas pluma izlaušanās risks Noriļskas apkaimē – tieši tajā pašā vietā, kur tas notika pirms 250 miljoniem gadu.

Tālāk aplūkosim šī scenārija sekas Krievijai un visai pasaulei.

Pakāpeniskā Sibīrijas pluma izvirduma sekas Krievijai

Pētījumos ir precīzi kartētas astenosfēras izkausēto lēcu atrašanās vietas Dienvidsibīrijas litosfērā, ko var izskaidrot ar plāno reģiona garozu. Taču Ziemeļsibīrija joprojām ir praktiski neizpētīta seismiskajās kartēs, veidojot “balto plankumu” apakšējās garozas un mantijas izpētē. Šo datu trūkums neļauj prognozēt sākotnējās lavas izlaušanās vietas un ar gāzēm piesātinātās magmas izvirdumus, īpaši ņemot vērā visaptveroša pazemes dzīļu monitoringa neesamību Sibīrijas pluma zonā.

Zināms, ka pirmās tuvojošās katastrofas pazīmes būs biežākas zemestrīces un lokāli gāzu izmeši gar Sibīrijas bloka zemes garozas malām. Magmai paceļoties uz virsmu, sāksies strauja mūžīgā sasaluma kušana, kas var izraisīt infrastruktūras destabilizāciju šajā gruntī. Tāpat, gruntij sakarstot, iespējami gāzhidrātu (ledū ieslēgta metāna) sprādzieni, kas radīs lielus krāterus un apdraudēs apdzīvotas vietas.

Masveida ugunsgrēki kļūs neizbēgami metāna izdalīšanās, augsnes pārkaršanas un vulkānisko gāzu atbrīvošanās dēļ. Sibīrijas ogļūdeņražu atradnes un ogļu baseini, piemēram, Kuzbass, var aizdegties, kā jau notika perma-triasa periodā,⁵⁴ kad ogļu slāņi tika termiski uzkarstēti līdz 600°C.

Izvirdumi sāksies pēkšņi, aptverot daudzus reģionus plašā teritorijā. Zemestrīces ar magnitūdu 7–8, plaisas un lūzumi izraisīs lavas izplūšanu

simtiem tūkstošu kvadrātkilometru platībā. Apvidū ap lavas izlaušanās vietām notiks masveida augu, dzīvnieku un cilvēku bojāeja toksisko izmešu dēļ, kas atmosfērā veidos indīgu “kokteili”.

Jau pirmajās dienās ies bojā miljoniem cilvēku, vulkāniskie pelni iznīcinās transporta infrastruktūru, nosēžoties uz ceļiem un dzelzceļa sliedēm, pasliktinot redzamību un sagraujot infrastruktūru. Aviācija pilnībā apstāsies lidaparātu dzinējiem radītā pelnu apdraudējuma dēļ.

Mūžīgā sasaluma kušana vēl vairāk saasinās situāciju: transporta ceļi, cauruļvadi, ēkas un komunikācijas sāks sabrukt. Daudzas pilsētas paliks bez piekļuves ūdenim, pārtikai un elektrībai, kas izraisīs humāno krīzi. Masveida evakuācija lielākajā daļā izvirduma skartajās zonās kļūs neiespējama, jo lava, gāzes, ugunsgrēki un skābie lieti padarīs transporta ceļus nelietojamus. Panika pārņems miljoniem cilvēku; masveida Sibīrijas iedzīvotāju evakuācija izraisīs sociālo nestabilitāti un plašus nemierus.

Valsts ekonomika piedzīvos katastrofālus zaudējumus: naftas, gāzes, ogļu, dimantu un metālu ieguve apstāsies infrastruktūras fiziskā sabrukuma dēļ, kas izraisīs rūpniecības uzņēmumu slēgšanu, izejvielu un elektroenerģijas deficītu. Vulkaniskā aktivitāte iznīcinās reģiona dabas bagātības, tostarp naftu un ogles, iznīcinot valsts galvenos ekonomiskos aktīvus.

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>

Gadu desmitiem pēc izvirduma Sibīrija joprojām būs ekoloģiskās katastrofas zona. Krieviju skārūs katastrofa neatgriezeniski izmainīs tās ģeogrāfiju, ekonomiku un sabiedrību. Tikai 25% no valsts teritorijas būs piemērota dzīvošanai, taču tā

saskarsies ar milzīgu ekoloģiskās un sociālās krīzes spiedienu. Ekonomiskās pozīcijas, vēsturiskie pieminekļi un lielākā daļa dabas bagātību tiks zaudēti. Sibīrija kļūs nepiemērota mūsdienu civilizācijas pastāvēšanai.

Pakāpeniskā Sibīrijas pluma izvirduma sekas visai pasaulei

Globālās Sibīrijas pluma izvirduma sekas ietekmēs visu pasauli, un tas notiks vairākos etapos.

Pirmajās dienās transporta savienojumi caur Sibīriju starp Eiropu un Āziju tiks pārtraukti, bet aviācijas pārvadājumi apstāsies atmosfērā esošo vulkānisko pelnu dēļ. Šie procesi izjauks globālo loģistiku, izraisot plaša mēroga pārtikas krīzi, jo Krievija kā viens no vadošajiem pārtikas eksportētājiem pārtrauks kviešu un citu produktu piegādi. Krievijas naftas, gāzes un citu izejvielu eksporta traucējumi izraisīs cenu lēcieni, enerģētisko krīzi un ekonomisko nestabilitāti daudzās valstīs. Pasaules ekonomika saskarsies ar finanšu un sociālo satricinājumu ķēdes reakciju.

Pelnu un sērskābo aerosolu mākoņi izraisīs globālo aptumšošanos, samazinot saules gaismas pieplūdi. Tas novedīs pie “vulkāniskās ziemas” ar temperatūras pazemināšanos par 2–3°C. Skābie lieti un augsnes piesārņojums nodarīs kaitējumu lauksaimniecībai ne tikai Krievijā, bet visā pasaulē. Masveida bads, ūdens trūkums, toksiska gaisa ieelpošana un klimata sistēmas sabrukums pakāpeniski izraisīs miljardiem cilvēku un dzīvnieku bojāeju. Pēc dažiem gadiem sabiedriskās sistēmas sabruks.

Laika gaitā vulkāniskie pelni sāks nosēties, taču notiks straujas klimata pārmaiņas. Metāna un oglekļa dioksīda izmeši no kūstošā mūžīgā sasaluma pastiprinās siltumnīcas efektu. Temperatūra sāks pakāpeniski pieaugt par 5–10°C, izraisot nestabilu klimatu ar krasām temperatūras svārstībām. Ozona slāņa noārdīšanās novedīs pie ultravioletā starojuma līmeņa paaugstināšanās Ziemeļu puslodē, vēl vairāk pastiprinot izvirdumu sekas.

Neskatoties uz lielo attālumu no Sibīrijas, Eiropa saskarsies ar nopietnām Sibīrijas pluma izvirduma sekām: pelni pārklās Ziemeļeiropu un Austrumeiropu, izraisot plašu elpceļu slimību izplatību iedzīvotājos. Skābie lieti iznīcinās mežus, pilsētu infrastruktūru un lauksaimniecības zemes. Pēc īslaicīgas atdzišanas fāzes sāksies strauja temperatūras paaugstināšanās, kas izpaudīsies kā sausums dienvidos un plūdi Centrāleiropā un Ziemeļeiropā.

Masveida migrācija no Krievijas, Āzijas un Tuvajiem Austrumiem izraisīs demogrāfisko krīzi un saasinās konkurenci par resursiem. Eiropas valstis saskarsies ar nepārtrauktiem ekoloģiskiem, ekonomiskiem un sociāliem izaicinājumiem.

Āzija visvairāk izjutīs izvirduma sekas, jo atrodas vistuvāk izvirduma epicentram. Putekļu un pelnu radītais gaisa piesārņojums izraisīs plašus elpošanas traucējumus un skābos lietus, it īpaši Ķīnā, Mongolijā un Kazahstānā. Ziemeļķīnas lauksaimniecība, būtisks pārtikas ražošanas reģions, tiks iznīcināta saules gaismas trūkuma un augsnes kvalitātes pasliktināšanās dēļ.

Temperatūras svārstības sagraus infrastruktūru un lauksaimniecības sistēmas visā kontinentā. Pakāpenisks okeānu temperatūras

pieaugums izraisīs skābekļa trūkumu ūdenī, kas iznīcinās jūras ekosistēmas un novedīs pie zvejniecības sabrukuma.

