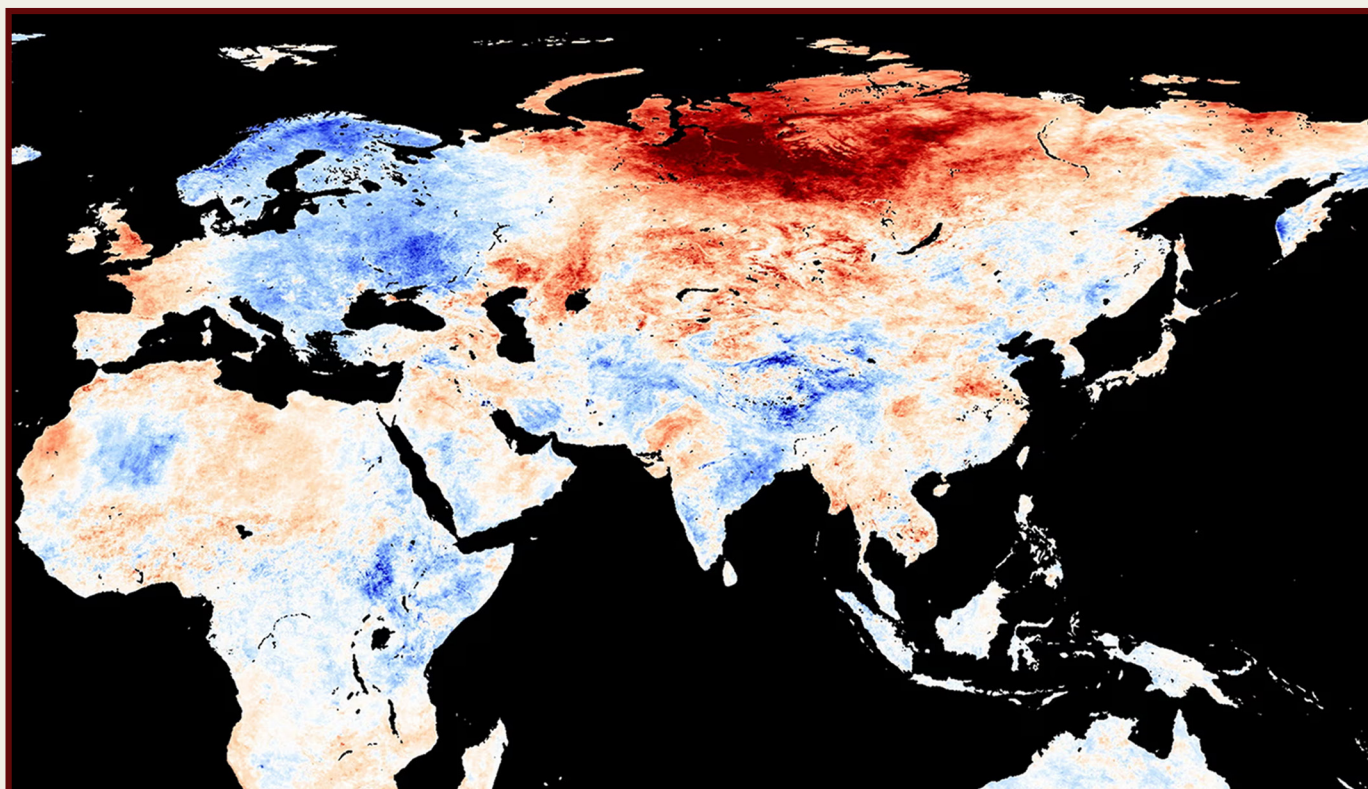


APIE MAGMOS PLIUMO

IŠSIVERŽIMO SIBIRE GRĖSMĖ

IR ŠIOS PROBLEMOS SPRENDIMO BŪDUS



APIE MAGMOS PLIUMO

IŠSIVERŽIMO SIBIRE GRĖSMĘ

IR ŠIOS PROBLEMOS SPRENDIMO BŪDUS

TURINYS

Trumpa geodinaminio klimato kaitos modelio Žemėje dabartiniu laikotarpiu apžvalga	4
Branduolio poslinkis į Sibirą 1998 m.	16
Sibiras ir Sibiro Arktis kaista 3-4 kartus greičiau nei likusi pasaulio dalis	21
Netiesioginiai Sibiro pliumo kilimo požymiai	25
Amžinojo įšalo tirpimas	27
Purvo vulkanizmo apraiškos	29
Dirvožemio įšilimas	31
Oro temperatūra prie žemės paviršiaus.....	32
Žaibų aktyvumo padidėjimas	34
Ozono sluoksnio nykimas	36
Magmos pliumo struktūra, galimi matmenys ir lokalizacija, remiantis paskelbtais ir stebėjimų duomenimis	38
Magmos pliumo lokalizacija	44
Padidėjęs seisminis aktyvumas - tektoninių plokščių destabilizacijos indikatorius	48
Sibiro pliumo išsiveržimo neišvengiamumo įrodymai	72
1 scenarijus. Vieno etapo Sibiro pliumo išsiveržimas	73
Superugnikalnių ir vulkaninių sistemų suaktyvėjimas.....	80
Rūgštūs lietūs	82
Vulkaninė žiema	83
2 scenarijus. Laipsniškas Sibiro pliumo išsiveržimas	85
Laipsniško Sibiro pliumo proveržio pasekmės Rusijai	90
Laipsniško Sibiro pliumo plyšimo pasekmės visam pasauliui	91
Ilgalaikės laipsniško Sibiro pliumo plyšimo pasekmės planetai	92
3 scenarijus: planinis ir kontroliuojamas degazavimas	93
Esami vulkaninės geoinžinerijos metodai	93
Sibiro pliumo planinės degazacijos programos pavyzdys	100
Mokslinių tyrimų gręžinių, skirtų šiuolaikinio Sibiro magminio pliumo dinamikai stebėti, vietos pasirinkimo pagrindimas	102
Magminių kanalų gręžimo ir blokavimo ypatumai planuojamo degazacijos proceso metu	105
Optimalaus gręžinių gręžimo laiko parinkimas planuojamų degazavimo operacijų metu	106
Planuojamos Sibiro pliumo degazacijos rezultatų scenarijai	106
Išvados	109
Priedas 1	110
Literatūros sąrašas	112

Trumpas geodinaminio klimato kaitos Žemėje dabartiniu laikotarpiu modelio aprašymas

Per pastaruosius 30 metų Žemė patyrė beprecedentį ir sinchronišką klimato pokyčių, anomalijų ir ekstremalių reiškinių augimą visuose planetos apvalkaluose ir geofiziniuose parametruose. Šių pokyčių pažanga spartėja eksponentiškai. Išsami mokslinių duomenų analizė rodo, kad pagrindinės visų Žemės apvalkalų anomalijų didėjimo priežastys yra astronominiai ciklai, kurie Saulės sistemoje vyksta kas 12 000 metų.

Išorinės astronominės įtakos hipotezę patvirtina tai, kad kitose Saulės sistemos planetose ir jų palydovuose stebimos panašios klimato, geodinaminės ir magnetinės anomalijos, kurios dabartiniu laikotarpiu vyksta sinchroniškai su pokyčiais Žemėje. Pavyzdžiui, Urane, Jupiteryje ir Veneroje užfiksuotas vėjo greičio ir uraganų dydžio padidėjimas. Tuo pat metu Marse stebimas ledo kepurų tirpimas

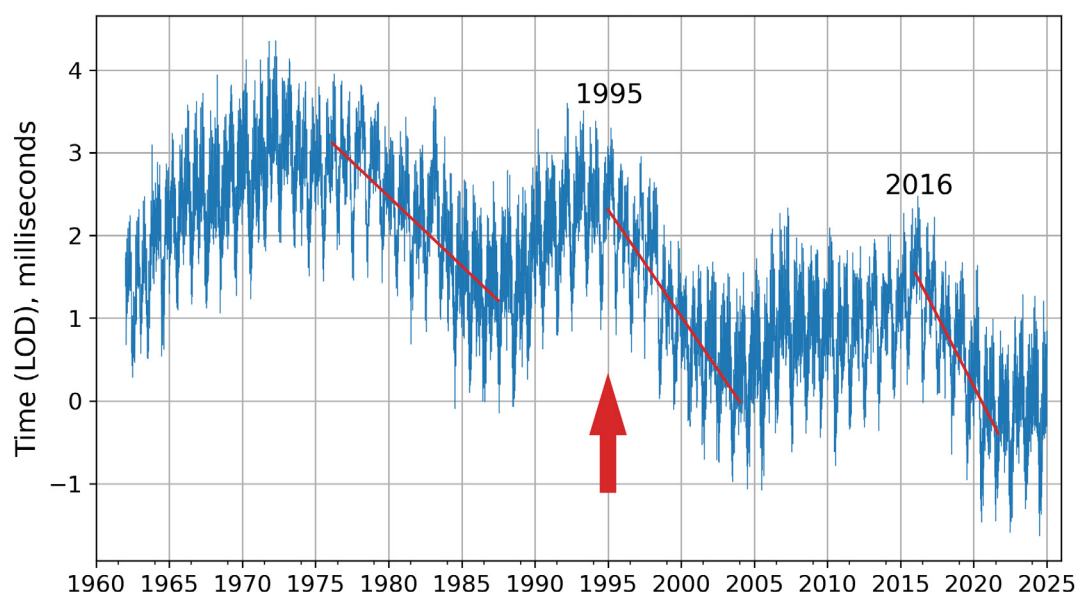
ašigaliuose, o Veneroje ir Marse toliau didėja vulkaninis aktyvumas. Be to, Marse didėja seisminis aktyvumas, o tai rodo anomalaus geodinaminio aktyvumo atsiradimą.

Kritiniai Žemės sistemos pokyčiai dėl dabartinio 12 000 metų astronominio ciklo prasidėjo 1995 m., kai buvo užfiksuotos reikšmingos geofizinės anomalijos, įskaitant staigų Žemės sukimosi pagreitėjimą (1 pav.) ir jos ašies pasislinkimą (2 pav.), prasidėjusį staigų šiaurinio magnetinio poliaus dreifą (3 pav.). Šie pokyčiai rodo reikšmingus Žemės branduolio pokyčius.

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.

Dienos trukmės nuokrypis



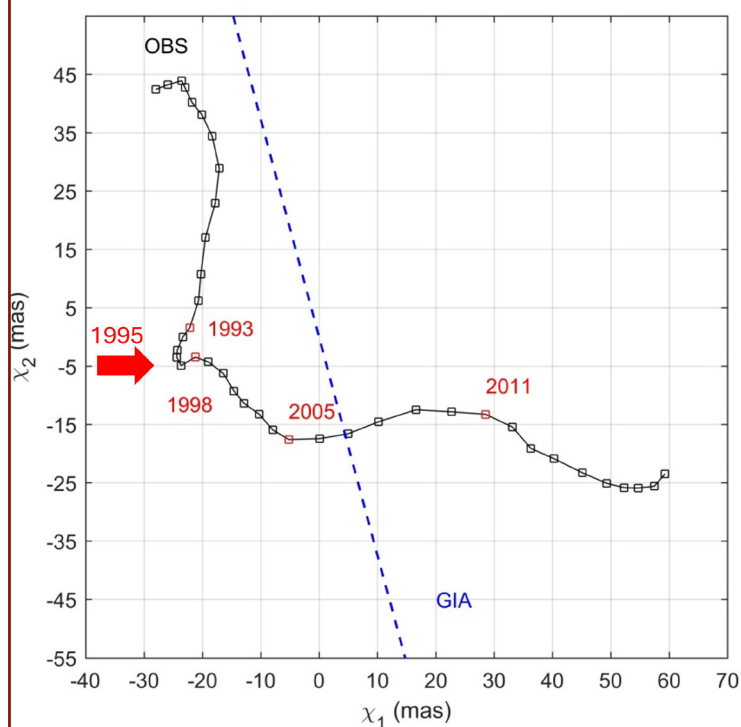
1 pav.

Dienos ilgio nuokrypis milisekundėmis nuo 1962 iki 2023 m. Duomenų šaltinis: Paryžiaus observatorijos IERS Žemės orientacijos centras.

Dienos ilgis - Žemės orientacijos parametrai:

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

Paveikslėlyje raudonos linijos yra tendencijos linijos, rodančios, kaip sparčiai trumpėja diena. Pavyzdžiui, kairėje esanti linija yra švelnesnė, o dešinėje esanti linija, 2016 m. pagreičio linija, jau yra beveik vertikali, o tai reiškia, kad diena trumpėja daug kartų greičiau, o tai reiškia, kad planeta sukasi greičiau.



2 pav.

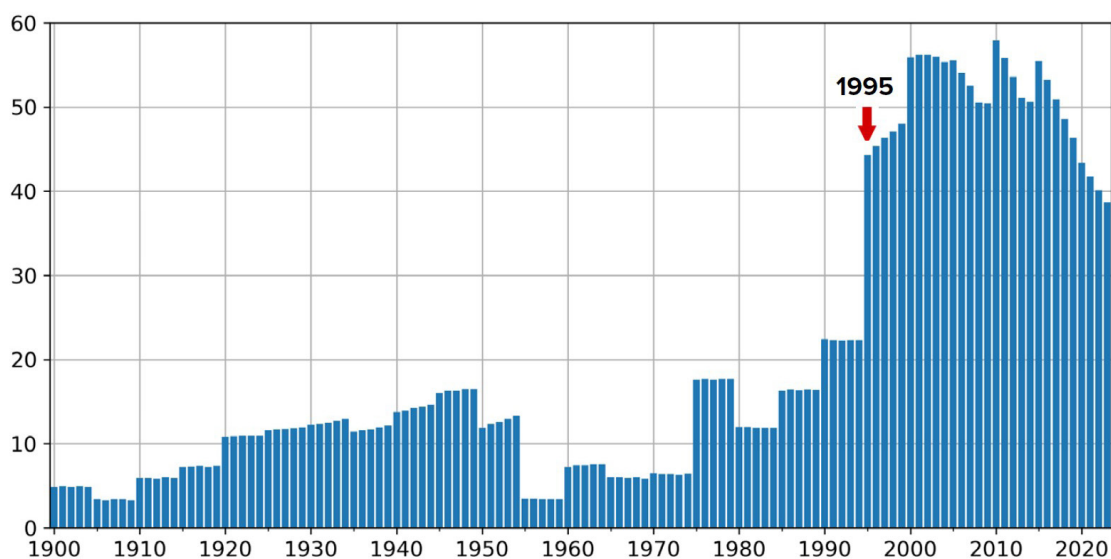
Ilgalaikė stebimo sužadinimo trajektorija pašalinus metinius ir Čandlerio ciklus taikant slenkančio vidurkio metodą.

Juoda linija su kvadratais: stebima trajektorija; mėlyna punktyrinė linija: poliarinio dreifo kryptis dėl ledynmečio izostatinio koregavimo (GIA).

Nustatytas slankiojo vidurkio poaibio dydis - 84 mėnesiai, kuris yra mažiausiai bendras 12 mėnesių (metinis ciklas) ir 14 mėnesių (Čandlerio ciklas) kartotinis, kaip nurodyta Liu ir kt. tyrime (2017).

Šaltinis: 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>

Šiaurės magnetinio poliaus greitis (km/metus)



3 pav.

Šiaurės magnetinio poliaus dreifo greitis (km per metus)

Šaltinis: NOAA duomenys apie Šiaurės magnetinio poliaus padėtį

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

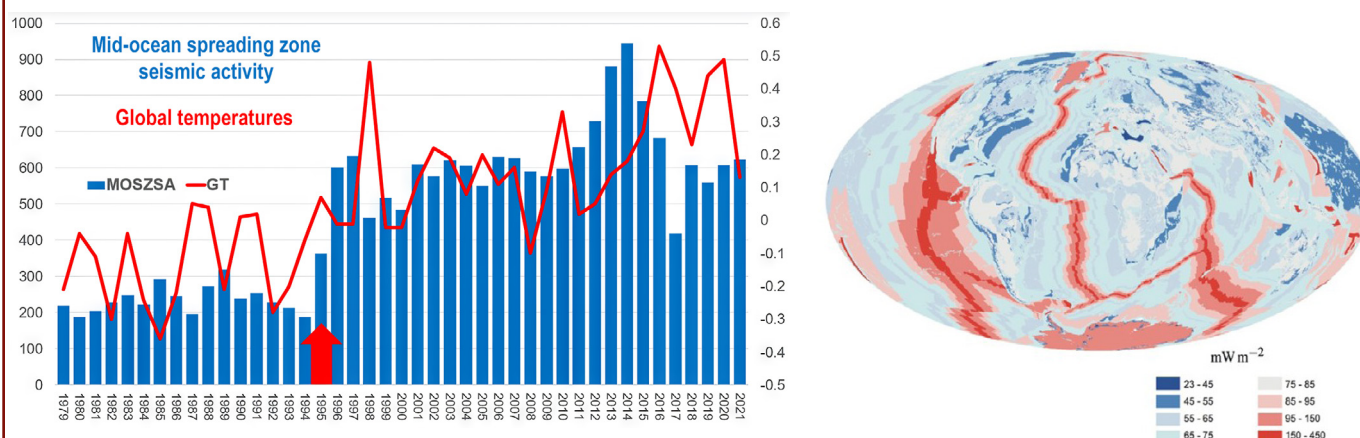
Pagal šią hipotezę Saulės sistema tuo metu įžengė į sritį, kurioje išorinės kosminės jėgos pradėjo daryti didelę įtaką planetų branduoliams. 1995 m. pastebėti Žemės branduolio pokyčiai rodo, kad padidėjo išorinio branduolio įkaitimas, o tai reiškia, kad Žemės branduolį pradėjo pasiekti papildoma energija. Tokiems esminiams Žemės branduolio pokyčiams reikia energijos sąnaudų, kvadrilijonus kartų viršijančių visą žmonijos civilizacijos kada nors per visą jos egzistavimo laikotarpį pagamintą energiją.

Išorinės energijos patekimas į Žemės branduolį paskatino procesus, susijusius su mantijos lydymusi ir magmos kilimu į paviršių. Tai savo ruožtu sukėlė grandininę seismo ir vulkaninio aktyvumo reakciją, padidėjusį šilumos sklaidimą iš Žemės gelmių ir su klimatu susijusių nelaimių skaičių visame pasaulyje.

Pavyzdžiui, nuo 1995 m. pastebėtas žymus seismo aktyvumo padidėjimas, kuriam būdingas didesnis žemės drebėjimų dažnis, stiprumas ir energija. Ši tendencija paveikė ir žemyninius regionus, ir vandenyno dugną (4 pav.), įskaitant teritorijas, kurios anksčiau buvo laikomos seismiškai neaktyviomis, o tai rodo, kad šie pokyčiai yra pasaulinio pobūdžio.

Svarbu pažymėti, kad 5,0 balų ir stipresnių žemės drebėjimų skaičiaus augimas nėra susijęs su seisminės stebėsenos technologijų pažanga (5 pav.), o atspindi tikrus Žemės geodinaminės sistemos pokyčius. Tarptautinio seismologijos centro sukaupiti duomenys patvirtina, kad per pastaruosius 25 metus žemės drebėjimų skaičius gerokai padidėjo ir toliau didėja (6 pav.).

Vandenyno dugno žemės drebėjimų padažnėjimas palei vidurio vandenyno keteras



4 pav.

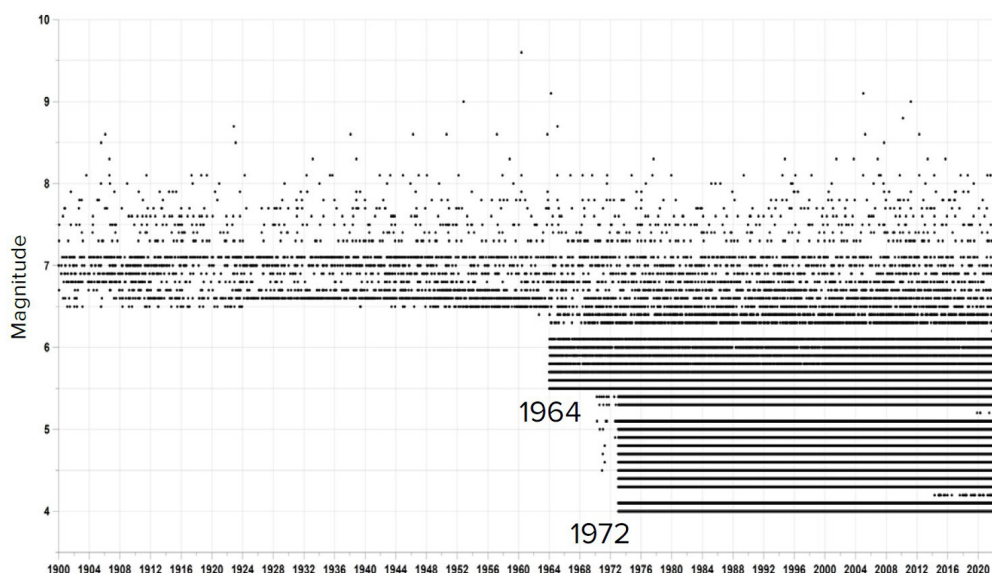
Vienu metu didėjantis vandenyno dugno žemės drebėjimų ir pasaulinės atmosferos temperatūros augimas (kairėje)

Geoterminis vandenyno vidurio keterų išilimas (dešinėje)

Šaltinis: 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>

Diagramoje pavaizduotas staigus vandenyno dugno žemės drebėjimų skaičiaus padidėjimas nuo 1995 m., taip pat pastebimas stiprus ryšys tarp vandenyno dugno seisminio aktyvumo ir atmosferos temperatūros. Tai rodo papildomą giluminį šilumos šaltinį, darantį įtaką ir vandenynams, ir atmosferai.