Laika gaitā turpmākie izvirdumi vēl vairāk saasinās globālo iznīcību. Klimatiskā un ekoloģiskā krīze turpinās pastiprināties. Cilvēce zaudēs lielu daļu tehnoloģisko un intelektuālo sasniegumu un iegrims dziļā regresijā. Cilvēce nonāks uz pilnīgas sabiedrības sabrukuma robežas.

Pakāpeniskā Sibīrijas pluma izvirduma sekas ilgtermiņā

Pakāpenisks Sibīrijas pluma izvirdums izraisīs plaša mēroga ilgtermiņa sekas, kas radikāli izmainīs planētu uz miljoniem gadu. Atmosfēra tiks piesārņota ar toksiskām vielām, kas novedīs pie planetāra mēroga skābajiem lietus un ozona slāņa noārdīšanās.

Okeāni piedzīvos kritisku paskābināšanos, kas izraisīs masveida jūras organismu bojāeju. Šie procesi novedīs pie jūras ekosistēmu sabrukuma, globālo barības ķēžu izjukšanas un visas jūras bioloģiskās daudzveidības sabrukuma.

Uz sauszemes toksisko izmešu, augsnes ekosistēmu sabrukuma un lielākās daļas augu izzušanas dēļ masveida izmiršana būs neizbēgama. Apputešnotāju zaudēšana novedīs

pie sauszemes ekosistēmu sabrukuma. Tiek lēsts, ka izmiršana skars no 75 līdz 95% visu pastāvošo sugu.

Izvirduma rezultātā sāksies kompleksa klimatiska, bioloģiska un ģeoloģiska krīze, kas pilnībā pārveidos Zemes biosfēru. Šis process novedīs pie civilizācijas sabrukuma, miljardiem cilvēku bojāejas un nelielu izdzīvojušo grupu atgriešanās attīstības līmenī, kas pielīdzināms akmens laikmetam. Šīs katastrofas mērogs būs salīdzināms ar lielākajiem masveida izmiršanas gadījumiem Zemes vēsturē, iezīmējot jaunu biosfēras evolūcijas posmu, kura attīstība prasīs vismaz vairākus miljonus gadu.

3. scenārijs

Plānota kontrolēta degazācija

Esošās vulkāniskās ģeoinženierijas metodes

Ņemot vērā pieaugošo spriedzi zem Rietumsibīrijas plātnes un Austrumsibīrijas kratona, kas saistīta ar Sibīrijas pluma pacelšanos, ir nepieciešams nekavējoties veikt pasākumus, lai samazinātu iespējamo katastrofālo seku risku. Viens no šādiem risinājumiem ir kontrolēta spiediena, lavas un gāzu atbrīvošana no sekundārajām magmas kamerām, proti, **plānveidīga, kontrolēta degazācija.**

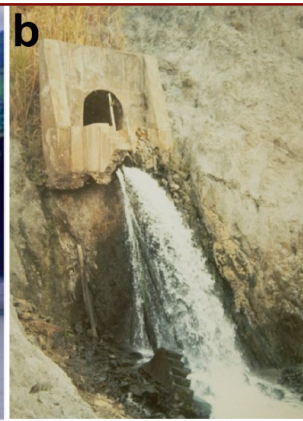
Mūsdienu zinātniskie pētījumi aplūko magmatisko kameru degazāciju kā perspektīvu metodi, lai novērstu plaša mēroga izvirdumus. Šī pieeja rada priekšnoteikumus vulkāniskās ģeoinženierijas tehnoloģiju pielietošanai ne tikai vulkānos un supervulkānos, bet arī magmatisko plumu aktivitātes regulēšanā. Kontrolētās degazācijas koncepcija ir atspoguļota vairākās zinātniskajās publikācijās un patentos, ko izstrādājuši daudzu valstu speciālisti.

Teorētiskie vulkāniskās ģeoinženierijas pamati tika izstrādāti XX gadsimta sākumā, savukārt praktiski eksperimenti ir veikti šī gadsimta laikā. Vulkaniskās iejaukšanās metodes ietver krāteru urbšanu, vulkānisko ezeru nosusināšanu, kanālu izveidi lavas novadīšanai, lavas plūsmu

dzēsēšanu ar jūras ūdeni, lavas plūsmu bombardēšanu un siltumnīcefekta gāzu (oglekļa dioksīda un metāna) izsūkņēšanu (87. att.).

Kopš 1960-iem gadiem ASV Ģeoloģijas dienests (USGS) ir veicis urbšanas darbus lavas ezeru apvidos uz Kilauea vulkāna Havaju salās, lai novirzītu lavu. Līdzīgas iniciatīvas tiek īstenotas Japānā, Islandē un Itālijā. Piemēram, Japānā ir testētas tehnoloģijas magmatisko kameru spiediena samazināšanai, savukārt Islandē veiksmīgi īstenota lavas novirzīšana Heimaejas salā, kur plūsmas tika dzesētas ar ūdens lielgabaliem. Itālijā tiek attīstītas agrīnās brīdināšanas sistēmas un lavas plūsmu kontroles metodes, piemēram, 1983. gadā Etnas vulkānā veikta eksplozīva lavas barjeru iznīcināšana.

Tagad tiek organizētas starptautiskas zinātniskās konferences un simpoziji, kas veltīti dziļurbšanai vulkāniskās un ģeotermālās aktivitātes zonās, paplašinot vulkāniskās ģeoinženierijas pielietošanas perspektīvas izvirdumu novēršanai un to seku mazināšanai globālā līmenī.



87. att.

a) Oglekļa dioksīda degazācija no Niosa ezera, Kamerūna, pēc Halbwachs et al. (2020) datiem

b) Drenāžas tunelis Keluča vulkāna krātera sienā, Indonēzija (Globālā vulkāniskā programma, attēls GVP-01120)

c) Palīgurbšana magmatiskajā kabatā Kraflā, Islande, 2009. gadā (attēls no GO Friðleifsson/IDDP)

d) Lavas plūsmu dzesēšana ar jūras ūdens sūkņēšanu Heimaejā, Islande, 1973. gadā, Tristins H. Benediktsons

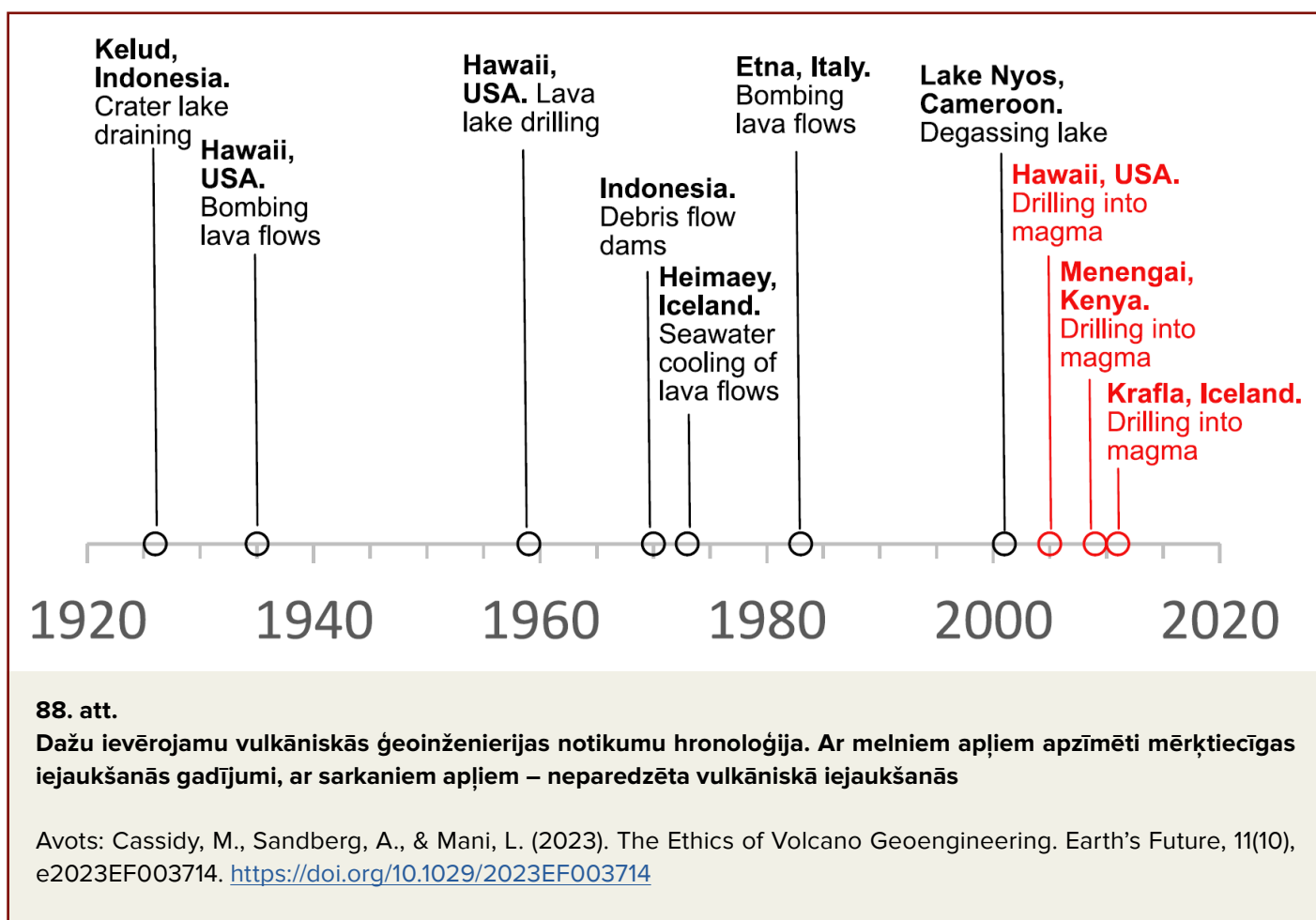
Avots: Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). The Ethics of Volcano Geoengineering. *Earth's Future*, 11(10), e2023EF003714.