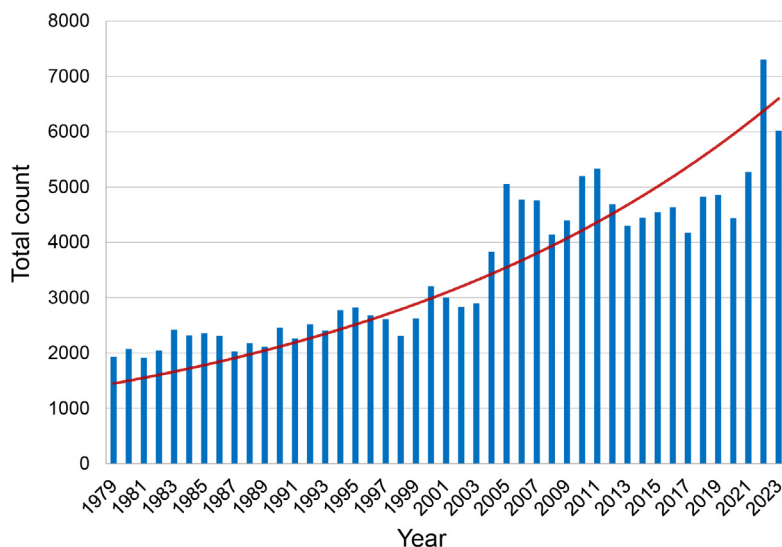


5 pav.

Laikui bėgant užfiksuoti žemės drebėjimų stiprumai juodais taškais pažymėti skirtingų stiprumų žemės drebėjimai skirtingais metais.

Iki 1964 m. buvo registruojami tik 6,5 ir didesnio stiprumo žemės drebėjimai. Nuo 1964 m., pradėjus naudoti jautresnius jutiklius, buvo fiksuojami 5,5 ir didesnio stiprumo žemės drebėjimai. Nuo 1972 m. nuolat registruojami 4,0 balo ir stipresni žemės drebėjimai, nepriklausomai nuo vietovės.

M5+ žemės drebėjimai 1979-2023, ISC



6 pav.

M5+ žemės drebėjimai 1979-2023 m.

Šaltinis: ISC duomenų bazė.

Duomenų rinkinys sudarytas taikant didžiausio stiprumo algoritmą, kiekvienam įvykiui parenkant didžiausią ISC duomenų bazėje užfiksuotą stiprumo reikšmę (žr. 1 priedą).

Be to, seisminis aktyvumas šalia ugnikalnių didėja, įskaitant tokius superugnikalnius kaip Jeloustounas (JAV), Kampi Flegrejus (Italija), Taupo (Naujoji Zelandija) ir kitus, kurie išsiveržė per ankstesnius 12 000 metų ciklus. Bendras ugnikalnių išsiveržimų dienų skaičius taip pat didėja, o kartu daugėja ir anomalijų išsiveržimų. Šių įvykių metu išsiveržusi lava yra perkaitinta ir pasižymi netipiška sudėtimi, būdinga magmai iš gilesnių mantijos sluoksnių.^{3,4,5,6,7}

Ypatingas dėmesys atkreipiamas į vis dažniau pasitaikančius giliojo židinio žemės drebėjimus, vykstančius didesniame nei 300 kilometrų (186

mylių) gylyje, o kartais - iki 750 kilometrų (466 mylių) po Žemės paviršiumi. Šie įvykiai kyla ne Žemės plutoje, o mantijoje, kur medžiaga paprastai deformuojasi tolygiai, o ne trūkinėja. Dėl to tokių žemės drebėjimų pobūdis yra labai neįprastas.

Atsižvelgiant į itin didelį slėgį ir temperatūrą šiuose gyliuose, šiuos reiškinius galima suprasti kaip galingus sprogius, savo energija prilygstančius kelių atominių bombų sprogimui vienu metu Žemės mantijoje. Be to, giluminiai žemės drebėjimai dažnai sukelia didelius seisminius įvykius Žemės plutoje, todėl sustiprėja jų griaujamasis poveikis.^{8,9}

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

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

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

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

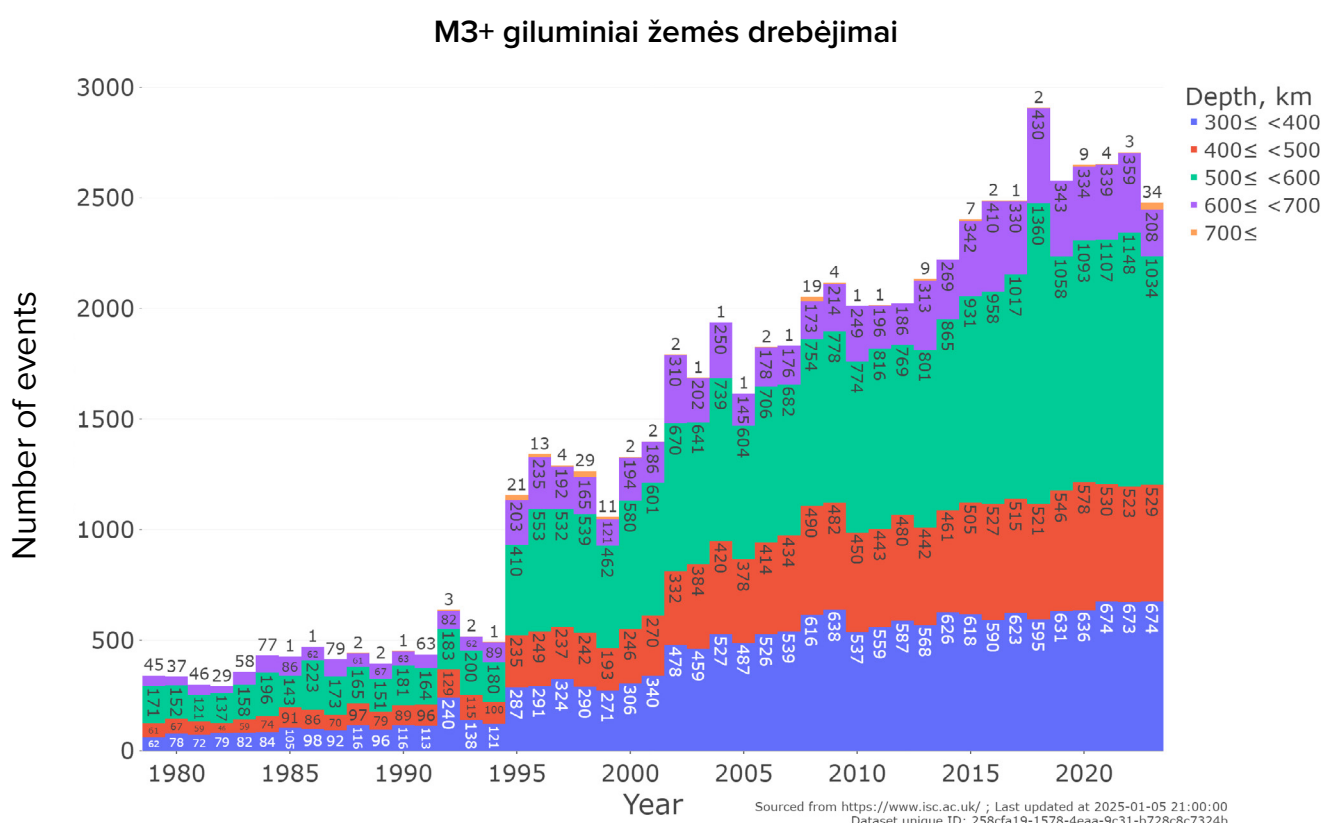
⁷D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports*, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>

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

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

Nuo 1995 m. tokių giliųjų žemės drebėjimų skaičius sparčiai eksponentiškai didėjo (7, 8 pav.), o tai sutampa su kitomis tuo pačiu laikotarpiu prasidėjusiomis geodinaminėmis anomalijomis. Šių vidinių mantijos sprogimų padažnėjimas rodo,

kad Žemės gelmėse didėja energijos kiekis ir intensyvěja mantijos lydymasis, galintis sukelti didelio masto ugnikalnių išsiveržimus.



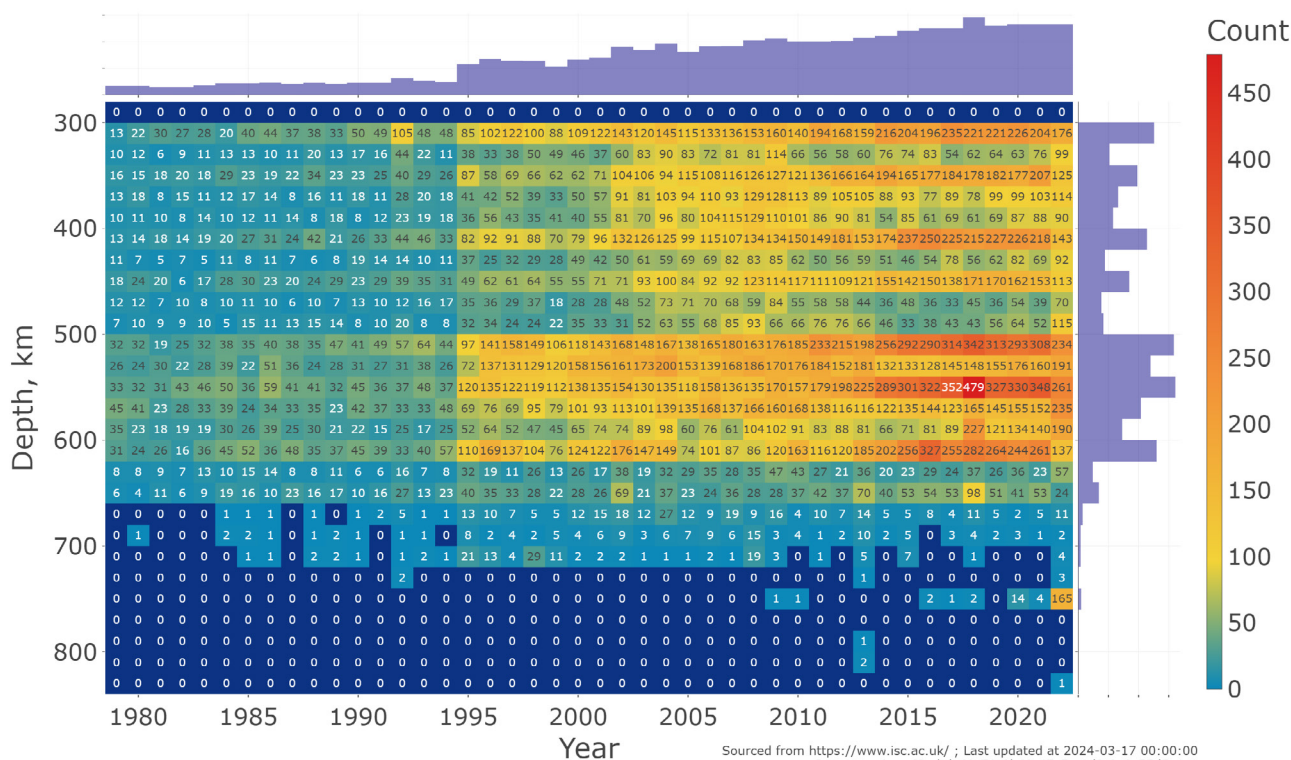
7 pav.

Nuo 1979 m. pasaulyje įvykusių gilaus židinio M3+ žemės drebėjimų skaičiaus eksponentinis augimas. Grafikas sudarytas pagal ISC duomenų bazėje esančių kiekvieno įvykio duomenų atranką specialiuoju medianos magnitudės algoritmu (žr. 1 priedą).

Šaltinis: ISC duomenų bazė.

Diagramoje pavaizduotas geometrinis žemės drebėjimų skaičiaus didėjimas didesniame nei 300 kilometrų gylyje Žemės viršutinėje mantijoje - regione, kuris tradiciškai laikomas plastišku ir negalinčiu skilti. Žymus šuolis pastebimas nuo 1995 m., sutampantis su panašiu daugelio kitų geodinaminų anomalijų padidėjimu. Pažymėtina, kad giluminių žemės drebėjimų skaičiaus didėjimas nesusijęs su seisminės stebėsenos jutiklių skaičiaus didėjimu.

M3+ giluminiai žemės drebėjimai



8 pav.

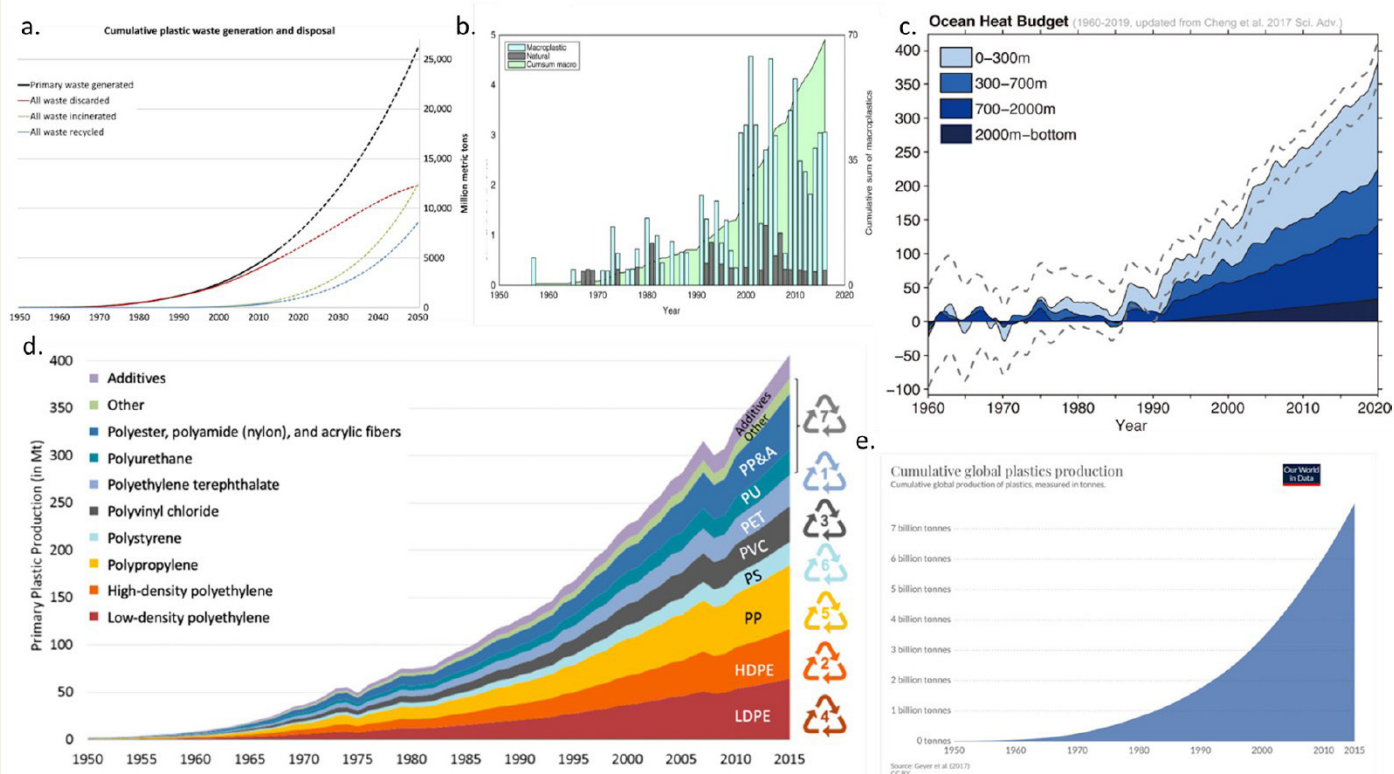
M3+ žemės drebėjimų pasiskirstymas pagal metus ir gylį

Šaltinis: ISC duomenų bazė.

Giluminių žemės drebėjimų padažnėjimas rodo, kad lydosi nuo branduolio įkaitusi mantija. Dėl išcentrinųjų jėgų išsilydžiusi magma mantijoje pradeda smarkiai kilti Žemės paviršiaus link. Šis judėjimas pagreitintai ardo ir kaitina litosferą iš vidaus. Magmos kilimas tiesiogiai lemia didėjančią geoterminį srautą iš planetos vidaus ir magmos pliūmų suaktyvėjimą po ledynais Vakarų Antarktidoje ir centrinėje Grenlandijos dalyje. Šis procesas gerokai paspartina ledynų ir amžinojo įšalo tirpimą iš apačios į viršų.

Šiandien vandenynas šyla kaip niekada anksčiau, todėl labai suintensyvėja ekstremalūs

gamtos reiškiniai, tokie kaip potvyniai, uraganai ir atogrąžų ciklonai. Vandenynui tenka itin svarbus vaidmuo reguliuojant planetos šilumą, nes jis gali sugerti ir perskirstyti šilumos perteklių, taip užkirsdamas kelią katastrofiškoms pasekmėms. Tačiau dabar, kai dėl geodinaminio aktyvumo, kurį lemia astronominiai ciklai, Žemės įkaitimas intensyvėja, vandenynas prarado savo funkciją šalinti šilumą iš gelmių. Taip atsitiko dėl žmogaus sukeltos vandenynų taršos. Plastiko atliekos skyla į mikroplastiką ir nanoplastiką, todėl sumažėja vandens šiluminis laidumas (9 pav.).



9 pav.

Vandenyno temperatūros pokyčių 1960-2019 m. diagramos ir jų palyginimas su produkcijos augimo diagramomis sintetinių polimerų, jų naudojimo įvairiuose ūkio sektoriuose ir plastiko atliekų šalinimo vandenynė (iš įvairių šaltinių).

a. Bendras plastiko atliekų susidarymas ir šalinimas
Šaltinis: 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. Kumuliacinė makroplastiko suma vandenynė ir metiniai skaičiavimai

Šaltinis: 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. Vandenyno šilumos biudžetas 1960-2019 m.
(Purkey and Johnson, 2010; updated from Cheng et al., 2017)

Šaltinis: 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. Pasaulinė pirminio plastiko gamyba pagal polimerų tipą

Šaltinis: 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. Bendra pasaulinė plastikų gamyba nuo 1950 m.

Duomenų šaltinis: Plastic Marine Pollution Global Dataset

Vandens temperatūra kyla ne tik paviršiuje, bet ir visame gylyje bei vandenyno dugne. Vandenynų įkaitimą sukelia kylanti magma, kuri ypač įkaitina vandenynų plutą, kuri yra plonesnė ir labiau pažeidžiama nei žemyninė pluta.

Istoriniai geologinių ir ledo kernų duomenys rodo, kad Žemė su panašiais katastrofų ciklais susidurdavo kas 12 000 metų.¹⁰ Kas 24 000 metų šios planetos katastrofos buvo gerokai intensyvesnės, kaip rodo vulkaninių pelenų sluoksnių ledo kernuose tyrimai¹¹ (10 pav.) ir kiti geochronologiniai tyrimai. Dabar Žemė įžengia į tokį ciklą. Tačiau dabartinį ciklą sunkina antropogeniniai veiksniai, pavyzdžiui, vandenynų tarša, dėl kurios dar labiau sumažėjo vandenynų gebėjimas reguliuoti Žemės energijos balansą.