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

Diagrammā (88. att.) attēlota nozīmīgāko vulkāniskās ģeoinženierijas gadījumu hronoloģija. Melnie apli apzīmē mērķtiecīgas iejaukšanās gadījumus, sarkanie – neparedzētu vulkānisko aktivitāti.

Pastāv arī patentētas metodikas plānveidīgai degazācijai un vulkānu un supervulkānu izvirdumu riska mazināšanai.

Piemēram, princips vienai no tehnoloģijām, ko patentējuši divi Krievijas speciālisti, ir novērst nekontrolētu, lavīnveida vulkānu izvirdumu, izmantojot slīpa urbumu izveidi un spiediena regulēšanu magmatiskajās kamerās (89. att.).





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

89. att.

Patents: Veids, kā novērst lavīnveida vulkāna izvirdumu

Izgudrojums attiecas uz metodēm, kas novērš nekontrolētu lavīnveida vulkānu izvirdumu un organizē kontrolētu magmas transportēšanu tās izmantošanai būvniecībā. Tas palielina pieejas efektivitāti.

Izgudrojuma būtība: metode regulē spiedienu sekundārajās magmas kamerās zem vulkāniem, kuri izrāda solfatāru aktivitāti. Šim nolūkam tiek veikta slīpa kanālu urbšana sekundārajā magmas kameras pamatnē. Šajā kamerā tiek ievadīta saspiesta gāze, kas paaugstina spiedienu un palēnina magmas plūsmu no primārās kameras. Tajā pašā laikā notiek magmas ieguve un transportēšana būvniecībai pa izurbtajiem kanāliem, nepieļaujot kritiskā spiediena sasniegšanu, kas varētu izraisīt lavīnveida izvirdumu.

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

Citu tehnoloģiju ir izstrādājis amerikāņu izgudrotājs (90. att.). Šī tehnoloģija apraksta metodes magmas sūkņēšanai no vulkāniskajām magmatiskajām kamerām, piemēram, Jeloustonas supervulkānā, ar mērķi novērst iespējamu katastrofālu izvirdumu.

Pamatideja ir mākslīgu kanālu (cauruļu) izveide magmas novadīšanai uz virsmu, kur tā var tikt apstrādāta un izmantota, piemēram, enerģijas iegūšanai.

(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

(21) Appl. No.: **10/230,549**

(22) Filed: **Aug. 29, 2002**

(65) **Prior Publication Data**
US 2003/0145592 A1 Aug. 7, 2003

(30) **Foreign Application Priority Data**
Feb. 4, 2002 (GB) 0202465.1

(51) **Int. Cl.**
E21B 36/00 (2006.01)
E21B 43/24 (2006.01)

(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

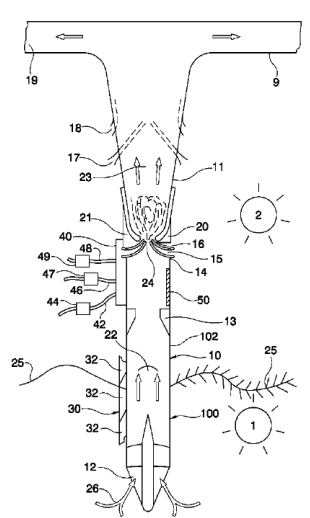
FOREIGN PATENT DOCUMENTS
GB 2362410 11/2001
JP 070071020 A 3/1995
JP 100076104 A 3/1998
JP 100077952 A 3/1998
JP 100078497 A 3/1998

* 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



90. att.

Patents: Magmas evakuācijas sistēmas supervulkānu sprādzienu novēršanai

Ierīce kontrolē vulkāniskās magmas izsūkņēšanu, lai novērstu izvirdumus. Magmas sūkņēšana tiek veikta pa vienu evakuācijas cauruli, kurā magmas plūsma tiek uzsildīta, lai novērstu salīpšanu caurulē. Uzsildīšanai var tikt izmantotas nelielas sadegšanas kameras, kas pievada tvaiku, kas savukārt uzsilda un stabilizē magmas plūsmu. Ja nepieciešams, stabilitāte tiek uzturēta ar centrālo dzesēšanu, izmantojot ūdens strūklu no sprauslām, kas atrodas caurules sienās.

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

Veiksmīgas degazācijas piemērs ir arī japāņu projekts “Zinātniskā urbšana Undzenas vulkānā” (USDP). Tā ir sešus gadus ilga iniciatīva, kas tika uzsākta 1999. gada aprīlī un vērsta uz Undzenas vulkāna augšanas vēstures, pazemes struktūras un magmas pacelšanās procesu izpēti (91. att.). Pirmā fāze ietvēra divu urbumu veikšanu vulkānā nogāzēs un tā struktūras modeļa izveidi. Otrā fāze bija vērsta uz urbšanu magmas kanālā, kas

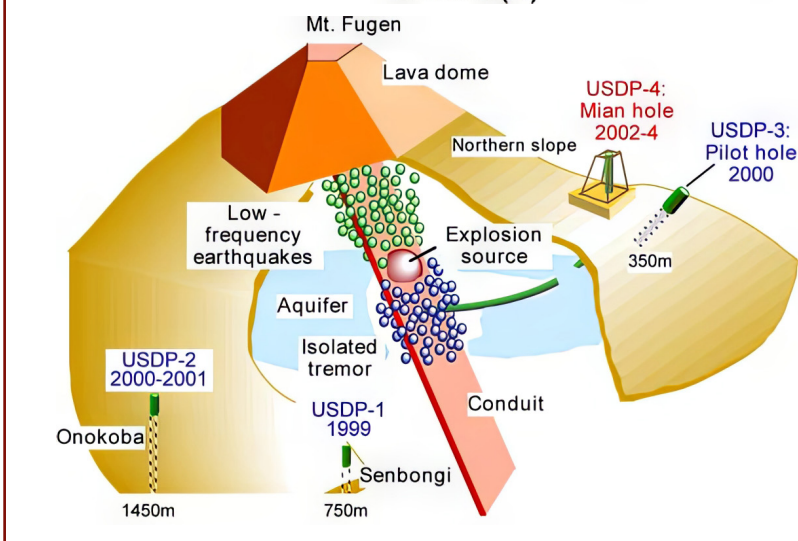
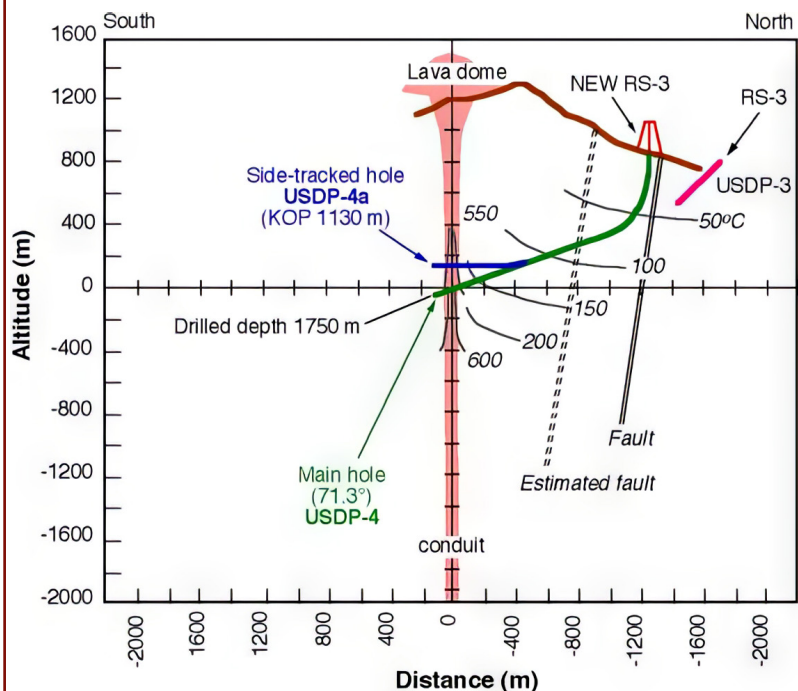
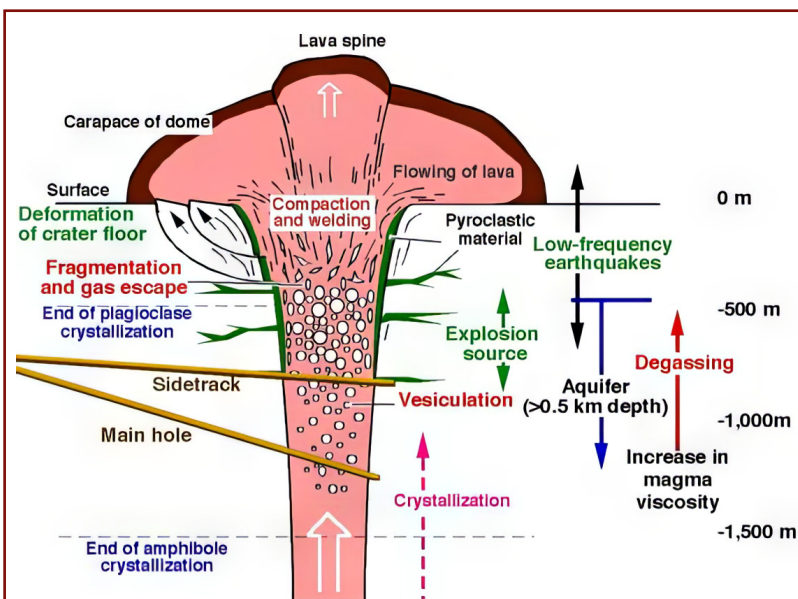
izveidojās 1990.–1995. gada izvirdumu laikā, lai analizētu degazācijas mehānismu. Urbšanas stratēģija ietvēra vertikālu urbšanu, kam sekoja pakāpeniska urbuma slīpuma palielināšana (92. att.).



91. att.
Urbšanas iekārtas Undzenas vulkāna urbšanai 1995. gadā

Avots:

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



92. att.

a) Lavas kupols un augšējā kanāla daļa Unzenā

Efektīva putojošās magmas degazācija notika tās fragmentācijas un sacietēšanas laikā kanāla augšējā daļā. Kanāla stāvoklis tika izpētīts, veicot galveno urbumu (USDP-4) 2003. gadā, savukārt nepārtrauktā iežu kernu iegūšana notika, urbjot sānu urbumu (USDP-4a) 2004. gadā.

Avots: 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) Kanāla urbšanas trajektorijas. No punktiem New RS-3 un RS-3 plānots veikt galveno un sānu urbumu, kā arī izmēģinājuma urbumu

Avots: 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) Kanāla urbuma trīsdimensiju shēma

Avots: 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>

Mūsdienās cilvēcei ir pietiekams tehnoloģiskais un inženiertehniskais potenciāls, lai iejauktos vulkāniskajās sistēmās, taču katrs plānotās degazācijas gadījums prasa maksimāli rūpīgu sagatavošanos, liela datu apjoma analīzi un ļoti precīzus aprēķinus. Tomēr pat šādā gadījumā riski saglabājas.

Minētie piemēri tika pārbaudīti parastos vulkānos, kas, bez šaubām, izmēru ziņā ievērojami atšķiras no gigantiskā magmatiskā pluma Sibīrijā. Šis plums rada draudus, kas krietni pārsniedz pat viena supervulkāna jaudu un ir salīdzināms ar tūkstoš Jeloustonas kalderas sprādzienu enerģiju. Tomēr šī jautājuma risināšana ir kļuvusi steidzamāka tieši tāpēc, ka pastāv iespējami veidi tā mazināšanai.

Ar attiecīgu pieeju cilvēce ir spējīga izstrādāt magmatiskā pluma degazācijas programmu, balstoties uz globālajām speciālistu izstrādēm. Tās galvenais uzdevums būs mazināt Sibīrijas pluma pacelšanās sekas, samazinot lavas un gāzu spiedienu sekundārajās magmatiskajās kamerās, kas ļaus novērst plašus, nekontrolētus izvirdumus.

Šādas programmas īstenošana prasīs ciešu starptautisku sadarbību un kopīgu visas pasaules zinātnieku un inženieru darbu. Tikai apvienota pieeja ļaus izstrādāt efektīvus risinājumus, kas būs vērsti uz visas cilvēces drošības nodrošināšanu.

Plānotas Sibīrijas pluma degazācijas programmas piemērs

Programma var ietvert vairāku virzienu izstrādi vienlaikus:

1. Izveidot monitoringa tīklu

1.1 Nepieciešams izveidot augstas jutības sensoru un satelītu novērošanas tīklu, lai uzraudzītu seismisko un termālo aktivitāti reģionā. Tas ļaus savlaicīgi noteikt sekundāro kameru veidošanās zonas.

1.2 Jāveic detalizēta sekundāro magmatisko kameru kartēšana, izmantojot seismiskās izpētes metodes. Svarīgi būs katras sekundārās kameras sākotnējie spiediena un magmas apjoma novērtējumi.

1.3 Pēc tam jāveic zinātniskās izpētes un monitoringa urbumi, kuros jāuzstāda spiediena,

temperatūras un seismiskās aktivitātes sensori anomālajās zonās.

2. Izstrādāt kontrolētas degazācijas un magmatisko kanālu bloķēšanas tehnoloģiju

2.1 Būs jāizstrādā plāns slīpu dziļurbumu veikšanai līdz 8 km dziļumā drošās zonās. Nepieciešami detalizēti slīpo urbumu trajektoriju aprēķini, lai sasniegtu sekundārās kameras. Jāizmanto urbšanas tehnoloģijas, kas ir noturīgas pret augstu temperatūru un spiedienu. Tas ietver karstumizturīgu materiālu izmantošanu urbumu sienu stiprināšanai, kā arī monitoringa sistēmas izveidi, lai uzraudzītu spiedienu un temperatūru urbumos, nodrošinot drošību un efektivitāti.

2.2 Jāizstrādā rūpīgi izplānots process gāzu un lavas novirzīšanai, kas ietver pakāpenisku spiediena regulēšanu sekundārajās magmatiskajās kamerās, izmantojot urbumu sistēmu. Tas prasa kontrolēt degazācijas ātrumu, lai novērstu pēkšņas spiediena izmaiņas, kā arī izmantot kompresoru sistēmas gāzes spiediena regulēšanai. Lai novērstu toksisko vielu nonākšanu atmosfērā, būs nepieciešamas filtrēšanas un dzesēšanas sistēmas. Lavas un gāzu izvade turpināsies, līdz katras kameras spiediens būs stabilizēts.

2.3 Pēc tam jāizstrādā plāns mērķtiecīgai kodolsprādziena veikšanai noteiktos urbumos, lai noslēgtu slāņus virs sekundārajām magmatiskajām kamerām. Šī pieeja vajadzīga, lai novērstu magmas nokļūšanu uz virsmas un pelnu emisijas samazināšanu.

Pakāpeniska spiediena izlaišana nodrošinās Sibīrijas stabilitāti un aizsargās lielākās apdzīvotās teritorijas, lai gan Noriļska un tās apkārtnē esošās apdzīvotās vietas var palikt paaugstināta riska zonā.

2.4 Lavas novirzīšanas procesā būs jāpieliek pūles, lai pēc iespējas vairāk kontrolētu tās plūsmu. Lava jāvirza pa speciāli sagatavotiem kanāliem uz Arktikas jūrām. Papildus tam jāizstrādā programma magmas izmantošanai būvniecībā piemēram, mākslīgo salu veidošanā

vai piekrastes līniju stiprināšanā.