Šylant vandenynams, plastiko atliekos skyla į mikroplastikus ir nanoplastikus, kurie dar labiau sumažina vandenynų šilumos laidumą. Šis šilumos laidumo sumažėjimas labai svarbus padidėjusio geodinaminio aktyvumo laikotarpiams, kuriuos lemia astronominiai ciklai. Dėl perteklinės energijos sankaupų Žemės

gelmėse padaugėjo giluminių žemės drebėjimų ir sparčiai formavosi naujos magmos kameros, todėl sustiprėjo planetos nestabilumas. Šis grįžtamasis ryšys spartina Žemės įkaitimą ir destabilizaciją, stumdamas planetą arčiau neišvengiamo sunaikinimo.

Matematinis modeliavimas rodo, kad pasaulio ekonominės ir socialinės sistemos gali žlugti per artimiausius 4-6 metus dėl didėjančios klimato nelaimių žalos. Eksponentinis katastrofinių įvykių skaičiaus didėjimas grasina, kad per ateinantį dešimtmetį Žemė taps netinkama gyventi (11 pav.).

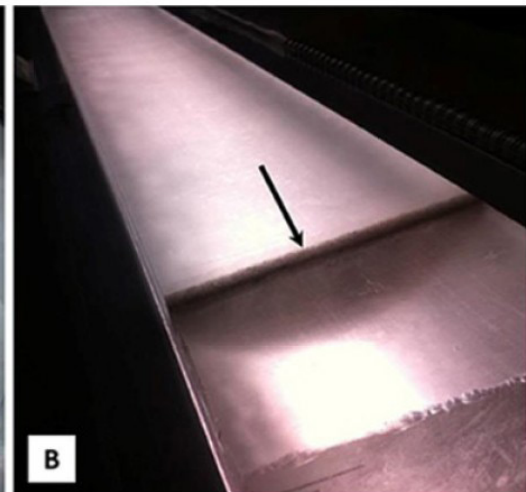
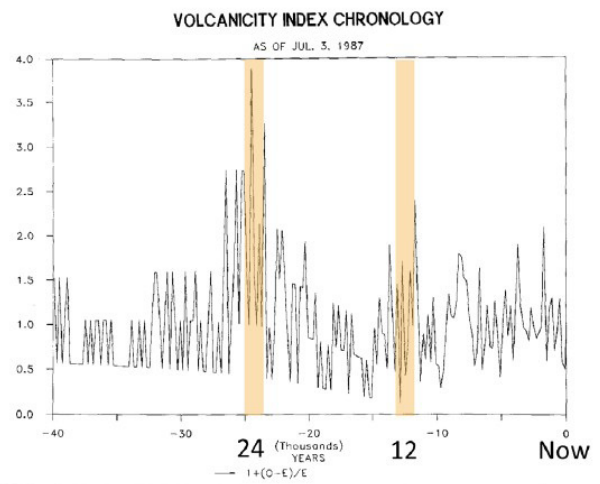
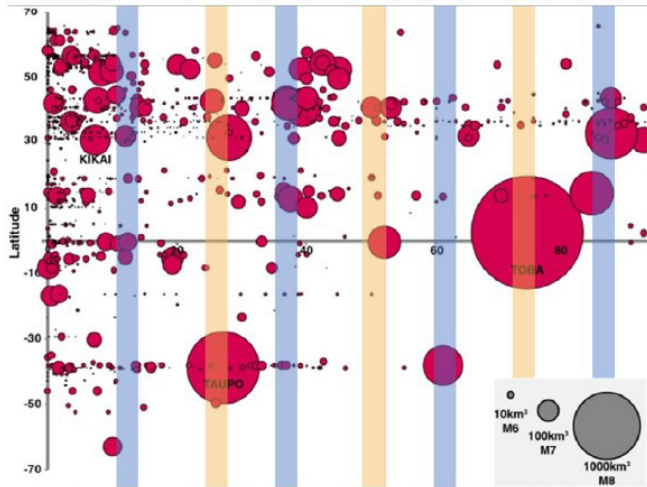
Kitaip nei ankstesniuose cikluose, dabartinę planetos būklę dar labiau blogina žmogaus veiklos sukelta tarša, todėl ekosistemų ir pačios Žemės išlikimui vilčių lieka nedaug. Svarbu suprasti, kad **su vandenynais susijusių problemų sprendimas gali sulėtinti kataklizmų progresavimą, tačiau visiškai jų nesustabdys.**

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 volcaniclastic megabed deposition in the Marsili Basin, Tyrrhenian Sea. *Geology*, 51(11), 1001-1006. <https://doi.org/10.1130/G51198.1>

Katastrofiški ugnikalnių išsiveržimai vyksta 12 000 metų ciklu

Now 12 24 36 48 60 72 84



10 pav.

Tyrimų duomenys apie vulkaninių pelenų sluoksnius, susidariusius per pastaruosius 100 000 metų išsiveržimų metu Antarktidos ir Arkties ledo karnuose, surinkti iš įvairių autorių darbų.

Šaltinis: Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3(5). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>

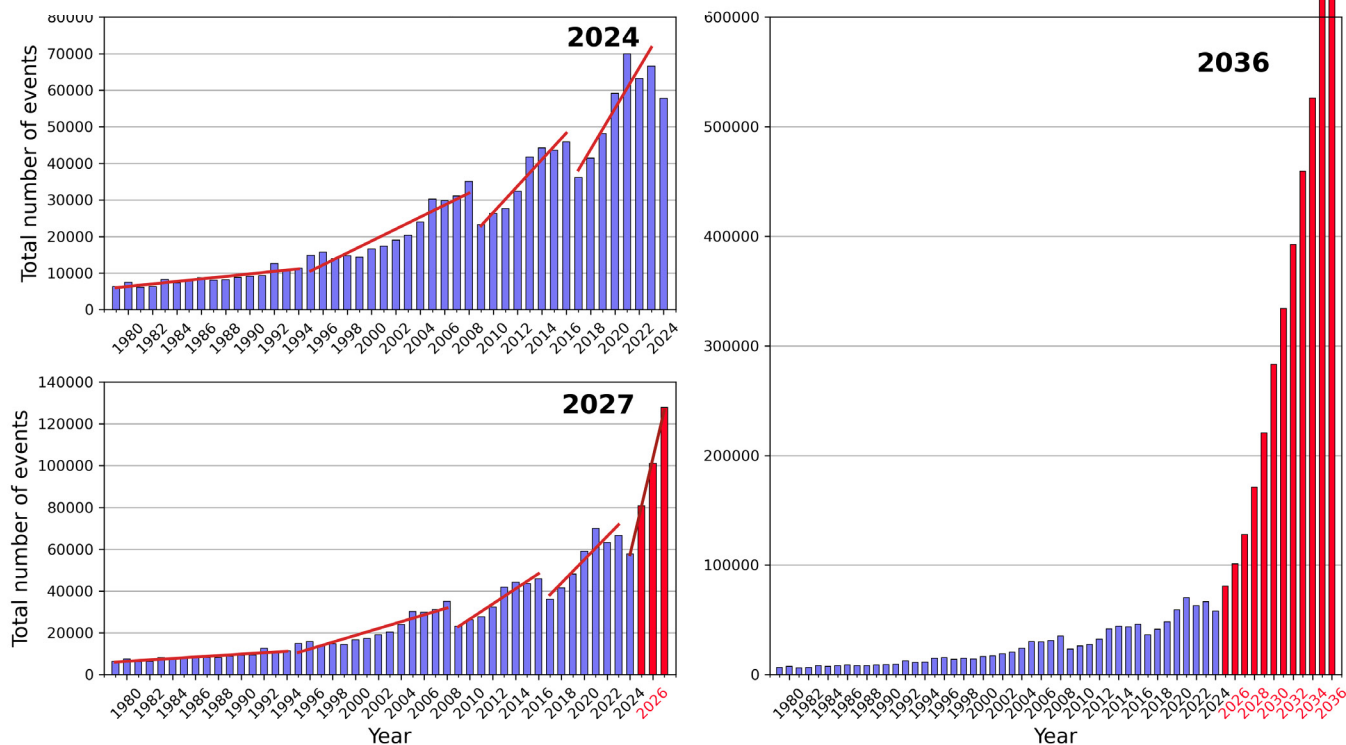
Bryson, R. A. (1989). Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125. <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

Diagramose pavaizduotas kas 12 000 metų vykstantis katastrofiškas ugnikalnių aktyvumas, o dar intensyvesni įvykiai - kas 24 000 metų (atsižvelgiant į datavimo neapibrėžtumą). Šie katastrofiški epizodai lėmė staigius temperatūros svyravimus, stichines nelaimes, vulkanines žiemas ir masinį rūšių išnykimą. Daugelis superugnikalnių, išsiveržusių per ankstesnius ciklus, pastaraisiais metais, ypač nuo 1995 m., pradėjo demonstruoti neįprastą aktyvumą.

Stiprėjančių katastrofų progresavimas, iliustruotas žemės drebėjimais

M3+ pasaulio žemės drebėjimai 1979-2024

volcanodiscovery.com



11 pav.

Gamtinių kataklizmų skaičiaus eksponentinio augimo modelis žemės drebėjimų pavyzdžiu iki 2036 m.

Diagramose parodyta geometrinė žemės drebėjimų dažnio ir stiprumo visame pasaulyje raida, pagrįsta dabartinėmis tendencijomis. Kiekviename vėlesniame etape žemės drebėjimų skaičius

patrigubėja. Prognozuojama, kad iki 2028 m. Žemėje kasdien įvyks 1000 žemės drebėjimų, kurių stiprumas viršys 3,0 balų, palyginti su dabartiniu vidurkiu - 125 tokio stiprumo žemės drebėjimai per dieną.

Labai tikėtina, kad jau po šešerių metų Žemėje kasdien įvyks tokie pat stiprūs žemės drebėjimai kaip 2023 m. vasario 6 d. Turkijoje ir Sirijoje.

Šioje ataskaitoje aptariama papildoma grėsmė, kurią kelia Žemės branduolio pokyčiai, atsirandantys dėl išorinės energijos srauto. 1997-1998 m. mokslininkai, naudodamiesi Žemės masės tyrimų centro palydovų duomenimis, pastebėjo precedento neturintį reiškinį - staigų vidinio planetos branduolio pasislinkimą. Dėl to branduolys migravo į šiaurę trajektorija nuo Vakarų Antarktidos iki Rytų Sibiro ir Taimyro pusiasalio Rusijos Federacijoje. Šis branduolio poslinkis sukėlė nekontroliuojamą magmos kilimą ta kryptimi, todėl po Sibiro sparčiai kilo didžiulis magmos pliumas.

Šiuo metu Sibiro pliumas jau pasiekė Žemės plutos pagrindą šiauriniame Rytų Sibiro kratono regione ir pradėjo kelti plokštę. Tai rodo, kad išsilydžiusi magma pradėjo veržtis į paviršių. Nekontroliuojamas Sibiro pliumo proveržis

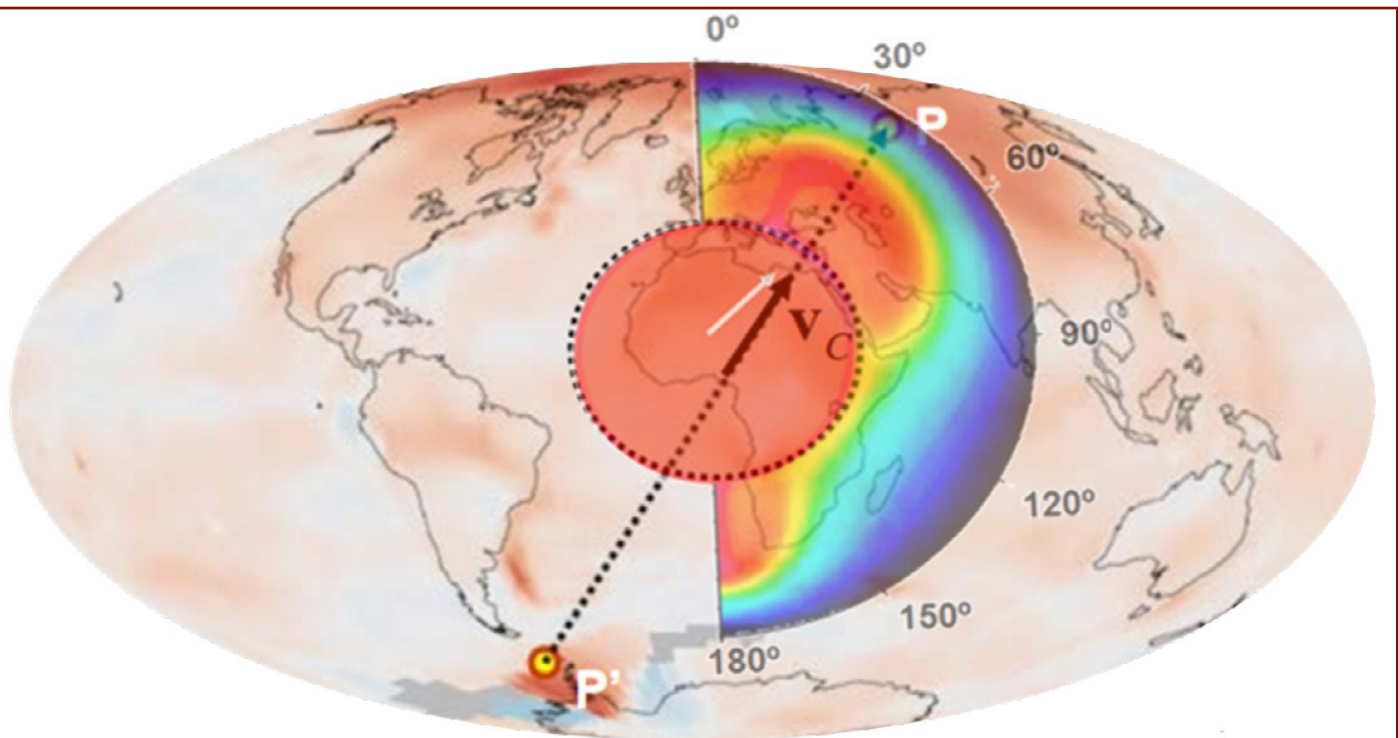
gali sukelti visuotinį išnykimą, nepalikdamas žmonijai jokių galimybių išlikti. Remiantis skaičiavimais, toks išsiveržimas būtų 1 000 kartų galingesnis už didžiausią Jeloustouno superugnikalnio išsiveržimą. Panašus magmos pliumo išsiveržimas Sibire įvyko prieš 250 mln. metų ir sukėlė Didįjį Permo išnykimą.

Šioje ataskaitoje pateikiami trys galimi šios situacijos raidos scenarijai ir siūlomi veiksmai, kaip spręsti didėjančio Sibiro pliumo problemą ir mažinti nekontroliuojamo jo prasiveržimo riziką.

Branduolio poslinkis į Sibirą 1998 m.

1997-1998 m. mokslininkai, tyrinėdami Žemės masės centrą per palydovą, užfiksavo analogų neturintį reiškinį - Žemės vidinio branduolio pasislinkimą.^{12,13} Dėl šio proceso planetos

branduolys pasislinko į šiaurę išilgai linijos nuo Vakarų Antarktidos iki Taimyro pusiasalio Rytų Sibiro šiaurėje (12 pav.).



12 pav.

Branduolio poslinkis 1997-1998 m. ir dėl branduolio poslinkio magmoje atsiradusios šiluminės bangos. (Barkin, Yu. V.)

Žemėlapyje pavaizduotas vidinio branduolio poslinkio vektorius iš Vakarų Antarktidos į Rytų Sibirą, link Taimyro pusiasalio. Schema uždengta atmosferos šiluminių anomalijų žemėlapiu.

Šaltinis: 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.

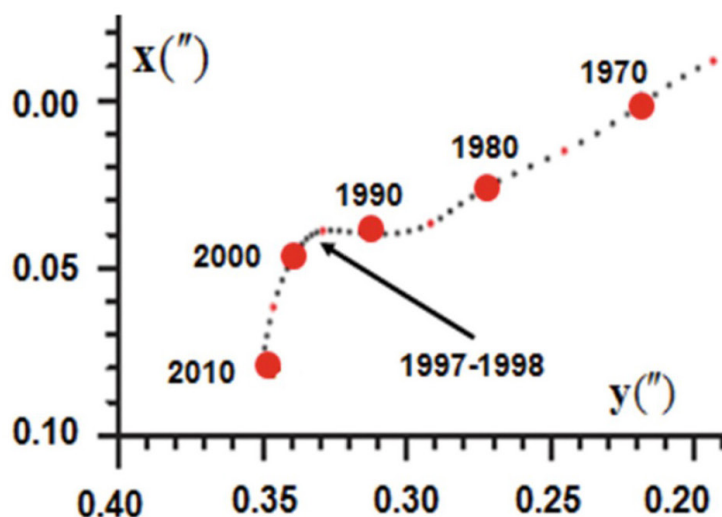
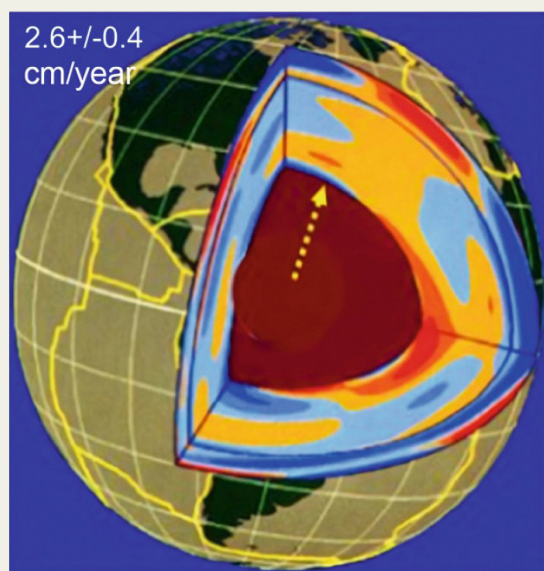
¹³ Smolkov, G. Ya. (2018). Exposure of the solar system and the earth to external influences. *Physics & Astronomy International Journal*, 2(4), 310-321. <https://doi.org/10.15406/paij.2018.02.00104>

Tuo pačiu metu keturios skirtingos tyrimų grupės nepriklausomai užfiksavo nenormalius įvairių Žemės geofizikinių parametrų pokyčius, liudijančius apie šį įvykį. Remiantis palydoviniais duomenimis, Maskvos valstybinio universiteto ir Rusijos mokslų akademijos Žemės fizikos instituto mokslininkų komanda 1998 m.¹⁴ (užfiksavo Žemės masės centro poslinkį (13 pav.).

Žemės sukimosi tarnyba (IERS) užfiksavo staigų planetos sukimosi pagreitėjimą. Tuo pat metu Medicinos stotyje Italijoje mokslininkai užfiksavo staigų gravitacijos pokytį.¹⁵ Tuo pat metu buvo pastebėtas staigus Žemės formos pokytis¹⁶, užfiksuotas naudojant JAV palydovų

lazerinį tolomatį.

Pasak fizikos ir matematikos mokslų daktaro, profesoriaus Jurijaus Barkino, technikos mokslų daktaro, profesoriaus Genadijaus Smolkovo¹⁷, geografijos mokslų daktaro, profesoriaus Michailo Arušanovo¹⁸, Rusijos mokslų akademijos akademiko, Maskvos valstybinio Lomonosovo universiteto garbės profesoriaus, geologijos ir mineralogijos mokslų daktaro Viktoro Chaino¹⁹ ir daugelio kitų mokslininkų, dėl branduolio pasislinkimo pasikeitė visi Žemės apvalkalai.



13 pav.

Žemės vidinė sandara; Žemės masės centro ilgalaikio dreifo kryptis ir jo ašigalio trajektorija Žemės paviršiuje 1990–2010 m., su beveik 90 laipsnių posūkiu 1997–1998 m. Taimyro pusiasalio link.