3. Iedzīvotāju evakuācija

Nepieciešams ieviest agrīnās brīdināšanas sistēmu un izstrādāt evakuācijas plānus neparedzētu situāciju gadījumā. Tāpat jānodrošina plānveida iedzīvotāju evakuācija no riska zonām un viņu adaptācija, sociālais nodrošinājums, ņemot vērā ilgtermiņa pārvietošanas iespēju.

4. Infrastruktūras saglabāšana

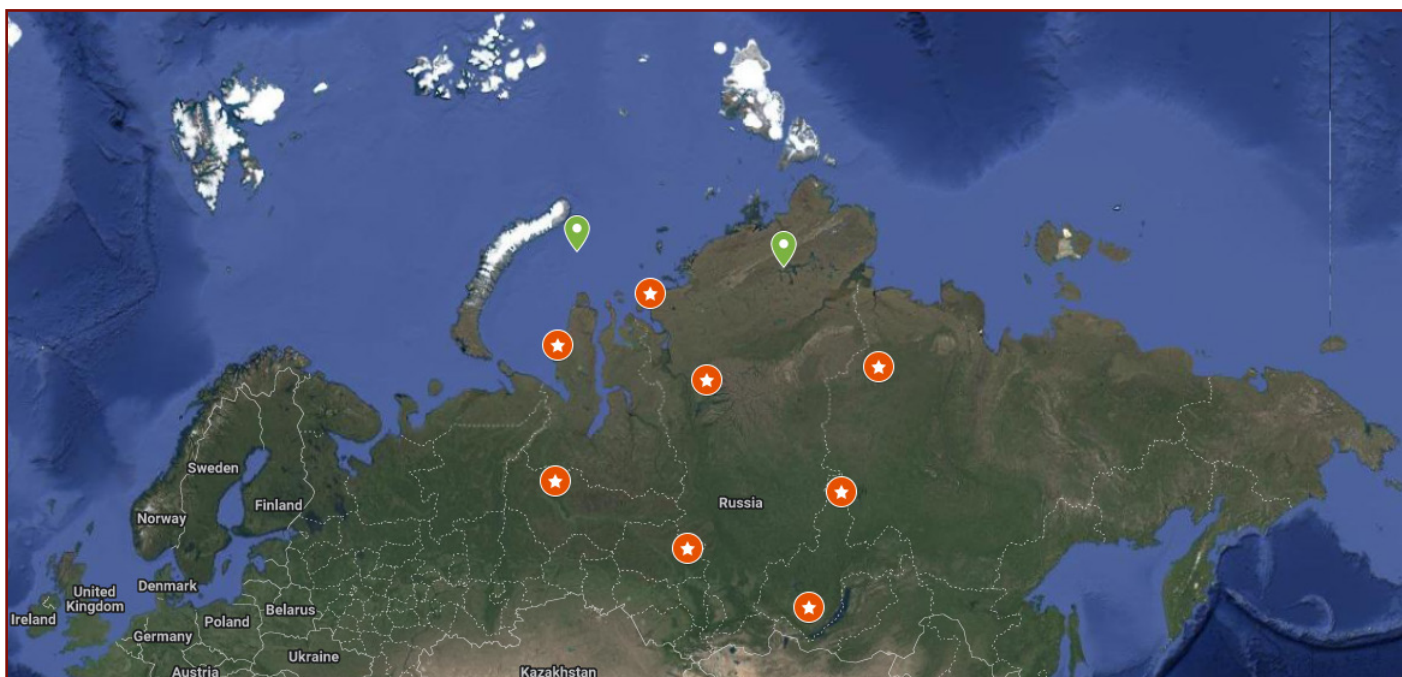
Nepieciešams izstrādāt plānus stratēģisko objektu aizsardzībai un evakuācijai no zonām, kuras apdraud lavas applūšana. Drošās teritorijās jāizveido rezerves noliktavas evakuētajiem stratēģiskajiem resursiem, piemēram, naftai, gāzei, krāsainajiem un dārgmetāliem, rūdām, mēslojumam, pārtikai, ūdenim un medikamentiem.

Zinātniski pētniecisko urbumu izvietojanas pamatojums mūsdienu Sibīrijas magmatiskā pluma dinamikas monitorēšanai

Lai saprastu, cik ātri un kādā virzienā notiek pluma iespiešanās un tā galvas izplūšana, kā arī tā iekļūšana Zemes garozas plaisās, pirmais solis ir ģeotermālo un ģeofizisko parametru monitorings dziļumā. Šādiem pētījumiem nepieciešams veikt jaunus urbumus un regulāri tajos veikt spiediena un temperatūras

mērījumus, ņemt paraugus gāzu sastāva analīzei un magmatisko procesu pastiprināšanās marķieriem, kā arī reģistrēt seismiskos trokšņus un citus parametrus.

Šiem pētījumiem ir noteiktas 10 vietas zinātniskās izpētes urbumu veikšanai (93., 94. att.).



93. att.

Desmit ieteicamo zinātniskās izpētes urbumu provizoriskās atrašanās vietas

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, Belayarsky 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

94. att.

Tabula ar 10 ieteicamajiem izpētes urbumiem Sibīrijas pluma attīstības uzraudzībai, ietverot urbumu nosaukumus, koordinātas, tuvāko apdzīvoto vietu vai infrastruktūru un ģeoloģisko šķērsriezuma struktūru

Šo urbumu izvēles kritēriji balstījās uz šādiem principiem:

1. Urbumu izvietojums tika noteikts, ņemot vērā vislielāko siltuma un ģeodinamisko anomāliju krustošanās zonu, kas saistīta ar pluma iespiešanos un tā galvas izplatīšanos. Pamatojoties uz šo principu, viens urbums tika paredzēts iespējamā pluma galvas pacēluma centrālajā daļā, septiņi urbumi – gar paredzamo magmas izplatīšanās perimetru. Vēl viens urbums tika ieplānots Baikāla rajonā, virzienā, kur, iespējams, aktīvi virzās magma zem Austrumsibīrijas kratona pamata. Vēl viens urbums tika plānots Karas jūras reģionā, lai monitorētu pluma kustību zem Arktikas šelfa okeāniskās garozas.

2. Urbumu izvietojums tika optimizēts turpmākajiem seismotomogrāfijas darbiem, nodrošinot, lai apstrādātie seismisko sensoru dati sniegtu visprecīzāko 3D attēlojumu. Tādējādi urbumu seismisko sensoru tīkls tika izvietots tā, lai nodrošinātu optimālus apstākļus Zemes dziļu seismotomogrāfijai.

3. Urbšanas vietas tika izvēlētas, ņemot vērā iespēju piegādāt urbšanas aprīkojumu un nodrošināt piekļuves ceļus (transporta pieejamību). Ņemot vērā, ka Ziemeļrietumu un Austrumsibīrijas teritorijas ir ārkārtīgi grūti caurejamas, ar purviem, nelielu ceļu skaitu un ekstremāliem klimatiskajiem apstākļiem, urbšanas vietu izvēle balstījās uz jau esošās zinātniskās izpētes infrastruktūras atrašanos, tostarp ceļiem, apmetnēm un aktīvām urbšanas platformām. Divas vietas tika izvēlētas esošās naftas atradnēs, kas pieder uzņēmumiem Gazprom un Rosneftj, bet pārējās atrodas naftas, gāzes un citu derīgo izrakteņu atradņu tuvumā. Jāatzīmē: ja urbumus nav iespējams veikt precīzi noteiktajās koordinātēs, ir pieļaujama to pārvietošana par 10–20 km jebkurā virzienā.

Ieteicamās izpētes metodes urbumos :

Lai veiktu kompleksu monitoringu un izpētītu mantijas plumu, izpētes urbumiem jāiegūst šādi parametri:

- 1. Temperatūra** – temperatūras mērījumi dažādā dziļumā, lai analizētu termālās anomālijas un ģeotermālās plūsmas pastiprināšanos magmas kustības un pluma izplatīšanās zonā.
- 2. Spiediens** – spiediena noteikšana urbumos, lai novērtētu hidroloģisko apstākļu izmaiņas magmas un fluīdu fāzes aktivitātes rezultātā.
- 3. Gāzu paraugu ņemšana** – dziļo slāņu gāzu paraugu savākšana, lai izpētītu to sastāvu un iespējamo magmatiskās aktivitātes ietekmi uz tiem.
- 4. Seismiskie pētījumi** – standarta un platjoslas seismisko sensoru uzstādīšana, lai reģistrētu seismisko aktivitāti un izveidotu detalizētu Zemes garozas un mantijas seismotomogrāfiju, nodrošinot pastāvīgu pluma monitoringu.
- 5. Fluīdu slāņa sastāva analīze** – slāņa šķīdumu sastāva izpēte, lai identificētu iespējamo termālo vai magmatisko padevi.
- 6. Ģeomehāniskie pētījumi** – sprieguma mērījumi iežos, lai analizētu litosfēras sprieguma stāvokli un deformācijas, kas rodas pluma iespiešanās rezultātā.
- 7. Elektromagnētiskās metodes** – elektromagnētisko izmaiņu izpēte, lai fiksētu elektrisko īpašību izmaiņas, kas saistītas ar magmas iespiešanos.