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

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

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

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

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

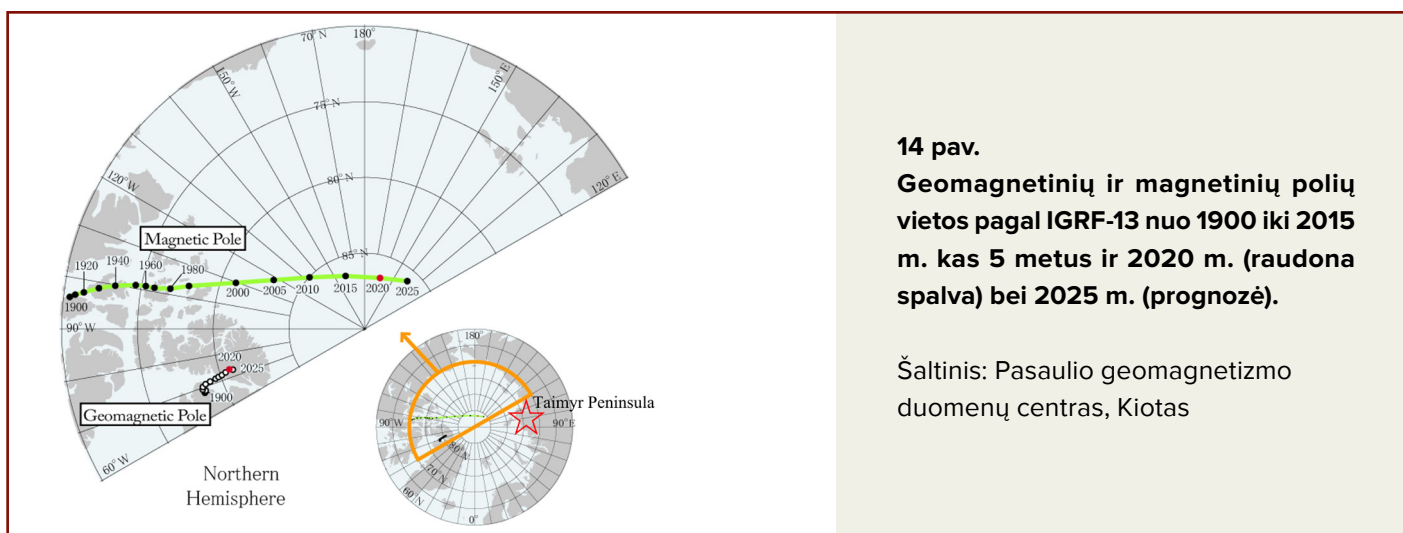
¹⁹ International Committee GCGE GEOCHANGE. (2010). Global environmental changes: Threat to civilization development (Vol. 1). London: GCGE. ISSN 2218-5798

Svarbu pažymėti, kad ši kryptis sutampa su 1995 m. prasidėjusiu staigiu šiaurės magnetinio poliaus poslinkiu. Nuo praėjusio šimtmečio pradžios ašigalis judėjo vidutiniškai 10 km/metus (6,2 mylios per metus) greičiu, tačiau vėliau staiga padidino greitį iki didžiausio - 57 km/metus (35,4 mylios per metus) ir pakeitė savo trajektoriją - pasuko Sibiro ir Taimyro pusiasalio link²⁰ (3, 14 pav.).

Tai rodo, kad sąlygos branduoliui pasislinkti link Taimyro pusiasalio pradėjo formotis jau 1995 m., o tai lėmė išorinio skystojo Žemės branduolio skystėjimas. 2013 m. Lidso universiteto mokslininkai nustatė, kad šiuos magnetinio lauko pokyčius lėmė pagreitinėjęs skystos geležies tekėjimas išoriniame Žemės branduolyje²¹ (15 pav.), kuris greičiausiai prasidėjo 1995 m.

Remiantis paskelbtais duomenimis, egzistuoja ryšys tarp magnetinio lauko

inversijų dažnio ir mantijos magmatizmo intensyvumo.^{22,23,24} Kartu žinoma, kad magnetinio lauko inversijos tikriausiai yra susijusios su procesais, vykstančiais išoriniame branduolyje netoli branduolio ir mantijos ribos.²⁵ Mantijos magmatizmo intensyvumo pokyčių ir Žemės magnetinio lauko inversijų dažnio koreliacija rodo, kad Žemės magnetinio lauko sutrikimai išoriniame branduolyje atsiranda dėl šilumos perdavimo intensyvumo pokyčių prie branduolio ir mantijos ribos esančių pliumų pagrindų. Bendras pliumų šilumos kiekis didėja tiek dėl naujų pliumų atsiradimo, tiek dėl jau aktyvių pliumų šilumos kiekio padidėjimo. Galima daryti prielaidą, kad geodinaminiai sutrikimai išoriniame branduolyje ir mantijoje vyksta pliumo atsiradimo ir išsiveržimo į paviršių laikotarpiais.²⁶



14 pav.
Geomagnetinių ir magnetinių polių
vietos pagal IGRF-13 nuo 1900 iki 2015
m. kas 5 metus ir 2020 m. (raudona
spalva) bei 2025 m. (progozė).

Šaltinis: Pasaulio geomagnetizmo
duomenų centras, Kiotas

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

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

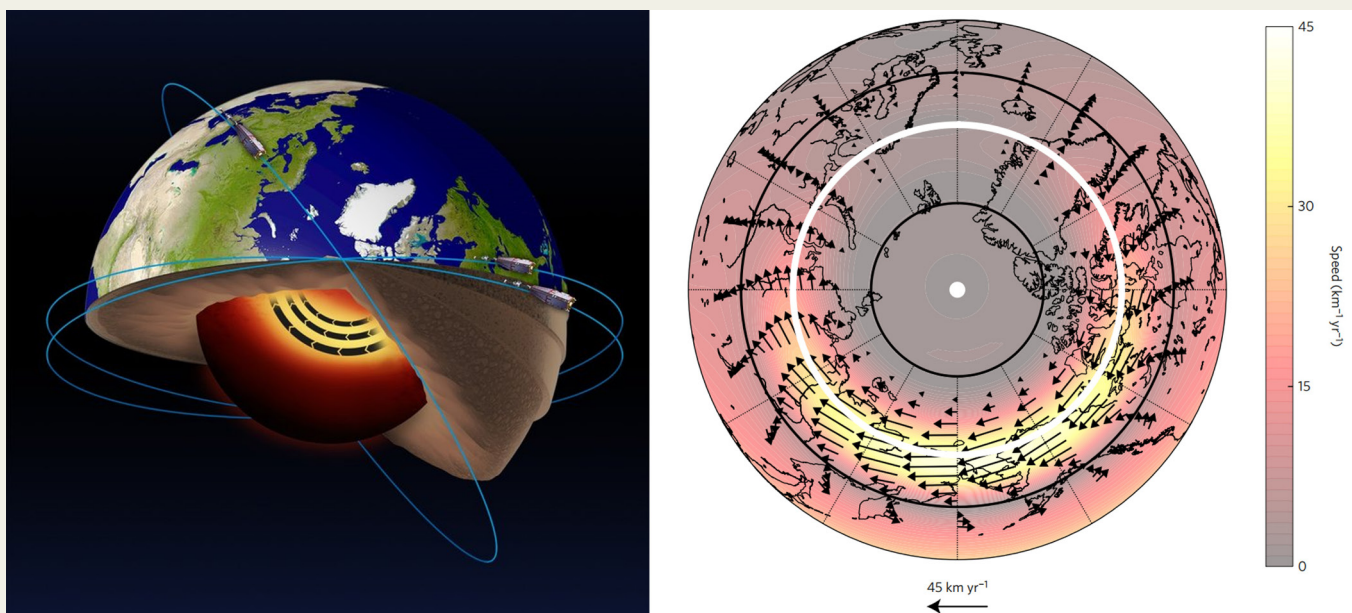
²²Alain Mazaud, Carlo Laj, The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 107, Issues 3–4, 1991, Pages 689–696, ISSN 012-821X, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90111-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T)

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

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

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

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



15 pav.

ESA Swarm palydovų duomenų analizė atskleidė reaktyvinės srovės buvimą skystojo geležies Žemės branduolio dalyje, maždaug 3000 km gylyje po paviršiumi, taip pat nustatyta, kad ši srovė spartėja.

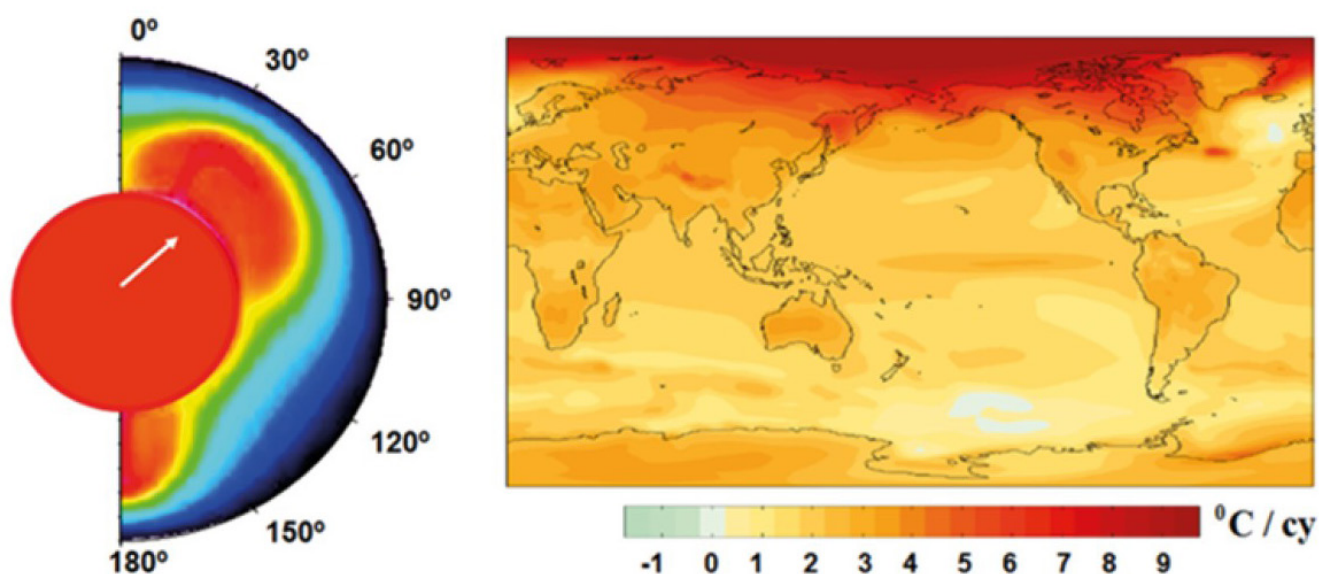
Šaltinis: ESA

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>

Todėl dabartinis Šiaurės magnetinio poliaus dreifas link Taimyro pusiasalio gali būti papildomas Žemės išorinio skysto branduolio pokyčių ir staigaus pliūmo iškilimo iš branduolio ir mantijos ribos po Sibiru įrodymas.

Taigi 1995 m. dėl išorinio kosminio poveikio Žemės branduoliui vidinis branduolys pradėjo šilti. Išorinis branduolys ėmė tirpti, o tai lėmė staigų šiaurės magnetinio poliaus dreifo pagreitinimą. Išorinio branduolio skystėjimas sudarė sąlygas 1997-1998 m. branduoliui pasislinkti link Sibiro ir Taimyro pusiasalio.

Remiantis daktaro Jurijaus V. Barkino pasiūlyta hipoteze, branduolio poslinkis sukėlė asimetrinį šilumos perdavimą Sibiro link (16 pav.). Labai svarbu pažymėti, kad šilumos perdavimas mantijoje pirmiausia vyksta dėl konvekcinių maišymosi. Tai leidžia manyti, kad branduolio poslinkis pirmiausia sukėlė magmos kilimą Sibiro link. Vėliau šioje Sibiro dalyje pradėtas stebėti nenormalus atmosferos kaitimas, kuris kasmet vis didėja.



16 pav.

Priverstinis santykinis branduolio ir mantijos poslinkis ir asimetrinio šilumos tiekimo į viršutinius mantijos sluoksnius schema (kairėje). Paviršiaus šilimo linijinės tendencijos ($^{\circ}\text{C}$ per šimtmetį) pagal NCAR CCSM3 duomenų vidurkį pagal specialų scenarijų http://www.realclimate.org/bitz_fig3.png (dešinėje).

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

Sibiras ir Sibiro Arktis šyla 3-4 kartus greičiau nei likusi pasaulio dalis

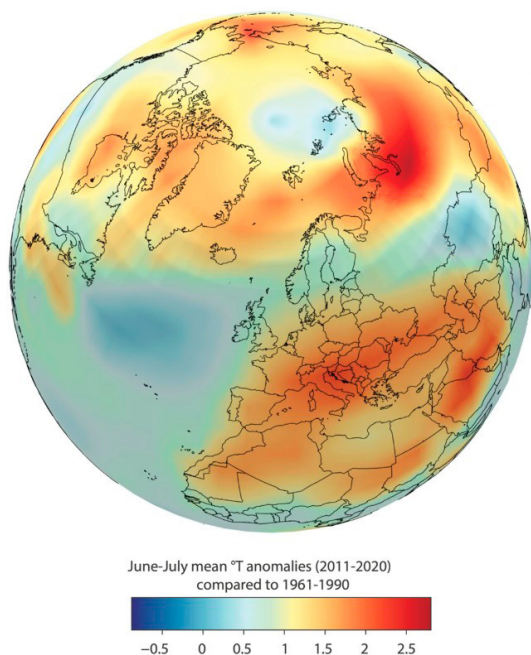
Ivairių organizacijų duomenimis, Rusijos teritorija, ypač Arkties regionas, patiria itin didelį karštį.

Kaip matyti iš Tarpvyriausybės klimato kaitos komisijos (TKKK) mokslininkų pateiktų 2021 m. duomenų, Rusija šyla tris kartus sparčiau nei likęs pasaulis, o jos Arkties ir Sibiro regionai šyla keturis kartus sparčiau nei vidutiniškai pasaulis.

2022 m. „Roshydromet“ vadovas Igoris Šumakovas citavo Pasaulinės meteorologijos organizacijos duomenis²⁷, iš kurių matyti, kad Rusijos teritorija šyla 2,5 karto sparčiau nei visas pasaulis, o šalies šiauriniame poliariniame regione temperatūra kyla sparčiausiai, ypač pastaraisiais dešimtmečiais.

Pagal dendroklimatinių tyrimų duomenis, Sibiras yra vienas iš regionų, kuriuose vyksta intensyviausias šilimas pasaulyje (17 pav.), o tai yra beprecedentė tendencija per pastaruosius 7000 metų.²⁸

JAV Vudvelo klimato tyrimų centras (WCRC)²⁹ atliko didelės apimties tyrimą, kurio tikslas - įvertinti, kaip klimato kaita paveikė temperatūrą, dirvožemio drėgmę, sniego dangos storį, kritulių kiekį ir kitus svarbius klimato parametrus įvairiuose Arkties regionuose. Šiuo tikslu mokslininkai sujungė ir susistemino per pastaruosius 40 metų palydovų, lėktuvų, dronų ir antžeminių meteorologijos stočių surinktus duomenis.



17 pav.

Vidutinės birželio-liepos mėnesių temperatūros anomalijos Šiaurės pusrutulyje (Jamalo ir Taimyro pusiasaliuose) per paskutinį stebėjimų dešimtmetį (2011-2020 m.). Temperatūra išreikšta kaip anomalijos, palyginti su 1961-1990 m. baziniu klimatu, naudojant HadCRUT.5 duomenų rinkinį.

Šaltinis: 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>

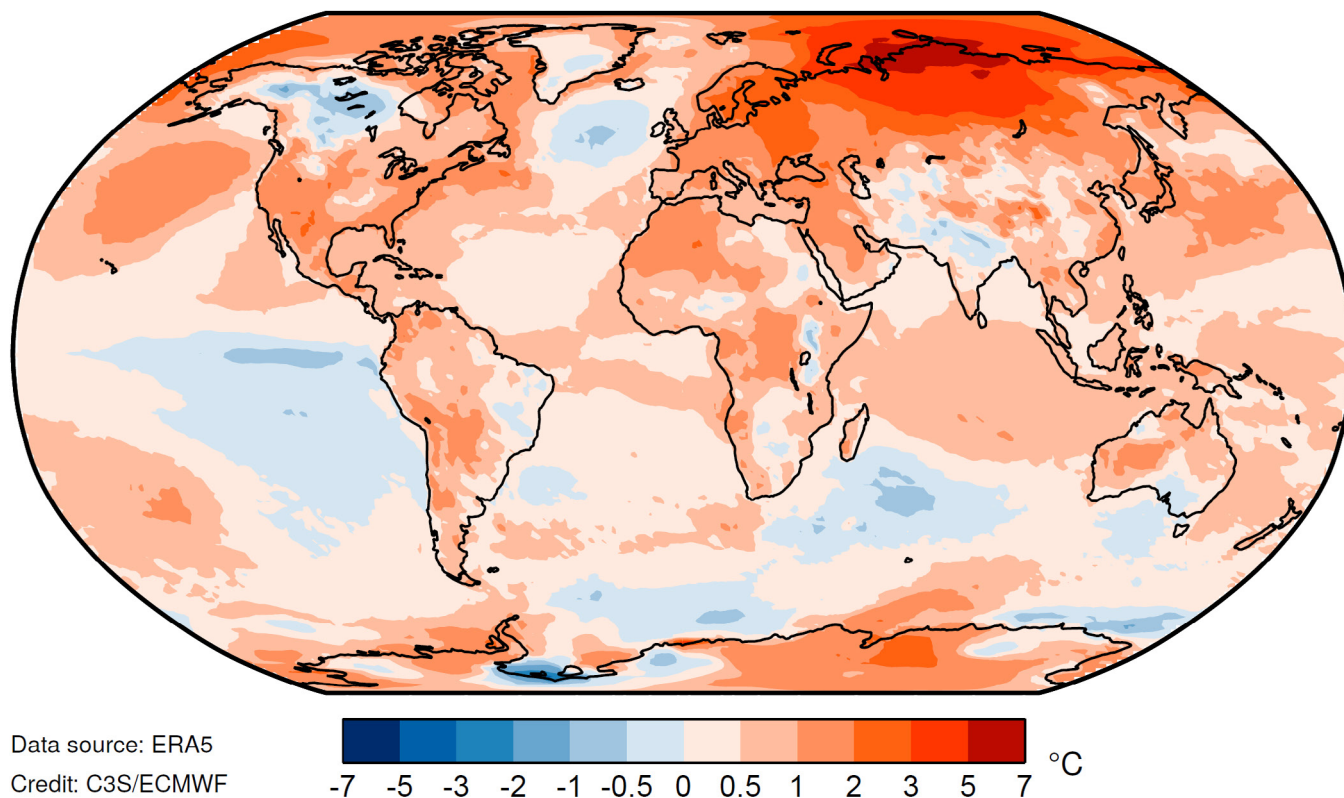
Vėlesnė šių duomenų analizė leido mokslininkams nustatyti apie dvi dešimtis klimato kaitos židinių. Intensyviausiai atšilo poliariniai ir centriniai Rytų Sibiro regionai, kuriuose vidutinė metinė temperatūra per dešimtmetį pakilo 1,1 laipsnio Celsijaus, t. y. kelis kartus daugiau nei pasaulinis atšilimas. Taimyro pusiasalyje temperatūra kilo dar sparčiau - 1,7 laipsnio Celsijaus per dešimtmetį. Panašiai nuo devintojo dešimtmečio pabaigos temperatūra Sibiro taigoje kilo 0,6 laipsnio Celsijaus per dešimtmetį.

Pastaraisiais metais karščio bangos Sibire pasiekė naują nerimą keliantį lygį, ypač 2020 m., kai temperatūra visame regione smarkiai šoktelėjo (18 pav.).

Sausio-birželio mėn. temperatūra Sibire buvo daugiau nei 5°C aukštesnė už vidutinę, o birželio mėn. anomalijos buvo iki 10°C aukštesnės už vidutinę (lyginant su 1981-2010 m. baziniu laikotarpiu). Šiuo itin karštu laikotarpiu buvo sumušti vietiniai karščio rekordai, įskaitant Verchojansko meteorologijos stoties, kurioje birželio 20 d. užfiksuota aukščiausia visų laikų temperatūra - +38 °C (100,4 °F) (19 pav.).

Rusijos meteorologijos tarnyba nurodė, kad ši temperatūra buvo aukščiausia kada nors užfiksuota į šiaurę nuo poliarinio rato.