Iegūtie dati kalpos par pamatu kompleksas mantijas pluma dinamikas modeļa izveidei, kā arī tā ietekmes novērtēšanai uz ģeoloģiskajiem procesiem Sibīrijā.

Plānotās degazācijas laikā veikto urbumu un magmatisko kanālu bloķēšanas raksturojums

Galvenais urbumu mērķis plānveida degazācijas laikā būs spiediena samazināšana sekundārajās magmatiskajās kamerās, magmas sprādzienu novēršana un kontrolēta gāzu un lavas novadīšana.

Sākotnējā posmā urbšanu veiks operatoru klātbūtnē, jo nelielā dziļumā process ietver standarta tehnoloģiskos uzdevumus ar minimāliem riskiem personālam. Tiks izmantotas tradicionālās urbšanas iekārtas, kas aprīkotas ar temperatūras un spiediena monitoringa sistēmām, nodrošinot procesa kontroli un operatīvu reakciju uz novirzēm no normas.

Sasniedzot kritisku dziļumu un tuvojoties aktīvajām magmatiskās sistēmas zonām, risks cilvēkiem būtiski palielinās. Šajā posmā darbiem pilnībā jāpāriet automatizētā režīmā. Tiks izmantotas specializētas urbšanas iekārtas ar automātisku vadību. Urbšanas procesu regulēs attālināti, izmantojot programmatūru, kas analizē ienākošos datus reāllaikā un koriģē iekārtu darbību.

Lai nodrošinātu precīzāku kontroli, operatori izmantos virtuālās realitātes tehnoloģijas, kas ļaus detalizēti vadīt iekārtas, neatrodoties bīstamajā zonā. Tas samazinās avāriju iespējamību, kas saistītas ar augsta spiediena gāzu izplūdi vai aprīkojuma bojājumiem triecienviļņa ietekmē.

Urbšanas kompleksa un apkārtējās vides stāvokļa monitorings tiks veikts ar dronu un robotu palīdzību. Droni, kas aprīkoti ar kamerām, termovizoriem un sensoriem, fiksēs gāzu noplūdi, termālās anomālijas un seismisko aktivitāti. Roboti, kas darbosies tieši urbšanas zonā, ievāks datus par temperatūru,

spiedienu un vides ķīmisko sastāvu, pārraidot tos uz automatizētajiem vadības centriem. Šīs tehnoloģijas ļaus minimizēt cilvēcisko klātbūtni augsta riska zonā un nodrošinās augstu precizitātes un drošības līmeni.

Pēc urbšanas pabeigšanas nākamajā posmā plānots veikt kontrolētu degazāciju – pakāpenisku spiediena samazināšanu un lielu lavas apjoma novadīšanu. Noslēdzošajās stadijās, pēc būtiska magmas un gāzu daudzuma samazināšanās, var rasties nepieciešamība veikt kontrolētu sprādzienu, lai noslēgtu magmas pacelšanās ceļus. Viena no ierosinātajām metodēm paredz virzītu kodolsprādzienu izurbtajā urbumā. Tā mērķis ir tektonisko spriegumu izlīdzināšana un stabila strukturālo barjeru izveide, kas bloķētu magmatiskos kanālus.

Šāda pieeja paredz iežu sagraušanu augsta sprieguma zonās, kam seko to sakausēšana un atdzišana siltumenerģijas ietekmē. Tas izveidos monolītu barjeru, kas varēs pilnībā vai daļēji bloķēt magmas izkļūšanu uz virsmas. Termodinamiskā iedarbība var arī samazināt tektonisko spriegumu, tādējādi mazinot turpmāko izvirdumu iespējamību.

Kodolsprādzienu īstenošana prasa ārkārtīgi precīzus aprēķinus, ieskaitot litostatiskā spiediena, iežu cietības un blīvuma, kā arī magmatiskā izkausējuma īpašību novērtējumu. Šie faktori ir jāņem vērā, lai nodrošinātu maksimālu metodes efektivitāti un minimizētu iespējamos riskus.

Optimālā laika izvēle urbumu veikšanai plānotās degazācijas laikā

Pašlaik mūsu speciālisti koncentrējas uz optimālo laika grafiku izpēti urbšanas darbu veikšanai plānotajā degazācijā. Lai gan pagaidām ir pārāgri izdarīt galīgos secinājumus, sākotnējie aprēķini jau norāda uz iespēju precīzi noteikt vislabvēlīgāko brīdi degazācijas uzsākšanai. Iegūtie rezultāti liecina, ka, pareizi nosakot laiku, komplikāciju risks var tikt samazināts vairākas reizes.

Urbšanas procesā jāņem vērā ne tikai iežu fizikālās un mehāniskās īpašības (stiprība un plaisāšana), bet arī laika faktori, kas saistīti ar debess mehāniku. Aprēķiniem jābalstās uz Zemes stāvokļa analīzi ekliptikā, Mēness fāzēm, tādu lielo planētu kā, piemēram, Jupitera

izvietojumu, kā arī pašreizējo Saules aktivitātes līmeni. Turklāt būtisks faktors ir dziļfokusa zemestrīču monitorings reģionā, kur plānots veikt urbšanu, jo tās var ievērojami palielināt vietējo seismisko aktivitāti.

Pašlaik ir izveidojies vispārējs priekšstats par procesa mehānismu un svarīgākajām likumsakarībām, tomēr šie dati prasa tālāku daudzkārtīgu pārbaudi. Iegūtie rezultāti ne tikai rūpīgi jāpārbauda mūsu zinātniskajai grupai, bet arī jāapstiprina ar neatkarīgiem pētījumiem un citu speciālistu izstrādātiem modeļiem.

Iespējamie plānotās Sibīrijas pluma degazācijas rezultātu scenāriji

Plānveida Sibīrijas pluma degazācijas gaitā ir iespējami trīs galvenie scenāriji, kas izstrādāti, ņemot vērā divas projekta stadijas: agrīno un vēlīno posmu. Apskatīsim tos sīkāk.

1. Minimāls kaitējums Krievijas teritorijai

Ja degazācijas un liekās lavas novadīšanas process tiks modelēts starptautiskas ekspertu komandas vadībā un visi aprēķini tiks veikti precīzi, ņemot vērā visas ģeoloģiskās īpatnības, abi degazācijas posmi noritēs bez avārijām

un sarežģījumiem. Šajā gadījumā kaitējums Krievijas teritorijai būs minimāls: iespējamie zaudējumi varētu sasniegt 5–7% no valsts platības, ārkārtējā gadījumā līdz 10% (bojājumu rādiuss aptuveni 500–600 km). Šī scenārija ietvaros iespējams pasargāt lielās Krasnojarskas apgabala pilsētas un novērst cilvēku upurus. Turklāt, ja notikumi attīstīsies labvēlīgi, lavas plūsmas varētu novirzīt Arktikas jūru virzienā, kas ļautu Krievijai paplašināt savu teritoriju, paplašinot piekrastes līniju.

2. Vidējs kaitējums Krievijas teritorijai

Šis scenārijs paredz veiksmīgu degazācijas agrīnā posma norisi, taču vēlīnās stadijās var rasties neparedzētas grūtības, piemēram, pēkšņs gāzu sprādziens vai lavas izvirdums. Tā kā šajā brīdī daļa gāzu un lavas jau būs novadīta, sekas būs mazāk postošas.

Iespējama šķidru bazaltu lavu izplūšana, līdzīgi kā Islandē vai Havaju salās, vai vidējas eksplozivitātes izvirdums. Šādā gadījumā iespējami teritorijas zaudējumi līdz 25–30% (aptuveni 4–5 milj. km²). Sekas varētu skart pilsētas 1 000 km rādiusā no aktīvās zonas.