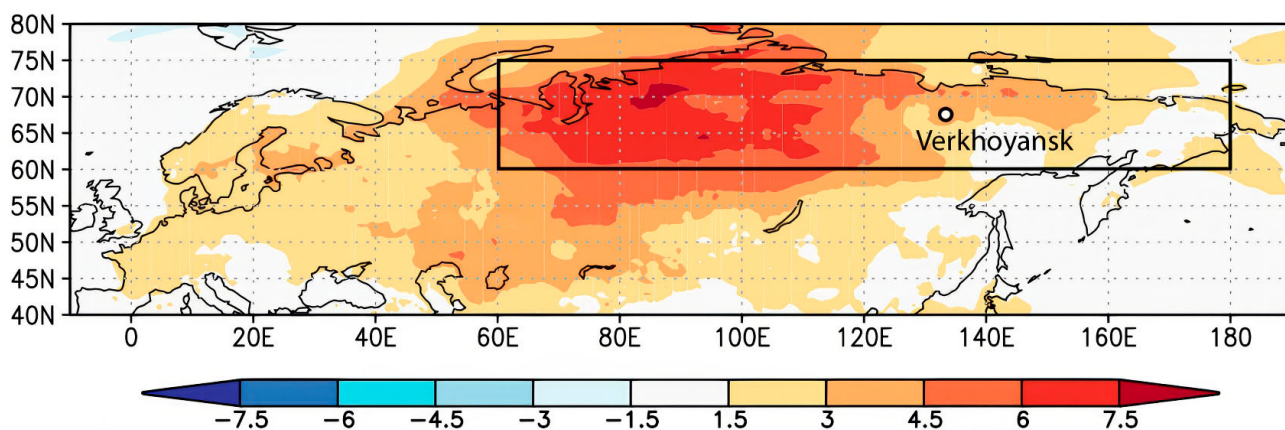
Paviršiaus oro temperatūros anomalija 2020
Atskaitos laikotarpis: 1981-2010



18 pav.

2020 m. temperatūros nuokrypis nuo 1981-2010 m. vidurkio.

Šaltinis: Copernicus klimato kaitos tarnyba, Europos vidutinės trukmės orų prognozių centras (ECMWF)



19 pav.

Ilgalaikis Sibiro karštis: Vidutinė 2020 m. sausio-birželio mėnesių temperatūra, palyginti su norma (1981-2010 m.) Sibiro regione ir Verchojansko vietovėje, kur birželio mėnesį buvo užfiksuota rekordinė už poliarinio rato +38 °C temperatūra.

Šaltinis: 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>

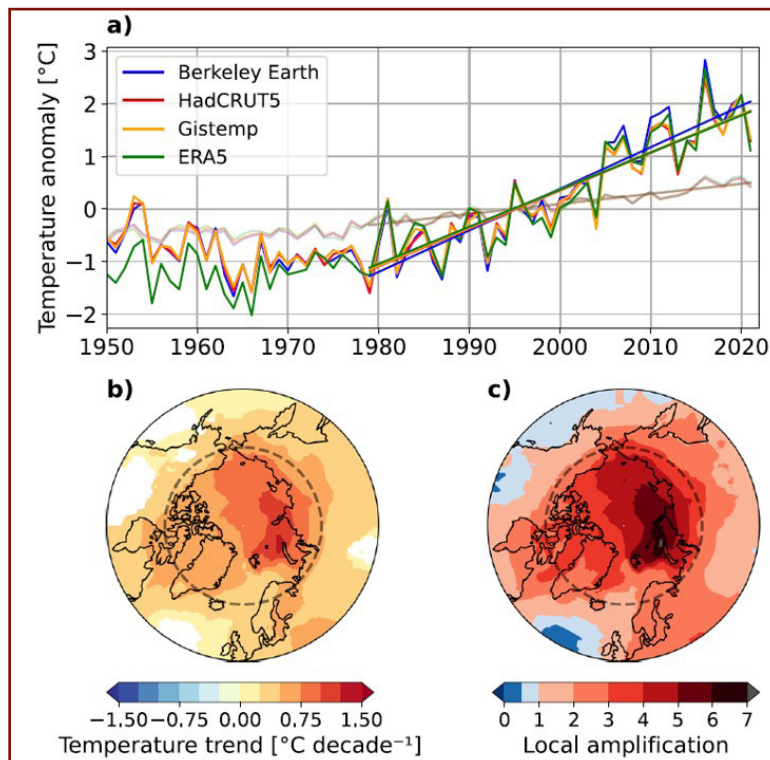
Šios karščio bangos Sibire tęsiasi ne nuolatos, o periodiškai, nes karščio bangas sukeltantys magmos intarpai turi bangų pobūdį. Atmosferoje, kur oro masės laisvai juda ir maišosi, karščio bangos gali nulsūgti per kelis mėnesius, kaip tai nutiko 2020 m., kitaip nei karščio bangos vandenų aplinkoje.

2022 m. tyrimų duomenimis, Sibiro Arktis šyla beveik keturis kartus sparčiau nei vidutiniškai pasaulis, o šis rodiklis yra didesnis nei anksčiau klimato modeliuose numatytas ir nustebino

mokslininkus³⁰ (20 pav.).

Pažymėtina, kad šis Arkties atšilimas vyksta būtent Taimyro pusiasalio regione. Šią anomaliją Sibiro vandenyno zonoje galima paaiškinti plonesne vandenyno pluta, kuri efektyviau praleidžia šilumą, ir didesne vandens šilumine talpa, palyginti su atmosfera. Todėl vandenyno vanduo intensyviai sugeria ir sulaiko kylančios magmos pliumo šilumą, nors pliumas kyla po žemynine pluta santykinai toli nuo kranto linijos.

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>



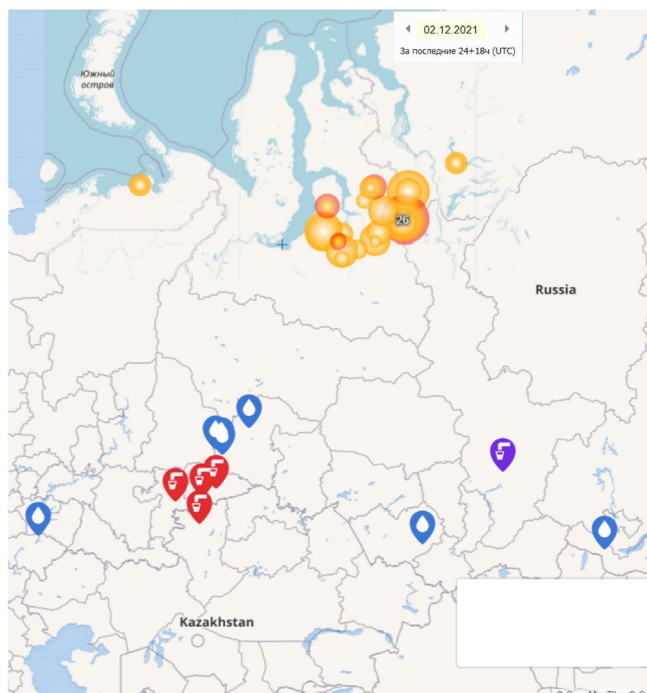
20 pav. Vidutinės metinės temperatūros kitimas Arktyje. a Vidutinės metinės temperatūros anomalijos Arktyje (66,5°-90° šiaurės platumos) (tamsios spalvos) ir visame pasaulyje (šviesios spalvos) 1950-2021 m., gautos iš įvairių stebėjimo duomenų rinkinių. Temperatūros anomalijos apskaičiuotos lyginant su standartiniu 30 metų 1981-2010 m. laikotarpiu. Brūkšninė linija b ir c punktuose vaizduoja poliarinį ratą (66,5°N platumos).

Šaltinis: 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>

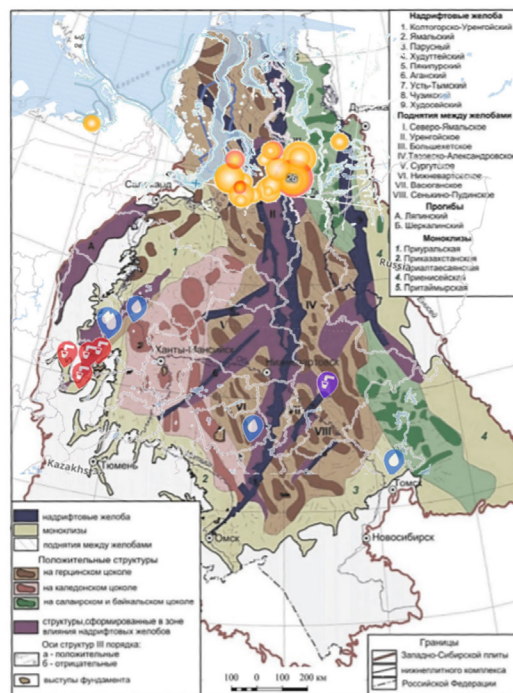
Netiesioginiai Sibiro plumo kilimo požymiai

Magmos plumo įsiskverbimas į Žemės pluta po Sibiru sukelia ne tik atmosferos įkaitimą, bet ir daugybę kitų anomalijų: amžinasis įšalas tirpsta iš apačios į viršų, regione didėja seisminis aktyvumas, karštas vanduo kyla į paviršių, todėl verda šuliniai, o visame Sibire, taip pat ir po sniegu, kilo precedento neturintys gaisrai. Didžiausias gaisrų lokalizavimas po sniegu

pastaraisiais metais pradėjo reikštis poliarinio regiono Taimyro, Jamalo ir Gydano pusiasalių pietuose. Svarbus veiksnys yra tai, kad „gaisrai zombiai“ - miško gaisrai po sniegu - ir verdantis vanduo šuliniuose randasi virš gilių lūžių zonų (21 pav.).



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 pav.

Žemėlapis, kuriame pavaizduota žiemos gaisrų po sniegu lokalizacija už poliarinio rato 2021 m.



Su gaisrų po sniegu Sverdlovsko srityje nuotraukomis

Šiaurinėse platumose didėja metano ir vandenilio išmetimai iš žemės gelmių, daugėja kraterių, susidariusių dėl gamtinių dujų sproginų, o Arkties šelfe stiprėja purvo vulkanizmas. Šilimas iš gelmių sukelia amžinojo įšalo irimą ir dujų hidratų ardymą, todėl išsiskiria

dujos, sprogsta krateriai ir padažnėja purvo vulkanizmas. Iš planetos gelmių išsiskiriančios dujos veikia atmosferos būklę, sukeldamos papildomas šilumines, geochemines ir elektromagnetines anomalijas. Panagrinėkime šiuos procesus išsamiau.

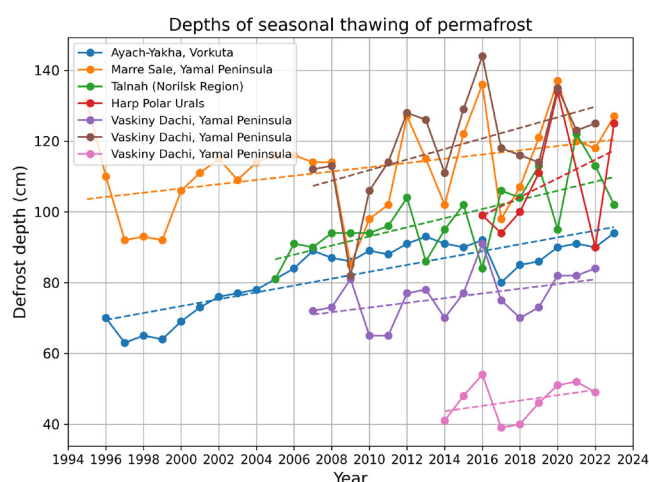
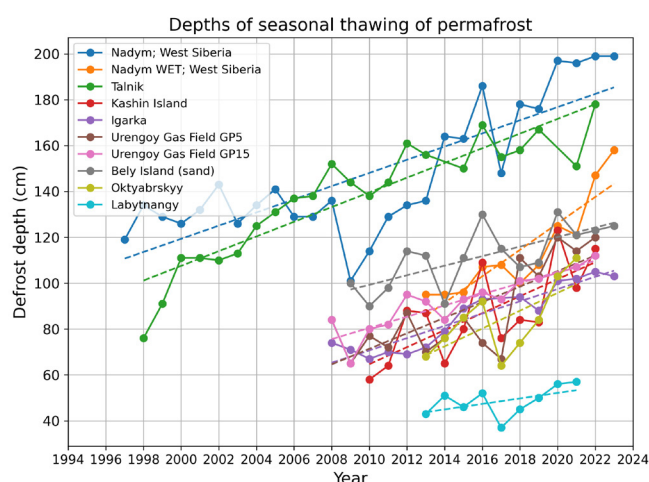
Amžinojo įšalo tirpimas

Kitas požymis, rodantis, kad iš mantijos pliumo sklinda papildoma geoterminė šiluma, yra amžinojo įšalo būklė. Ataskaitos autoriai išanalizavo duomenis apie sezoninio amžinojo įšalo tirpimo gylį Rusijoje nuo 1994 iki 2023 metų. Duomenų bazė buvo sudaryta remiantis matavimais, atliktais pagal Cirkumpolinio aktyviojo sluoksnio stebėsenos (CALM) programą, stebint aktyviojo sluoksnio ir prie paviršiaus esančio amžinojo įšalo reakciją. Duomenų bazę galima rasti interneto svetainėje permafrost.su.

Šiuo metu Rusijoje yra 58 vietos, kuriose pagal standartizuotą metodiką stebimas amžinasis

įšalas, o 46 iš jų matavimai atliekami daugiau nei 10 metų, todėl galima nustatyti ilgalaikes tendencijas. Duomenų masyvo analizė leido mokslininkams nustatyti vietas, kuriose pastebima nuolatinė tirpimo gylio didėjimo tendencija, o tai rodo, kad šioje teritorijoje vyksta papildomas šilimas.

Buvo išskirtos dvi duomenų grupės: vietovės, kuriose ryškesnė didėjančio tirpimo tendencija pastebima nuo 40 cm (15,8 col.) iki 200 cm (78,7 col.) gylyje (22 pav., a), ir vietovės, kuriose amžinojo įšalo tirpimo tempas ne toks intensyvus nuo 40 cm (15,8 col.) iki 140 cm (55,1 col.) gylyje (22 pav., b).



22 pav.

Sezoninio amžinojo įšalo tirpimo gylio pokyčiai skirtingo intensyvumo įvairiuose regionuose: a) ryškiau didėjant tirpimo gyliui; b) mažiau ryškiai didėjant tirpimo gyliui.

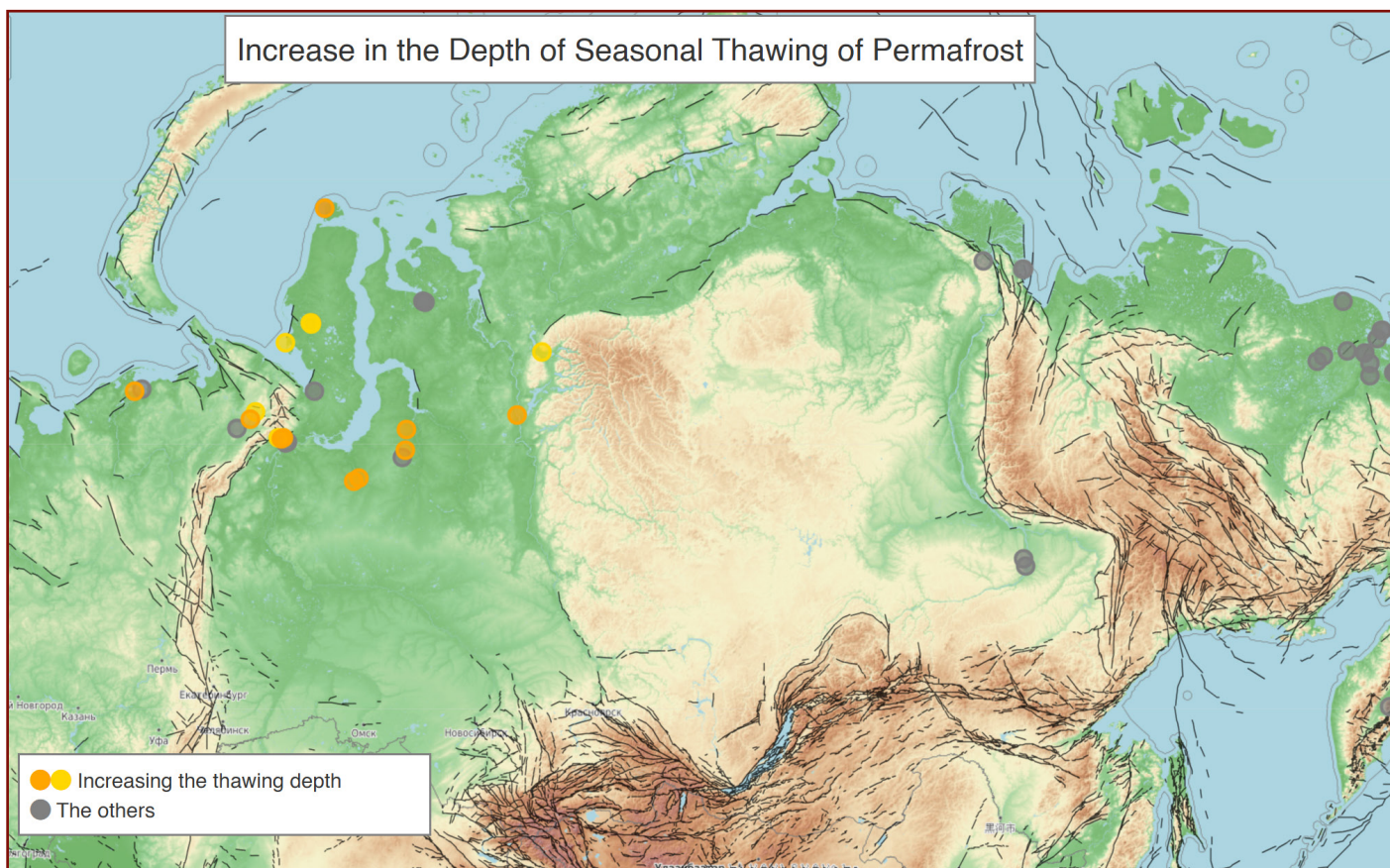
Duomenų šaltinis: <https://permafrost.su>

Matavimai atliekami pagal Cirkumpolinio aktyviojo sluoksnio stebėsenos (CALM) programą:

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

Aiškumo dėlei visi stebimi taškai buvo pažymėti žemėlapyje ir pažymėti atitinkamai oranžine ir geltona spalva (23 pav.). Pažymėtina, kad šie taškai daugiausia susitelkę tam tikrame regione: Vakarų Sibiro šiaurėje, Jamalo pusiasalyje ir į pietus nuo Gydano ir Taimyro pusiasalių.

Tokia didžiausio amžinojo įšalo tirpimo vietų lokalizacija atitinka sumažėjusių seisminių bangų greičių zoną mantijoje, numanomoje magmos pliumo galvos plitimo zonoje. Tai savo ruožtu lemia padidėjusią dirvožemio temperatūrą, taip pat ir įšalusiam sluoksnyje.



23 pav.

Vietovės, kuriose sezoninio amžinojo įšalo tirpimo gylis padidėja. Matavimų vietos pažymėtos taškais: pilka spalva - vietos, kuriose sezoninio tirpimo gylis nepastebimai didėja, geltona spalva - vietos, kuriose tirpimo gylis didėja.

Duomenų šaltinis: <https://permafrost.su>

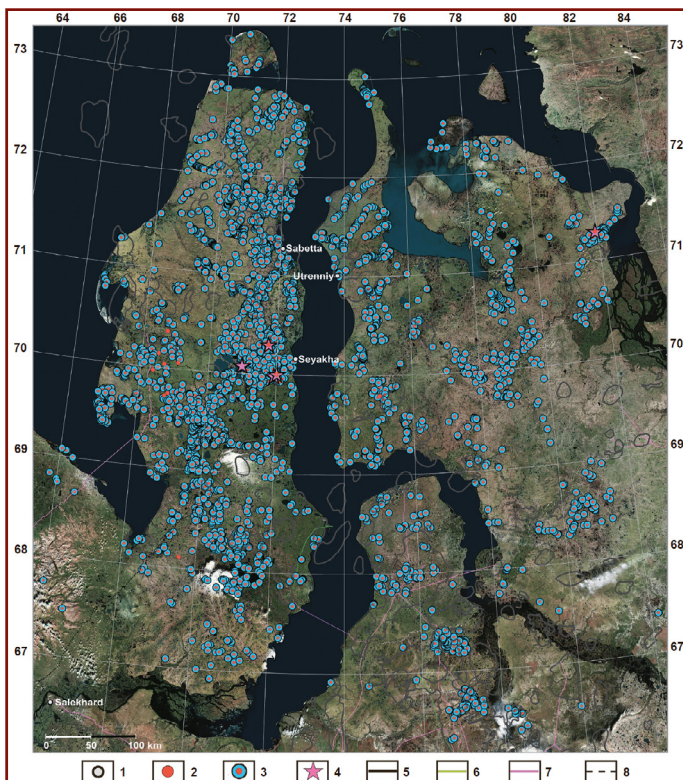
Matavimai atliekami pagal Cirkumpolinio aktyviojo sluoksnio stebėsenos (CALM) programą:

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

Purvo vulkanizmo apraiškos

Dėl papildomo kylančios magmos įkaitimo amžinasis įšalas suyra ir paveikia dirvožemyje išlikusius dujų hidratų, išlaisvindamas didelį kiekį juose esančių dujų. Be to, dujos migruoja iš dujų telkinių ir labai prisotintų dujų telkinių vandeniui, todėl mažėja dirvožemio elastingumo ir stiprumo savybės, skatinamas molio skystėjimas ir galimi purvo vulkanizmo procesai. Purvo vulkanizmas - tai geologinis procesas, kai veikiant vidiniam geostatiniam slėgiui per Žemės plutos plyšius išsiveržia dujų, vandens ir klastinės medžiagos mišinys.

Šiuos procesus arktiniame Jamalo pusiasalyje aptiko Rusijos mokslų akademijos (RAS) mokslininkai.³¹ Atlikus kompleksą geologinių ir geofizinių tyrimų, naudojant 2014-2022 m. nuotolinių Žemės tyrimų duomenis, nustatyta daugiau kaip 3 000 galingų dujų išmetimo vietų, kuriose termokarstinių ežerų, upių ir Karos jūros pakrantės dugne susiformavo krateriai (24 pav.).



24 pav.

Galingų dujų išsiveržimo zonų pasiskirstymas Vakarų Sibiro šiaurėje. Ženklaai: 1 - gyvenvietės, 2 - pavieniai dujų išsiveržimo krateriai, 3 - dujų išsiveržimo krateriai vandens dugne, 4 - purvo vulkanizmo apraiškos, 5 - naftos ir dujų telkinių kontūrai, 6 - naftotiekiai, 7 - dujotiekiai, 8 - geležinkelis. Žemėlapis pagrindas - ESRI palydovinių vaizdų mozaika

Šaltinis: 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).

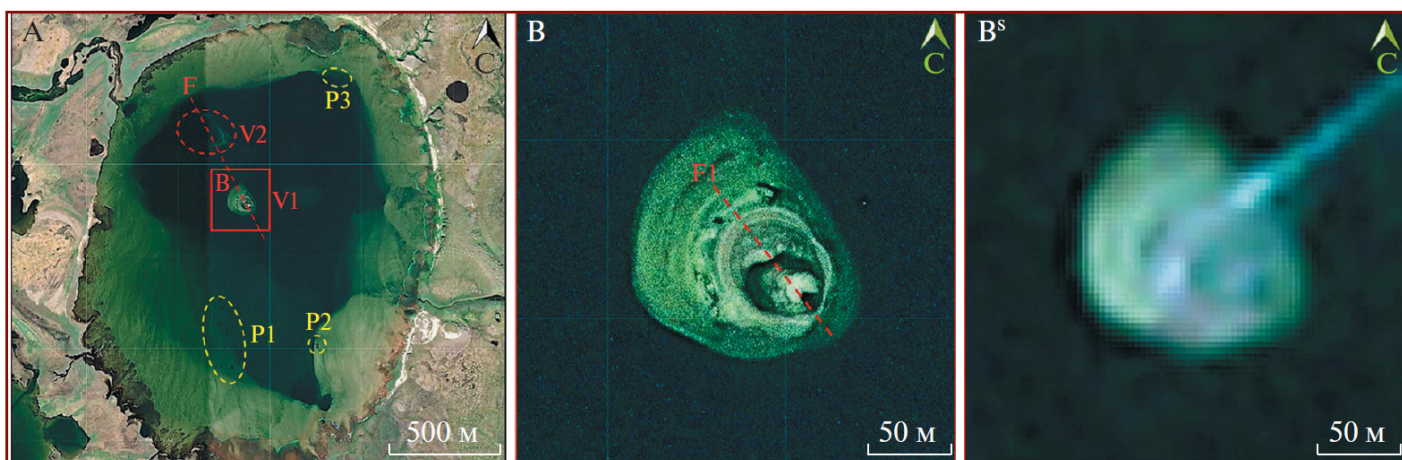
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

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 m. nuotolinio stebėjimo duomenys pirmą kartą atskleidė dideles purvo vulkanizmo struktūras termokarstinių Labvarto ir Jambuto ežerų dugnuose, kuriuose kartais pastebimas aktyvus purvo vulkanizmas³² (25 pav.). Termokarstinis ežeras - tai vandens telkinys, susidaręs tirpstant amžinajam įšalui. Taigi ne tik ežero atitirpimas, bet ir giliai po juo esančio molio

suskystėjimas rodo giliai esantį šilumos šaltinį.

Tyrimo autorių teigimu, tokios ryškios purvo vulkaninės struktūros termokarstinių ežerų dugne anksčiau nebuvo užfiksuotos visame cirkumpoliariniame Arkties regione.



25 pav.

WorldView-2 palydovo vaizdas, vaizduojantis Labvarto termokarstinį ežerą (A) ir jo padidintą fragmentą (B), papildytą Sentinel-2 palydovo vaizdo fragmentu (B^s). Žymėjimai: P1, P2 ir P3 – smailiadugnės įdubos; V1 ir V2 – purvo ugnikalniai; F ir F1 – numanomi lūžiai.

Šaltinis: 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>

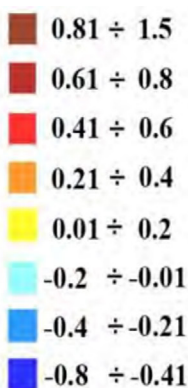
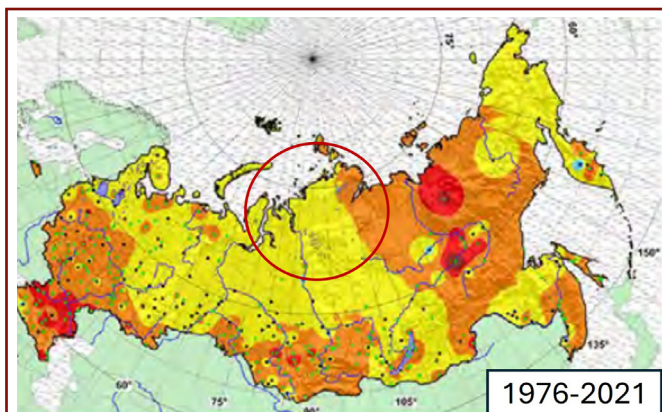
³² Bogoyavlensky, V. I. NEW DATA ON MUD VOLCANISM IN THE ARCTIC ON THE YAMAL PENINSULA. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle 512, 92–99 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

Dirvožemio šilimas

Remiantis 2021-2023 m. Roshydromet duomenimis, išanalizuoti dirvožemio temperatūros žemėlapiai 80 cm, 160 cm ir 320 cm gylyje. Informatyviausias buvo 1976-2021 m. ir 1976-2023 m. laikotarpių temperatūros tendencijų palyginimas (26 pav.). 2021-2023 m. tendencijų žemėlapyje į pietus nuo Gydano ir Taimyro pusiasalių išryškėjo ryški anomalija. Ši anomalija geografiškai sutampa su seisminės tomografijos būdu po Sibiro regiono

litosfera nustatyta mažų greičių mantijoje regionu.

Atsižvelgiant į didelį matavimų gylį (320 cm) ir didelę stebėjimų aprėptį (466 meteorologinės stotys visoje Rusijoje), galima daryti išvadą, kad aptikta temperatūros anomalija yra susijusi su geoterminės šilumos padidėjimu dėl magmos pliumo kilimo.



26 pav.

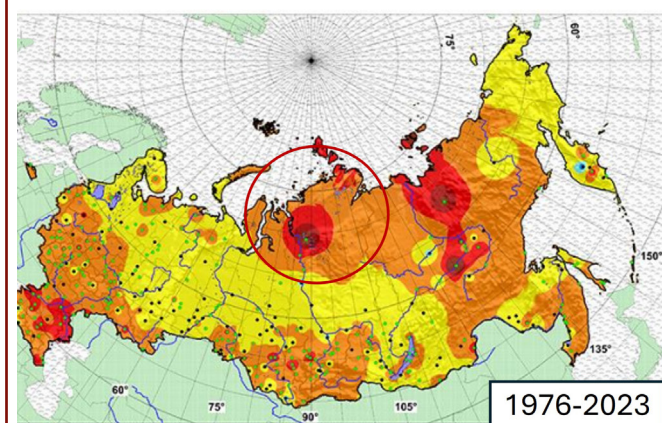
Dirvožemio įšilimo tendencijų žemėlapiai, sudaryti pagal Roshydromet duomenis.

Viršuje: 1976-2021 m., apačioje: 1976-2023

Šaltinis:

Roshydromet. (2022). Ataskaita apie Rusijos Federacijos klimato ypatumus 2021 m. Maskva: Federalinė hidrometeorologijos ir aplinkos monitoringo tarnyba.

Roshydromet. (2024). Ataskaita apie Rusijos Federacijos klimato ypatumus 2023 m. Maskva: Federalinė hidrometeorologijos ir aplinkos monitoringo tarnyba.

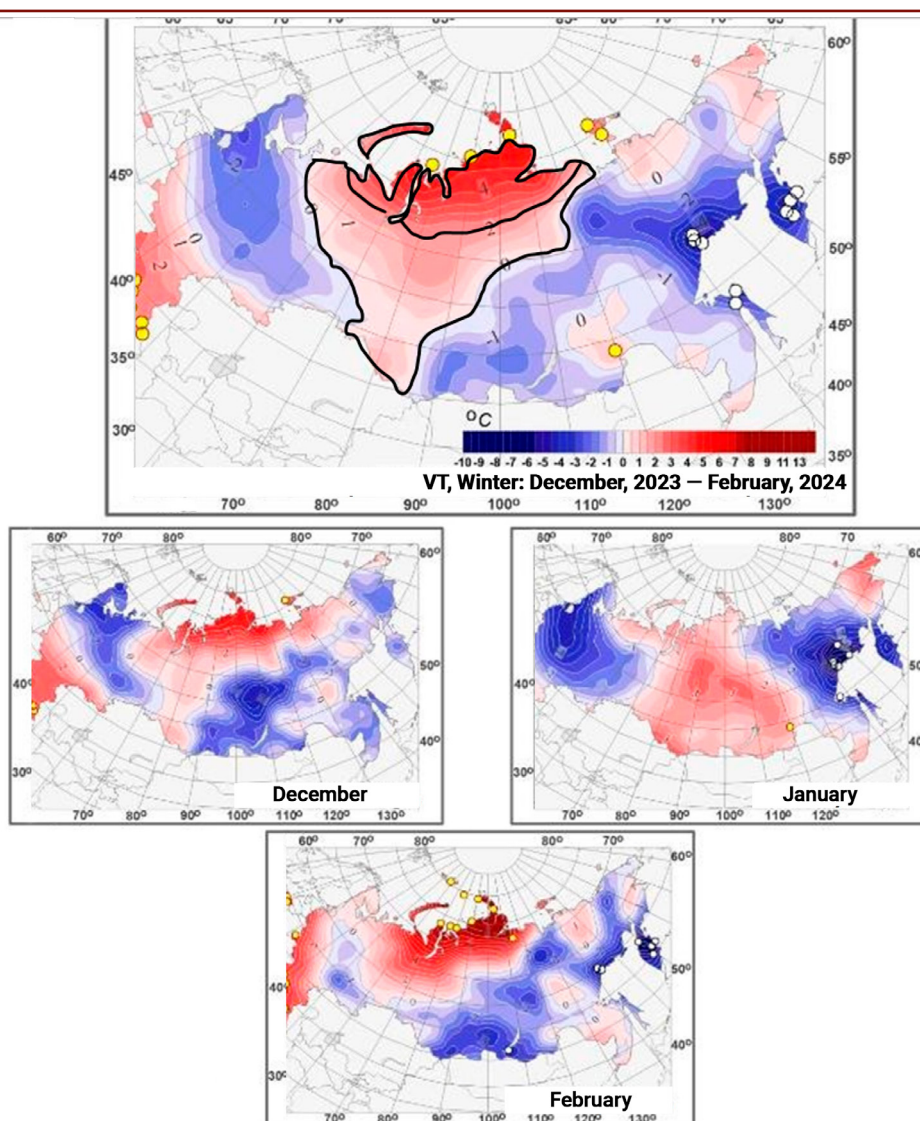


Oro temperatūra prie žemės paviršiaus

Temperatūros stebėjimai 2023-2024 m. žiemą taip pat atskleidė anomaliją prie žemės paviršiaus esančios oro temperatūros tendenciją (27 pav.). Vidutinės temperatūros anomalijų žemėlapyje nuo 2023 m. gruodžio mėn. iki 2024 m. vasario mėn. matyti, kad Gydano ir Taimyro pusiasalių rajone temperatūra 2,0-4,5 °C viršija

normą.

Atsižvelgiant į tai, kad šis regionas yra šiaurinėje dalyje, tokį didelį žiemos temperatūros padidėjimą galima sieti su mantijos pliumo šilumine įtaka.



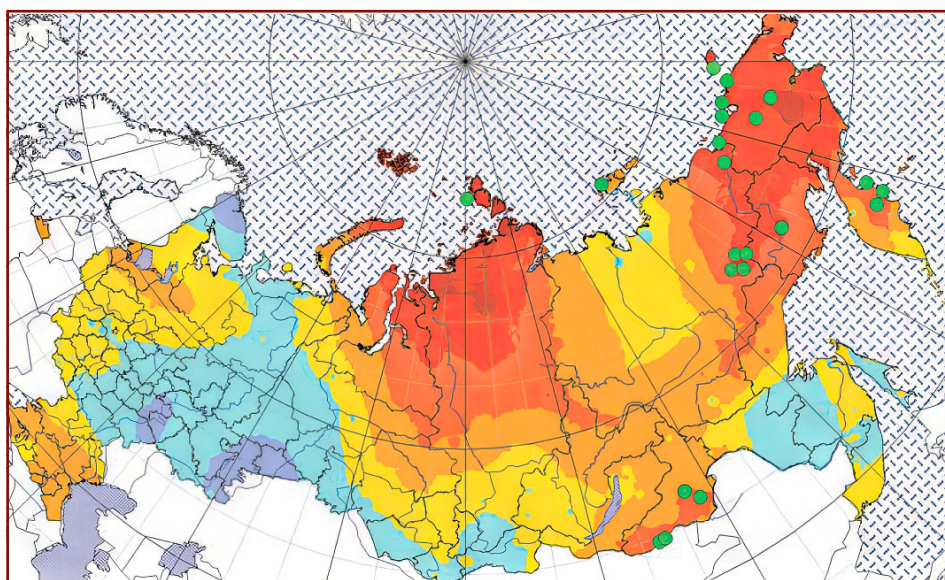
27 pav.

2023/24 m. žiemos vidutinės sezoninės ir mėnesio priežeminės oro temperatūros anomalijos (°C) visoje Rusijoje.

Šaltinis: Roshydromet. (2024). Ataskaita apie Rusijos Federacijos klimato ypatumus 2023 m. Maskva: Federalinė hidrometeorologijos ir aplinkos monitoringo tarnyba.

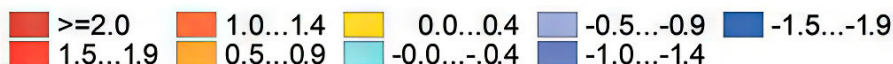
Analizuojant 2001-2022 m. sausio ir liepos mėn. vidutinės mėnesio temperatūros žemėlapius³³, matyti, kad temperatūros anomalija tiriamame regione yra nuosekli (28, 29 pav.). Tai rodo, kad anomalija pastebėta

ne tik per pastaruosius dvejus metus, bet ir išliko per visą 23 metų stebėjimo laikotarpį, o tai dar labiau patvirtina išvadą, kad pliumo įsiskverbimas daro įtaką prie žemės paviršiaus esančioms temperatūroms.



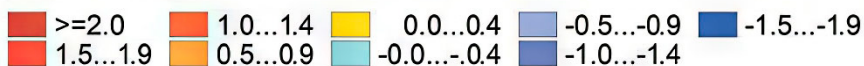
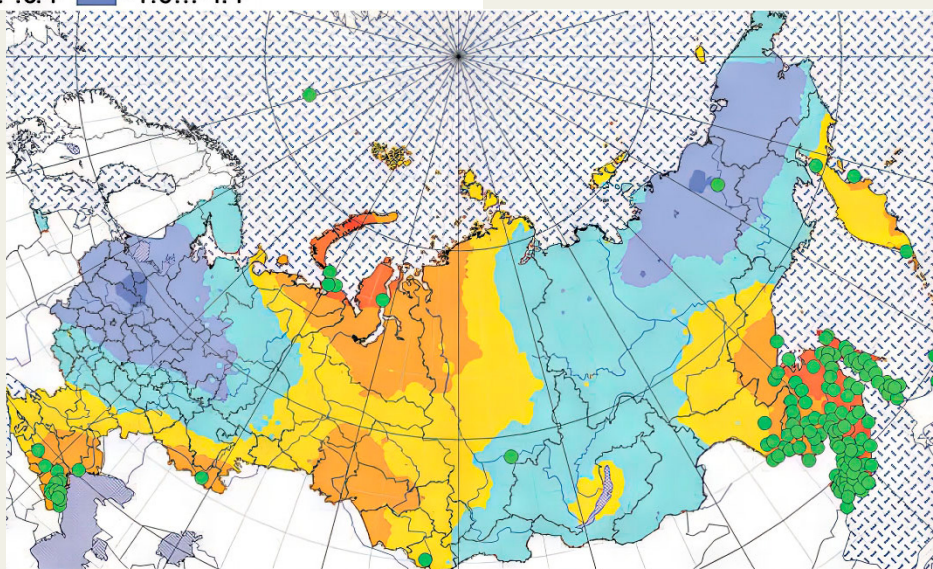
28 pav.
2001-2022 m. vidutinės mėnesio oro temperatūros tiesinės tendencijos koeficientai (°C/10 metų) (Rusijos teritorijoje nuo 2022 m. vasario mėn.) - sausio mėn.

Šaltinis: 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>



Pav. 29.
Vidutinės mėnesio oro temperatūros tiesinės tendencijos koeficientai (°C/10 metų) Maskvoje 2001-2022 m. (Rusijos ribose iki 2022 m. vasario mėn.) - liepos mėn.

Šaltinis: 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>



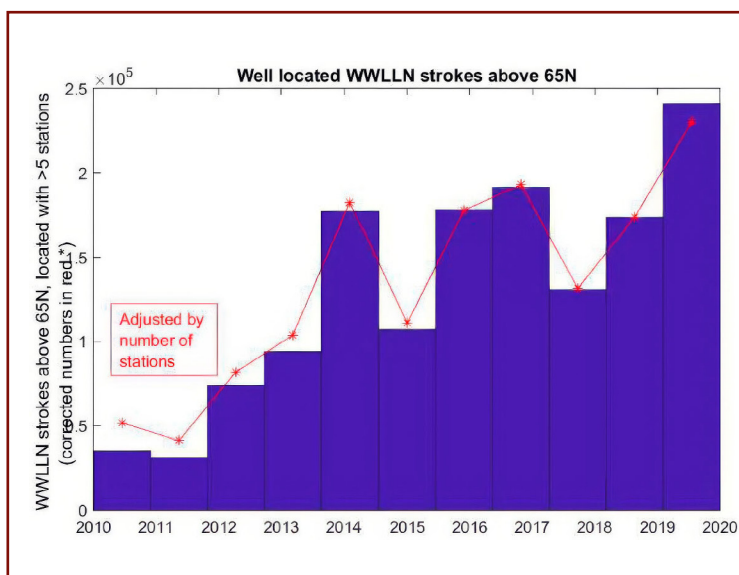
³³ Sherstyukov, B. G. (2023). Global warming and its possible causes. Journal of Hydrometeorology and Ecology, 70, 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

Žaibų aktyvumo padidėjimas

Mokslo bendruomenė vis labiau nerimauja dėl Arktyje padažnėjusių perkūnijų ir žaibų smūgių. Į šiaurę nuo 65° šiaurės platumos 2010-2020 m. žaibų smūgių skaičius patrigubėjo³⁴ (30 pav.). Pažymėtina, kad didžioji dalis šių smūgių yra daugiausia šiaurės Sibire, o šiaurės Kanadoje ir Grenlandijoje jų beveik nėra (31, 32 pav.).

Žaibų aktyvumas artėja link Šiaurės ašigalio.