Tomēr šis scenārijs neizraisītu globālu katastrofu civilizācijai vai neatgriezeniskus postījumus Krievijas teritorijā. Cilvēce spētu pielāgoties jaunajiem klimatiskajiem un ekoloģiskajiem izaicinājumiem.

3. Maksimāls kaitējums Krievijai un visai pasaulei

Šis scenārijs paredz, ka novēlota iniciatīva vai nepietiekama speciālistu kvalifikācija var izraisīt nopietnas problēmas. Pētījumu trūkums, aprēķinu kļūda vai urbšana caur mīkstiem vai plaisājošajiem iežiem var izjaukt operācijas gaitu. Ja sarežģījumi notiks agrīnajā degazācijas posmā, kad ir visaugstākais spiediens kamerās, var notikt viens no diviem katastrofāliem iznākumiem: vai nu tūlītējs visas Sibīrijas pluma sistēmas sprādziens, vai arī lēna, bet plaša lavas izvirduma veidošanās, analogiska Sibīrijas trapu izveidei.

Neskatoties uz šiem potenciālajiem riskiem, šāda scenārija iespējamība ir ārkārtīgi zema, jo ir grūti iedomāties tik sarežģīta projekta īstenošanu bez rūpīgas starptautiskas sagatavošanās.

Optimistiskākais un visiespējamākais scenārijs paredz tikai 5–7% Krievijas teritorijas zaudējumu ar minimāliem postījumiem. Pat ja vēlākos posmos rastos sarežģījumi, zaudējumi varētu pieaugt līdz 25–30%, kas joprojām ir ievērojami labvēlīgāks iznākums nekā bezdarbības sekas. Smagāku postījumu risks plānotās degazācijas laikā gan Krievijai, gan pasaulei ir ārkārtīgi niecīgs.

Plānveida degazācijas īstenošana nodrošinās Krievijai unikālu pieredzi globālo ģeodinamisko risku pārvaldībā, stiprinot tās pozīcijas kā starptautiskai zinātnes un tehnoloģiju līderei. Veiksmīga projekta realizācija demonstrēs valsts spēju risināt planetāra mēroga izaicinājumus un veicinās globālo sadarbību dabas katastrofu novēršanā. Tas ne tikai stabilizēs iekšpolitisko un sociālo situāciju, bet arī stiprinās starptautisko mijiedarbību globālo problēmu risināšanā.

Kontrolēta Sibīrijas pluma degazācija var ietekmēt ne tikai vietējo reģionu, bet arī citas vulkāniskās sistēmas, piemēram, Jeloustonu un stratovulkānus visā pasaulē. Magmatiskie rezervuāri un to dinamika veido vienotu, savstarpēji saistītu globālu tīklu, kas funkcionē kā viena ģeomehāniska sistēma.

Kontrolēta spiediena samazināšana vienā segmentā var mazināt spriegumu magmatiskajos rezervuāros, novēršot ķēdes reakcijas un izvirdumus. To var salīdzināt ar dambja pārplūdes vārtu atvēršanu: izlaižot daļu ūdens kontrolētā veidā, iespējams novērst nekontrolētu pārrāvumu, kas apdraud plašu teritoriju. Līdzīga pieeja degazācijā var veicināt magmatisko sistēmu stabilizāciju globālā mērogā.

Tādējādi kontrolēta plānveida degazācija jebkurā gadījumā paliek vienīgā iespēja glābt gan Krieviju, gan visu cilvēci, kas ir nesalīdzināmi izdevīgāka un saprātīgāka pieeja nekā bezdarbība. Šis scenārijs ļaus izvairīties no globālas katastrofas un dos cilvēcei laiku turpmāko risinājumu izstrādei.

Tomēr, neskatoties uz ievērojamajām perspektīvām, pat veiksmīga optimistiskā scenārija īstenošana būs milzīgs izaicinājums.

Ērtoties nepieciešams jau tagad, jo kavēšanās palielina katastrofisku notikumu iespējamību.

Pārsteidzoši, taču šāda projekta realizācija var saskarties ar iebildumiem pašā Krievijā, ņemot vērā iespējamās infrastruktūras bojājumus un risku zaudēt kontroli pār stratēģiskajiem resursiem.



■ Secinājumi

Sibīrijas plums ir globāls ģeodinamisks drauds, kura mērogs ir pielīdzināms tūkstošiem katastrofālu lielāko supervulkānu izvirdumu. Nekontrolēta izvirduma gadījumā sekas varētu būt planetāra mēroga katastrofa, ieskaitot ledus laikmeta iestāšanos, ekosistēmu iznīcību, infrastruktūras sabrukumu un cilvēces bojāeju. Šie riski nosaka nepieciešamību veikt preventīvus pasākumus, īstenojot plānveida Sibīrijas pluma magmatiskās sistēmas degazāciju.

Bezdarbība rada stihisku un nekontrolējamu izvirdumu draudus, kuru sekas būs katastrofālas ne tikai Krievijai, bet arī visai pasaulei. Kontrolēta spiediena samazināšana magmatiskajās kamerās palīdzēs novērst vissliktākos scenārijus un dos cilvēcei vitāli nepieciešamo laiku ilgtermiņa risinājumu izstrādei.

Turklāt atmosfēras ūdens ģeneratoru tehnoloģijas integrēšana ikdienas lietošanā kopā ar Sibīrijas pluma degazāciju pavērs jaunas iespējas ekoloģiskā līdzsvara atjaunošanai. Tas ļaus attīrīt okeānu no plastmasas, pastiprināt ūdens apriti un atjaunot planētas siltuma līdzsvaru. Šādu kompleksu risinājumu

ieviešana var stabilizēt klimatu un nodrošināt nākotni visai cilvēcei, vienlaikus dodot laiku meklēt risinājumus ārējās kosmiskās ietekmes problēmai, kas izraisa katastrofālus notikumus 12 000 gadu cikla laikā.

Šo uzdevumu risināšanai nepieciešama steidzama starptautiska zinātnieku sadarbība dažādās disciplīnās, tostarp kvantu fizikas jomā, lai izstrādātu un īstenotu kompleksus risinājumus. Tomēr ģeopolitiskie un militārie konflikti kavē šādu sadarbību. Tāpēc ir būtiski noteikt globālu moratoriju karadarbībai un novirzīt militāros resursus katastrofu seku mazināšanai un humānajai palīdzībai. Cilvēcei ir tikai 4–6 relatīvi stabili gadi, lai veiktu nepieciešamās darbības.

Ja tiks radīti apstākļi atklātai sadarbībai, zinātniekiem nebūs jāsāk no nulles, jo jau pastāv reāli pētījumi un izpratne par cēloņsakarībām šajā jomā. Cilvēces nespēja prioritizēt globālo vienotību un zinātnisko sadarbību novedīs pie neatgriezeniskām sekām dzīvībai uz Zemes.

1. pielikums

Seismiskās aktivitātes analīzes metodika ietver datu lejupielādi un speciālu apstrādi, izmantojot informāciju no Starptautiskā Seismoloģijas centra (International Seismological Centre – ISC) tīmekļa vietnes. Tā kā dati ietver dažādus avotus no dažādām valstīm un pētniecības institūtiem, kā arī dažādus magnitūdu veidus (Mw, Ms, Mb, ML, MD u.c.), tika izstrādāts noteikts datu apstrādes algoritms, lai izvēlētos piemērotāko magnitūdas veidu no dažādiem avotiem.

Mēs izmantojam divas dažādas pieejas:

1. Tekstā minētā **speciālā mediānas magnitūdas algoritma** metode paredz izvēlēties vēlamu magnitūdas novērtējumu un iekļaut notikumu datu kopā tikai tad, ja izvēlētais novērtējums atbilst noteiktajam magnitūdas diapazonam. Magnitūdas vērtība tiek noteikta, meklējot starp šādiem magnitūdu tipiem šādā prioritārā secībā: Mw, ML, MS, Mb, MD, MV.

Ja vienam notikumam pastāv vairāki izvēlēti magnitūdas tipa vērtējumi, mediānas aprēķinā tiek izmantoti visi šī tipa magnitūdas novērtējumi attiecīgajam notikumam.

Ja konkrētajam notikumam nav pieejams neviens no augstāk uzskaitītajiem magnitūdas tipiem (kas ir reti un attiecas tikai uz dažiem procentiem no visiem datubāzes notikumiem), tiek izvēlēts jebkurš magnitūdas novērtējums, kura vērtība atbilst mediānai, kas aprēķināta

no visiem pieejamajiem magnitūdas tipiem šim notikumam.