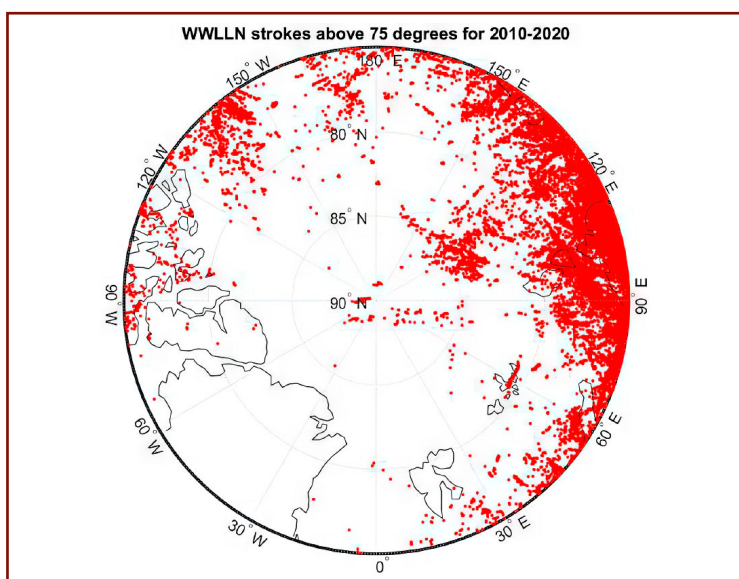
2019 m. rugpjūtį vos už kelių šimtų kilometrų nuo ašigalio buvo užfiksuoti keli žaibų smūgiai.³⁵ Dauguma žaibų aukštai Arktyje (į šiaurę nuo 80° šiaurės platumos) įvyksta per kelias intensyvios audros dienas kiekvieną vasarą. Tačiau šios audros yra naujas reiškinys regione, nes ankstesniais metais perkūnijos buvo retos.



30 pav.

Tinkamai išsidėstę WLLN smūgiai virš 65° šiaurės platumos (mėlyna spalva), o raudoname brėžinyje pavaizduotas patikslinimas pagal bendrą WLLN stočių skaičių. WLLN - Pasaulinis žaibo vietos nustatymo tinklas.

Šaltinis: 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>



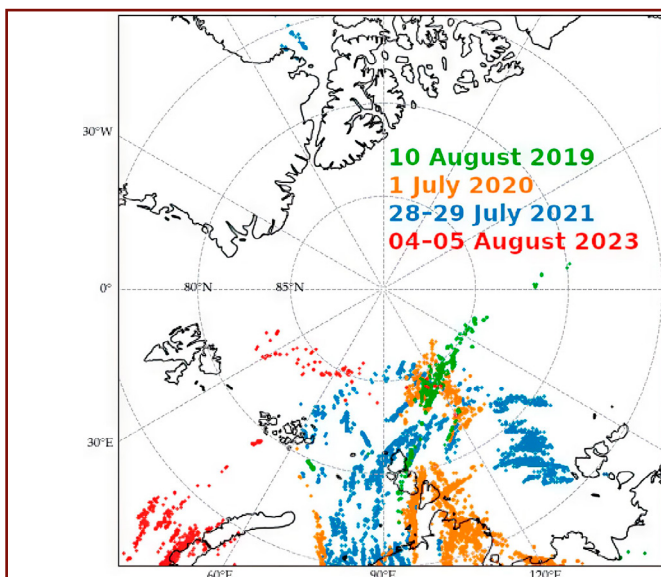
31 pav.

Pasaulinis WLLN smūgių pasiskirstymas 2010-2020 m. birželio, liepos ir rugpjūčio mėnesiais virš 75° šiaurės platumos. WLLN - Pasaulinis žaibų lokalizacijos tinklas.

Šaltinis: 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 pav.

Žaibų vietos aptiktos WWLLN per perkūnijas 2019 - 2023 m. Žalia - 2019, oranžinė 2020, mėlyna - 2021, raudona 2023.

Source: 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>

Pastaraisiais metais nuolatinė šių audrų vieta siejama su siaurės Sibire stebimais ekstremaliais vasaros karščiais, kai vasaros mėnesiais temperatūra siekia iki 35 °C. Be to, keliama hipotezė, kad bendras atmosferos jonizacijos padidėjimas šiame regione dėl magminio pliumo įsiskverbimo taip pat yra svarbus veiksnys, lemiantis žaibų aktyvumo padidėjimą. Šis procesas susijęs su šiluminės energijos konversija į elektros energiją per Jutkino efektą, vykstantį giluminių sprogimų sąveikos metu, kai susiliečia skirtingų temperatūrų magmos srautai. Dėl to iš Žemės gelmių išsiskiria didžiuliai energijos kiekiai, todėl padidėja paviršiaus statinis krūvis, pakinta paviršiaus potencialas, sustiprėja atmosferos jonizacija ir dėl to padidėja žaibų aktyvumas.

Be to, dideli dujų kiekiai išsiskiria per Žemės plutos plyšius. Šis procesas gali turėti įtakos debesų formavimuisi ir vietinėms oro sąlygoms. Magmos įsiskverbimas yra pagrindinis veiksnys, lemiantis paviršiaus šiltėjimą, didėjančią atmosferos drėgmę ir šiluminių anomalijų atsiradimą, o visa tai prisideda prie perkūnijos debesų ir žaibų susidarymo.

Kadangi perkūnijoms ir žaibams susidaryti reikia šalto oro, šilto oro ir konvekcinio nestabilumo derinio, Sibiro mantijos pliumo vieta sudaro optimalias sąlygas jiems vystytis.

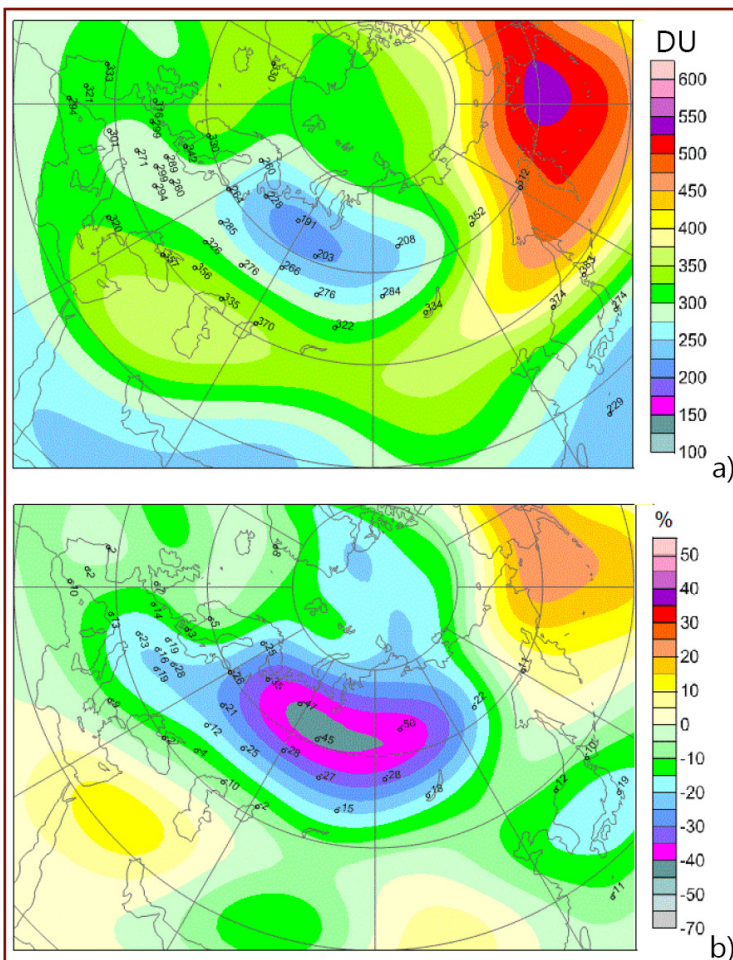
Ozono sluoksnio nykimas

Vykstant magminei veiklai Žemės gelmėse, išsiskiria daug vulkaninių dujų, įskaitant vandenilį, metaną ir anglies dioksidą. V. L. Syvorotkino tyrimų duomenimis³⁶, vandenilio emisijos prisideda prie ozono sluoksnio irimo. Kadangi magmos kilimas vyksta pulsuojančiai, degazacija ir vėlesnis ozono sluoksnio ardymas taip pat pasireiškė sporadiškai, t. y. kaip atsitiktiniai įvykiai.

Nuo 1997-1998 m. virš šiaurės Sibiro stebimos ozono sluoksnio anomalijos, kurios sutampa su Žemės branduolio poslinkiu link Taimyro pusiasalio. Ozono sluoksnio nykimo

epizodai užfiksuoti 2011, 2016 ir 2020 m.³⁷, o didžiausias ozono deficitas buvo 2016 m.³⁸ sausio pabaigoje, pirmą kartą nuo stebėsenos pradžios 1973 m., virš šiaurinio Uralo ir Sibiro buvo užfiksuota ozono anomalija - bendras ozono kiekis buvo 190-200 DU-40-45 % mažesnis už daugiametį vidurkį. Ši anomalija išsilaikė iki vienos savaitės (33 pav.).

Žymus bendro ozono kiekio sumažėjimas taip pat užfiksuotas naudojant NASA palydovo Aura ozono stebėsenos prietaisą (OMI) (34 pav.).



33 pav.

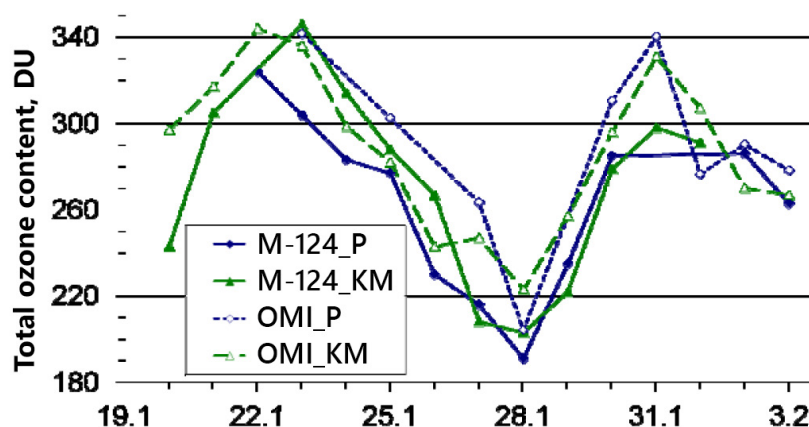
Bendras ozono kiekis (a) ir jo nuokrypiai nuo normos (b) 2016 m. sausio 28 d., remiantis WOUDC palydovų duomenimis [<http://woudc.org/>]. Skaiciai žemėlapyje rodo bendro ozono kiekio matavimus iš antžeminių ozono stebėsenos stočių.

Šaltinis: 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/ipng.2078-5712.2018-23.art48](https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art48)

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

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



34 pav.

Bendras ozono kiekis, išmatuotas antžeminiu ozonometru M-124 ir palydovo Aura (JAV) prietaisu OMI Pečioros (P) ir Chanty Mansijsko (KM) stotyse 2016 m. sausio 20 d.-vasario 3 d.

Šaltinis: 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.

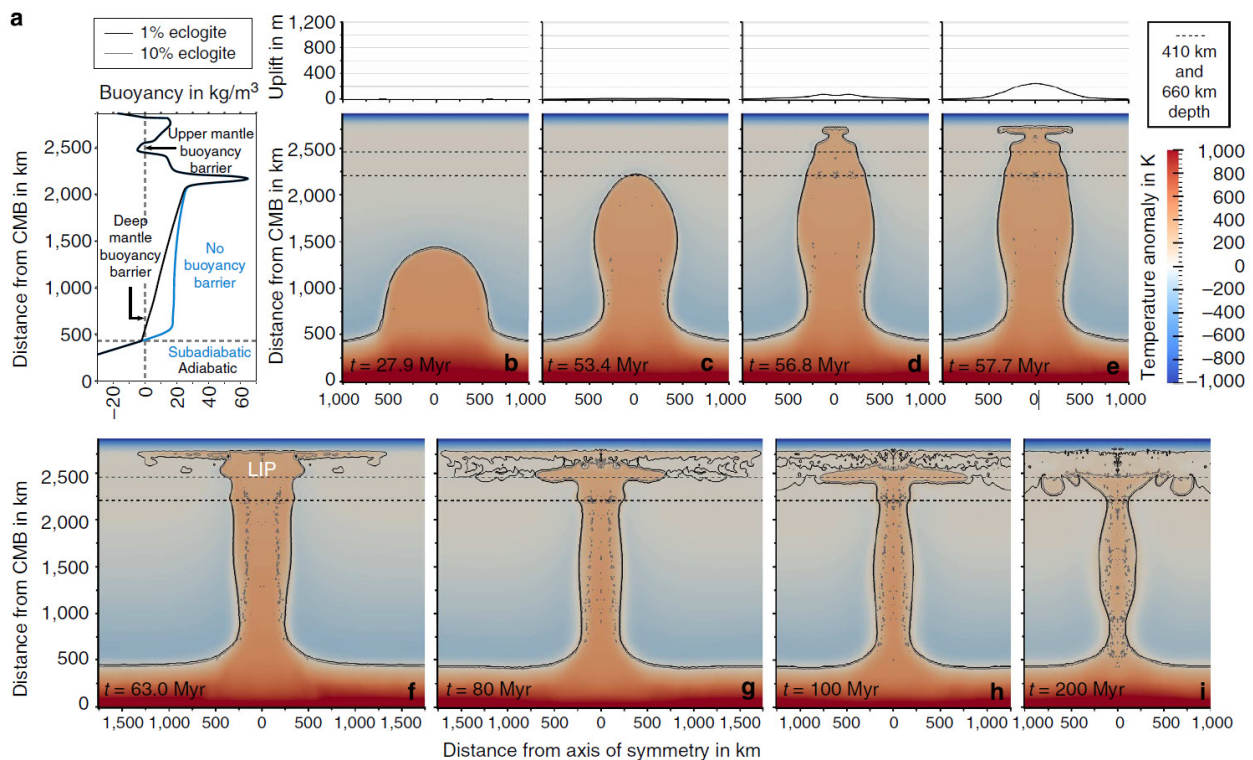
Svarbu pažymėti, kad Šiaurės pusrutulio ekstratropinėse platumose bendras ozono kiekis ilgalaikiame sezoniniame cikle mažiausias būna rugsėjo mėnesį, o didžiausias - kovo-balandžio mėnesiais. Tačiau 2016 m. ozono degradacija įvyko neįprastai anksti, sausio mėn. ir pasiekė žemiausią užfiksuotą lygį per visą instrumentinių stebėjimų istoriją.

Taigi ozono sluoksnio nykimas virš Sibiro regiono gali būti papildomas dujų emisijos per plutos lūžius, atsirandančios dėl magminio pliumo judėjimo aukštyn link paviršiaus, rodiklis.

Magmos pliuro struktūra, galimi matmenys ir lokalizacija, remiantis paskelbtais ir stebėjimų duomenimis

Pliuro struktūrą galima apytiksliai įsivaizduoti kaip grybą. Jis turi uodegą („koją“), kuri neša įkaitusią medžiagą nuo branduolio ir mantijos ribos į viršų. Viršutinė pliuro dalis, kuri kylant aukštyn plečiasi, sudaro pliuro galvą. Kai pliuras

pasiekia litosferos pagrindą, jis susiduria su ugniai atspariu suketėjusių uolienų sluoksniu, todėl galva horizontaliai išsiskleidžia po litosferą kaip grybo kepurė (35 pav.).



35 pav.

Iliustracijoje pateiktas magminio pliuro evoliucijos modelis, panašus į tą, iš kurio prieš 250 mln. metų susidarė Sibiro trapai.

Grafike kairėje (a) pavaizduota, kaip magma kyla per skirtingus Žemės mantijos sluoksnius. Pagrindinė paveikslėlio dalis (b-i) pateikiama kaip „laiko juosta“, rodanti pliuro vystymosi etapus: Iš pradžių iš mantijos pagrindo kyla karštos magmos „stulpas“. Pamažu ši kolona pasiekia viršutinę mantijos dalį, kur išsiplečia į „grybo“ formos

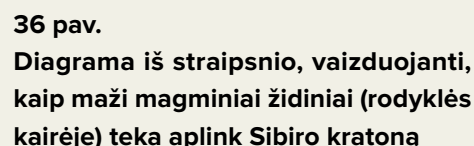
galvutę. Laikui bėgant pliuras plonėja ir pradeda skaidytis į atskiras struktūras. Spalvos diagramoje rodo temperatūrą: Raudona ir oranžinė spalvos žymi karščiausius regionus. Mėlynos sritys žymi vėsesnius regionus.

Šaltinis: 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>

Svarbu pažymėti, kad, remiantis esamais modeliais, pliumo kilimas į paviršių gali trukti dešimtis milijonų metų. Tačiau šie skaičiavimai grindžiami teorinėmis prielaidomis, o praktiniai geodinaminių procesų nuolatinio eskalavimo stebėjimai rodo ką kita. Stebėjimai Sibire rodo, kad pliumo kilimas gali įvykti per kelis dešimtmečius.

magminis superpliumas, sukėlęs daugybę bazalto išsiveržimų Eurazijoje (Sibire) Permo ir Triaso periodų riboje (prieš 250 mln. metų), buvo tokio dydžio: 4000 km iš vakarų į rytus ir 3000 km iš šiaurės į pietus. Manoma, kad pliumo galvos skersmuo buvo 1000-2000 km.

Žinoma, kad Vakarų Sibiro plokštė yra jaunesnė ir plonesnė, jos storis siekia 35-40 km. Tuo tarpu Rytų Sibiro plokštė (arba platforma), vadinama Sibiro kratonu, yra senesnė, storesnė ir šaltesnė, jos storis siekia 40-45 kilometrus. Remdamiesi seisminės tomografijos duomenimis⁴¹, mokslininkai daro prielaidą, kad šiuo metu po Rytų Sibiro platforma stebimi nedideli magminiai židiniai. Tie karštieji židiniai dėl šaltesnio plokštės pobūdžio plinta į šonus po Sibiro kratonu (36 pav.).



Šaltinis: 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.

⁴⁰ Lvova, 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.

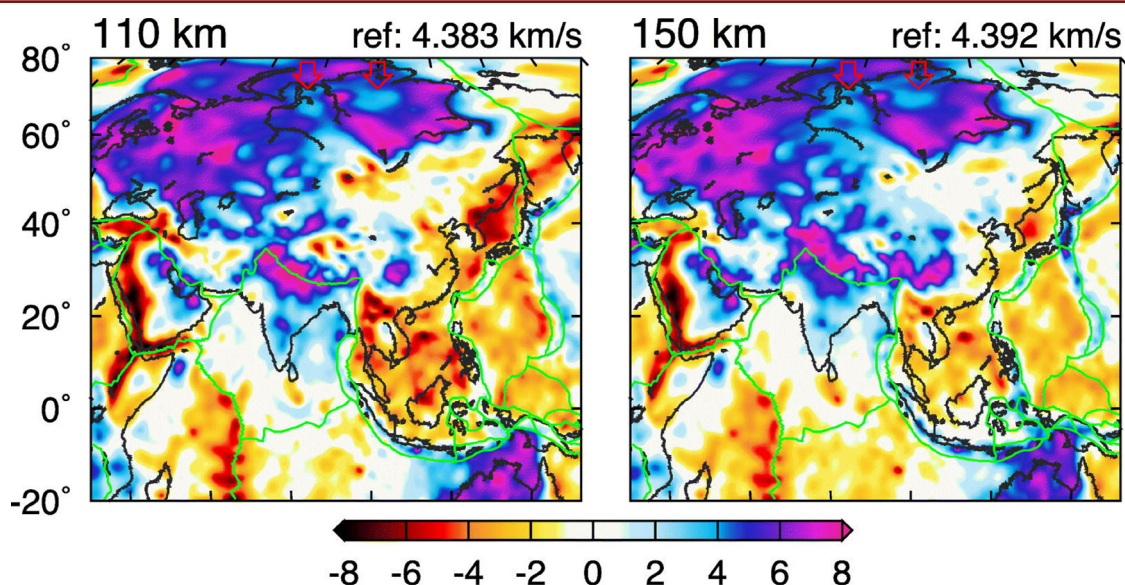
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012>

Pagal šią hipotezę dabartinis Sibiro pliumas šiuo metu plinta po Rytų Sibiro plokštės pagrindu ir iš dalies po Vakarų Sibiro plokštę. Manoma, kad šis plitimas vyksta 50-60 km (31-37 mylių) gylyje, o pliumo „koja“ aiškiausiai pastebima maždaug 100 km (62 mylių) gylyje. Tikėtina, kad antriniai pliumo įsiskverbimai jau vyksta maždaug 40 km (25 mylių) gylyje.