2. Ar tekstā minēto **maksimālās magnitūdas algoritmu** tiek izvēlēts tas magnitūdas novērtējums, kas ir visaugstākais no visiem pieejamajiem magnitūdas lielumiem konkrētajam notikumam.

Pirmais algoritms parasti nedaudz samazina magnitūdas lielumu salīdzinājumā ar augstāko reģistrēto lielumu. Tomēr pieredze rāda, ka mediānas magnitūdas algoritms nodrošina uzticamu Gūtenberga-Rihtera likuma un citu seismisko likumsakarību ievērošanu, kā arī labi saskan ar datiem no citām seismoloģiskajām datubāzēm, piemēram, ASV Ģeoloģijas dienesta (USGS) un Apvienotajiem seismoloģisko pētījumu institūtiem (IRIS).

Otrais algoritms ļauj novērtēt zemestrīču skaitu, kuras reģistrējis kāds pētniecības institūts ar magnitūdas vērtību, kas pārsniedz noteikto sliekšni. Šāda pieeja palīdz identificēt tendences zemestrīču skaita izmaiņās izvēlētajā magnitūdu diapazonā.

Visi grafiki, kas parādīti sadaļā “Seismiskās aktivitātes pieaugums kā tektonisko plātņu destabilizācijas pazīme”, tika veidoti, izmantojot pirmo algoritmu – speciālo mediānas magnitūdu algoritmu (44.–75. att.).

Pēc magnitūdas izvēles iegūtie dati tika filtrēti pēc notikumu tipiem ISC datubāzē, lai izslēgtu cilvēka darbības rezultātā izraisītus notikumus, piemēram, kalnrūpniecības darbos radušos sprādzienus, iespējamus sprādzienus, iežu nogruvumus, utt.

No analīzes tika izslēgti šādi notikumu tipi:

km = known mine explosion — zināms sprādziens raktuvē

sm = suspected mine explosion — iespējams sprādziens raktuvē

kh = known chemical explosion (Not standard IMS) — zināms ķīmiskais sprādziens (nestandarta IMS)

sh = suspected chemical explosion (Not standard IMS) — iespējams ķīmiskais sprādziens (nestandarta IMS)

kx = known experimental explosion — zināms eksperimentāls sprādziens

sx = suspected experimental explosion — iespējams eksperimentāls sprādziens

kn = known nuclear explosion — zināms kodolsprādziens

sn = suspected nuclear explosion — iespējams kodolsprādziens

Tā kā Krievijas teritorijā atrodas daudzi kalnrūpniecības uzņēmumi, ISC datubāze tika salīdzināta ar Krievijas Zinātņu akadēmijas Vienotā ģeofiziskā dienesta datiem par 2025. gada janvāri, kurā norādīti visi zināmie sprādzieni un iežu nogruvumi Krievijas teritorijā. Šie notikumi tika izslēgti no analīzes, lai garantētu, ka iegūtajos datos nav palikuši notikumi, kas atbilst sprādzieniem.

Literatūras saraksts

- Arushanov, M. L. (2023). Climate dynamics: Space factors. LAMBERT Academic Publishing.
- Arushanov, M. L. (2023). Causes of Earth's climate change as a result of cosmic impact, dispelling the myth of anthropogenic global warming. *Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft*, 53, 4-14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979>
- Barkin, Y.V. and Lyubushin, A.A. (2007) 'Movement of the Earth's geocenter and its geodynamic content', in Sagitov Readings 2007, Moscow State University, Moscow, 31 January-1 February [Online]. Available at: http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/life/chteniya/sagi2007/SAGITOV_BARKIN_2007.pdf
- Barkin, Yu. V. (2009). Cyclic inversion changes of climate in the Northern and Southern hemispheres of the Earth. In *Geology of Seas and Oceans: Proceedings of the XVIII International Scientific Conference on Marine Geology* (Vol. 3, pp. 4-8). GEOS.
- Barkin, Yu. V. (2011). Synchronous jumps in activity of natural planetary processes in 1997-1998 and their unified mechanism. In *Geology of Seas and Oceans: Proceedings of the XIX International Scientific Conference on Marine Geology* (Vol. 5, pp. 28-32). GEOS.
- Barkin, Yu. V., & Smolkov, G. Ya. (2013). Abrupt changes in trends of geodynamic and geophysical phenomena in 1997-1998. In *Proceedings of the All-Russian Conference on Solar-Terrestrial Physics* (pp. 16-21). Irkutsk.
- Barkin, Yu. V. (2014, September 16). Geofizicheskie sledstviya odnositel'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://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X11007151?via%3Dihub>
- 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://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119507444.ch5>
- Bogoyavlensky, V.I., Nikonov, R.A. & Bogoyavlensky, I.V., 2023. New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: thermokarst lakes with gas blowout craters and mud volcanoes. *AEE*, 13, pp.353–368. Available at: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>
- Bogoyavlensky, V.I., 2023. New data on mud volcanism in the Arctic on the Yamal Peninsula. *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk. Nauki o Zemle*, 512, pp.92–99. Available at: <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>
- Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., ... & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3(5). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Bryson, R. A. (1989). Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115-125. <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

Campbell I.H, Czamanske G.K, Fedorenko V.A, Hill R.I& Stepanov V. 1992 Synchronism of the Siberian Traps and the Permian–Triassic boundary. *Science*. 258, 1760–1763.[doi:10.1126/science.258.5089.1760](https://doi.org/10.1126/science.258.5089.1760).

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

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

Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

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

Nikiforova, M. P., Vargin, P. N., Zvyagintsev, A. M., Ivanova, N. S., Kuznetsova, I. N., & Luk'yanov, A. N. (2016). Ozone mini-hole over the Northern Urals and Siberia. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation*, 360, 168–180. In *Proc. of the Hydrometeorological Conf.*, February 9–10, Vol. 4, 91–96. Voronezh: Nauchno-Issledovatelskie Publikatsii.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Federal Research Center, Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, n.d. Available at: <http://www.ceme.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., Paleskii, S.V., Nikolaeva, I.V., 2013. Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism. *Earth-Science Reviews*, 122, pp.58–76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>

Khain V.E *Geology of the USSR, Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde*. 1985 Berlin-Stuttgart, Germany:Gebrüder Bornträger.

Kirdyashkin, A.A. & Kirdyashkin, A.G., 2013. Interaction of a Thermochemical Plume with Mantle Free-Convective Flows and Its Influence on Mantle Melting and Recrystallization. *Geology and Geophysics*, 54(5), pp.707–721

Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3(5). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>

Konstantinov, K. M., Bazhenov, M. L., Fetisova, A. M., & Khutorskoy, M. D. (2014). Paleomagnetism of trap intrusions, East Siberia: Implications to flood basalt emplacement and the Permo–Triassic crisis of biosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 242-253. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029>

Koptev, A., & Cloetingh, S. (2024). Role of Large Igneous Provinces in continental break-up varying from “Shirker” to “Producer.” *Communications Earth & Environment*, 5, 27. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01191-9>

Koulakov, I. Y. (2008). Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia from regional seismic tomography. *Russian Geology and Geophysics*, 49(3), 187-196. <https://pubs.geoscienceworld.org/nsu/rgg/article-abstract/49/3/187/588930/Upper-mantle-structure-beneath-southern-Siberia?redirectedFrom=fulltext>

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*,

Mazaud, A. & Laj, C., 1991. The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test. *Earth and Planetary Science Letters*, 107(3–4), pp.689–696. Available at: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90111-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T)

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

Mikhailova, R. S., Ulubieva, T. R., & Petrova, N. V. (2021). The Hindu Kush earthquake of October 26, 2015 with $M_w=7.5$, 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>

Nikiforova, M.P., 2017. Extremely low total ozone values over the northern Ural and Siberia in the end of January 2016. *AOO*. Available at: doi:10.15372/AOO20170102

Ostle, C., Thompson, R. C., Broughton, D., Gregory, L., Wootton, M., & Johns, D. G. (2019). The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. *Nature Communications*, 10(1622). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

Popykina, A., Ilin, N., Shatalina, M., Price, C., Sarafanov, F., Terentev, A., & Kurkin, A. (2024). Thunderstorms near the North Pole. *Atmosphere*, 15(3), 310. <https://doi.org/10.3390/atmos15030310>

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

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

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

Roshydromet. (2022). Report on climate features in the Russian Federation for 2021. Moscow: Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

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

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

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

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

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

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

Smolkov, G. Y. (2020). Heliogeophysical research. *Heliogeophysical Research*, 25, 14-29. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569>

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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