Kai kurie seismotomografiniai modeliai atskleidžia mažo greičio anomalijas⁴² (rodančias labiau išsilydžiusią aplinką) 110-150 km gylyje (68-93 mylios), atitinkančias skystos mantijos regioną po sritimis į pietus nuo Gydano ir

Taimyro pusiasalių (37 pav.). Manoma, kad šios anomalijos, kaip matyti 2024 m. rugpjūčio mėn. atlikto tyrimo greičių žemėlapiuose, atitinka du magminės medžiagos srautus, vadinamus pliumo „kojomis“ (38 pav.).

Jei šis modelis tikslus, kiekvienos po Rytų Sibiro kratonu kylančios pliumo „kojos“ skersmuo yra maždaug 600-700 km (373-435 mylios).

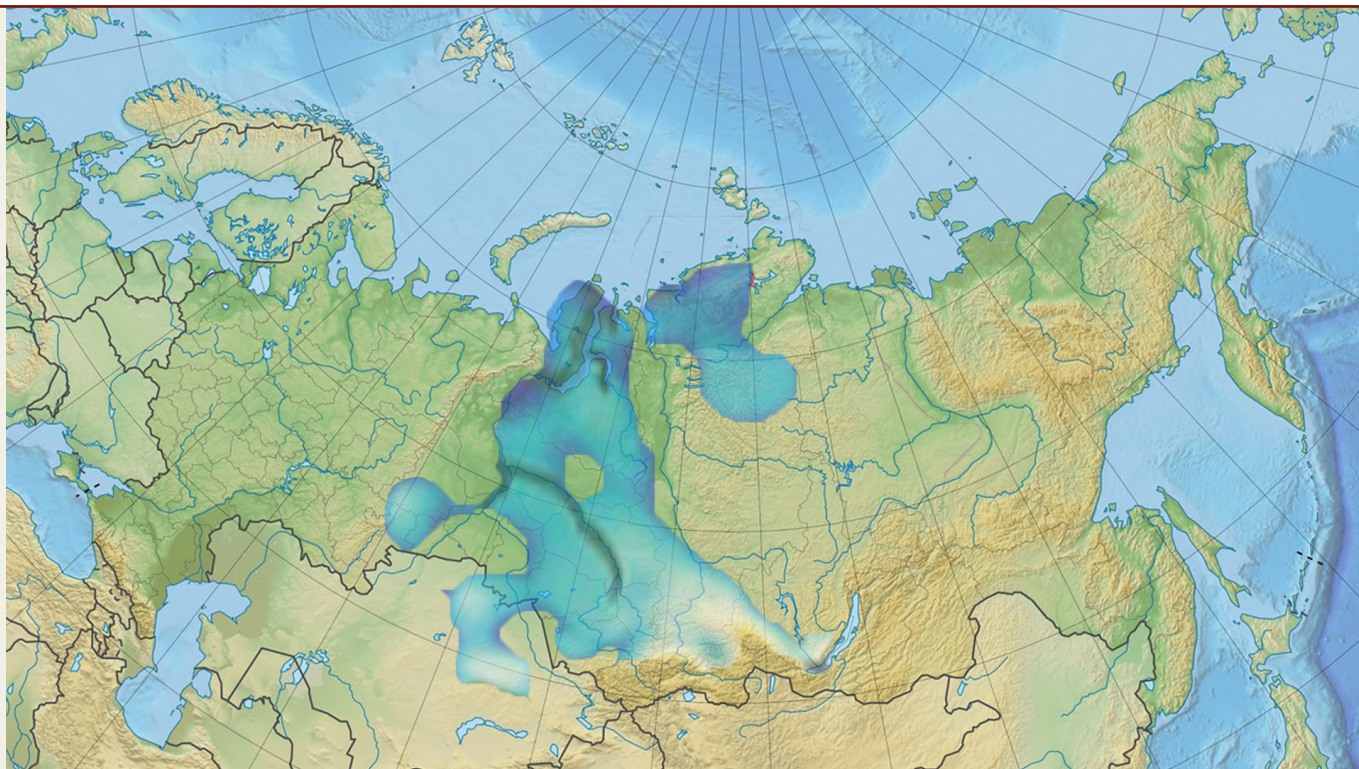


37 pav.

Žemėlapyje pavaizduotos didelio seisminių bangų sklaidimo greičio sritys, pažymėtos violetine spalva, kurios atitinka kietesnes ir tankesnes uolienas, o mėlynos sritys žymi mažesnio greičio zonas, kurios rodo, kad yra plastiškesnės arba išsilydžiusios medžiagos. Mažo greičio seisminių bangų anomalijos, atitinkančios skystesnės mantijos turinio zonas, pažymėtos dviem raudonomis rodyklėmis.

Šaltinis: 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>

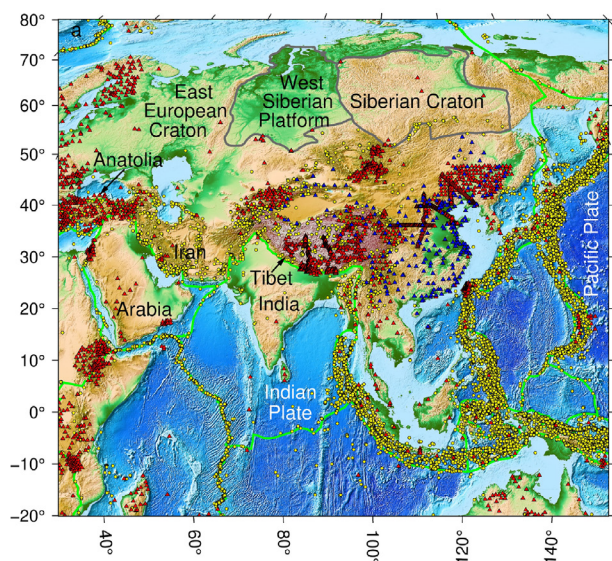


38 pav.

38 Rusijos fizinis žemėlapis, kuriame pavaizduotos ir pritaikytos mažo greičio seisminių bangų anomalijos pagal Dou ir kt. duomenis, 2024 m.

Svarbu pažymėti, kad Dou et al. (2024) tyrime pateikta Sibiro seismotomografinė analizė remiasi duomenimis, gautais iš mažiau nei 10 seisminių jutiklių (39 pav.), kurie visi yra išsidėstę palei plokščių ribas ir beveik neapima Vakarų ir Rytų Sibiro. Analizei naudoti visų viešai prieinamų

plataus diapazono žemės drebėjimų nuo 1994 m. iki 2023 m. rugsėjo 4 d. duomenys. Palyginimui, raudonais trikampiais žemėlapyje pažymėti analizėje naudoti Azijos jutikliai, kurių skaičius skaičiuojamas tūkstančiais.



39 pav.

Jutiklių (raudoni trikampiai), naudotų atliekant seisminę tomografinę analizę, išsidėstymas

Šaltinis: 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>

2023 m. Kinijos mokslininkų atliktas tyrimas patvirtina, kad šiuo metu po Sibiru tirpsta ir plonėja magmos pluta⁴³ (40 pav.). Šis vykstantis procesas mažina litosferinės plokštės tvirtumą. Autoriai pateikia Šiaurės Azijos mantijos elektrinio laidumo modelį, išvestą remiantis geomagnetiniais duomenimis, kuriame išryškėja didelė laidumo anomalija mantijos pereinamojoje zonoje po Sibiro trapais jų išsiveržimo metu. Ši anomalija interpretuojama kaip terminis netolygumas su lydymosi pėdsakais, susijęs su Permo anomalija regione (41 pav.).

Apskritai, seismotomografiniai modeliai, tiriantys 40-110 km gylį Rytų Sibiro kratone, rodo skirtingus rezultatus. Sibire akivaizdžiai trūksta seismologinių duomenų, o tai riboja šių modelių

tikslumą.

Šiuolaikiniai tomografiniai modeliai pagrįsti seisminiais duomenimis, surinktais per ilgą laikotarpį - maždaug 30 metų. Žvelgiant iš klasikinės mantijos plutos evoliucijos, kuri trunka milijonus metų, perspektyvos, 30 metų laikotarpis laikomas labai trumpu. Tačiau turimi duomenys rodo, kad per šį laikotarpį Sibiro pliume įvyko reikšmingų struktūrinių pokyčių.

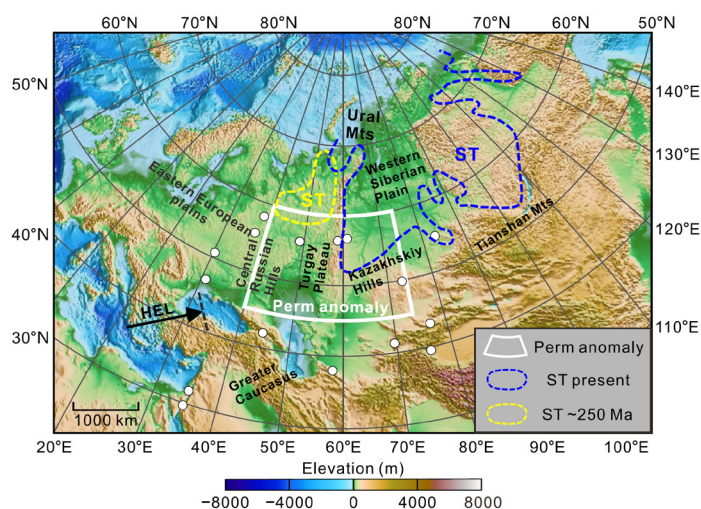
Šie stebėjimai rodo, kad reikia peržiūrėti dabartinį supratimą apie mantijos pliumo vystymosi greitį ir jam tirti taikomas metodikas.

40 pav.

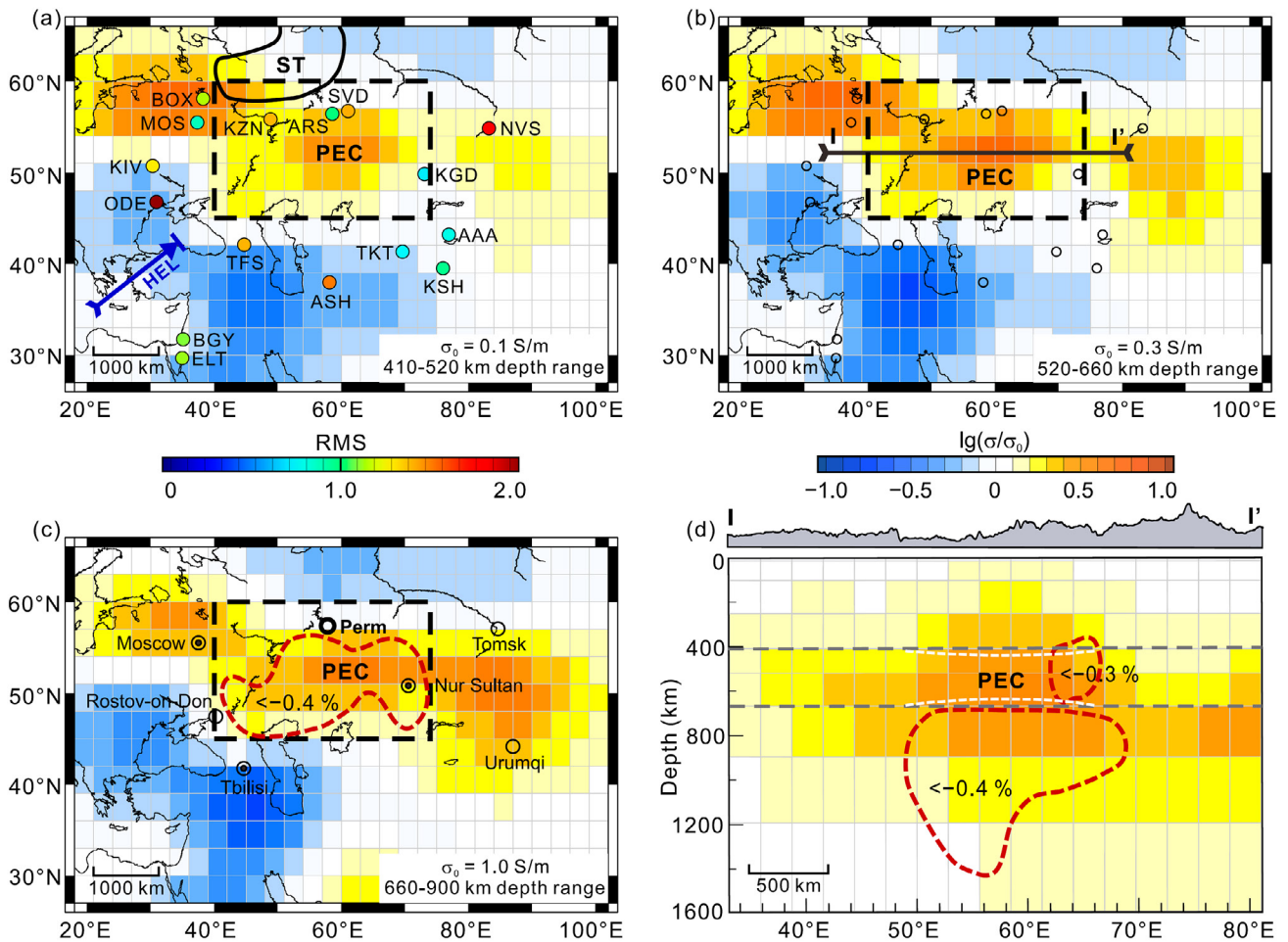
Baltais taškeliais pažymėtos stotys, kurių C - atsakai buvo naudojami šiame tyrime. Permo anomalijų diapazonas parodytas kaip zona, nubrėžta baltomis linijomis. Dabartinė Sibiro trapų vieta pažymėta mėlynai, o ankstesnės vietos - geltonai, brūkšninėmis linijomis.

Šaltinis: 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>



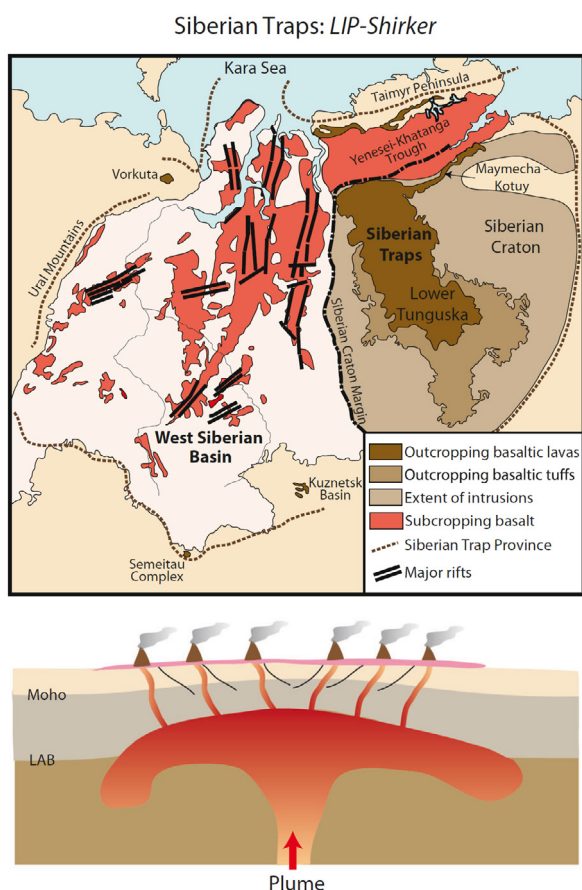
41 pav.

Jilin universiteto ir Shijiazhuang Tiedao universiteto mokslininkai, naudodami geomagnetinio lauko duomenis iš 16 stočių Šiaurės Azijoje, apskaičiavo mantijos elektrinį laidumą įvairiuose gyliuose. Jie nustatė, kad regione po Sibiro trapais (geltonos ir rudos spalvos sritys diagramose) laidumas, palyginti su pasauliniu laidumo vidurkiu, pastebimai padidėjo. Mokslininkai nustatė, kad šios sritys 400-900 km gylyje yra vidutiniškai 250 laipsnių karštesnės už aplinkinę mantiją. Šiose srityse yra dalis išsilydžiusios mantijos.

Šaltinis: 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>

Verta paminėti, kad ankstesni išsiveržimai prieš 250 mln. metų, Permo ir Triaso periodų riboje, taip pat įvyko šiame regione. Epicentras

buvo po Rytų Sibiro kratonu (po Putoranos plynaukšte), o išsiveržimai apėmė Vakarų ir Rytų Sibirą (42 pav.).



42 pav.

Sibiro trapai - stambios magminės srities pavyzdys.

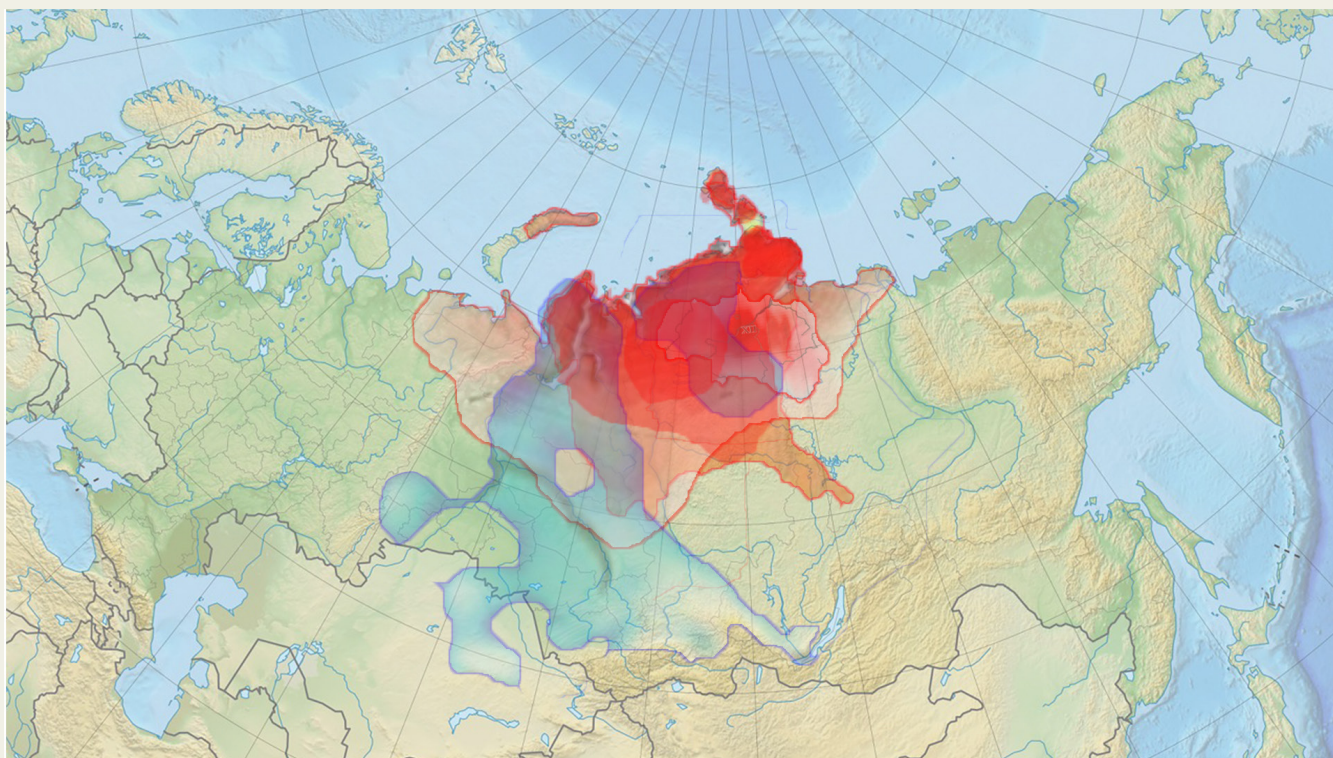
Žemėlapyje pavaizduoti išsiveržimai Vakarų Sibire (raudona spalva) ir trapai Rytų Sibire (ruda spalva), išsiveržę prieš 250 mln. metų. Karšta medžiaga iš mantijos pliumo kilo ir plito po litosferos ir astenosferos riba, suformuodama grybo formos struktūrą. Tai lėmė platų magminį aktyvumą maždaug 5 mln. km² plote. Dėl pliumo įtakos susiformavo Vakarų Sibiro riftų sistema, kurios veikla nutrūko maždaug po 10 mln. metų, per vidurinįjį Triasą.

Šaltinis: 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>

Magmos pliumo lokalizacija

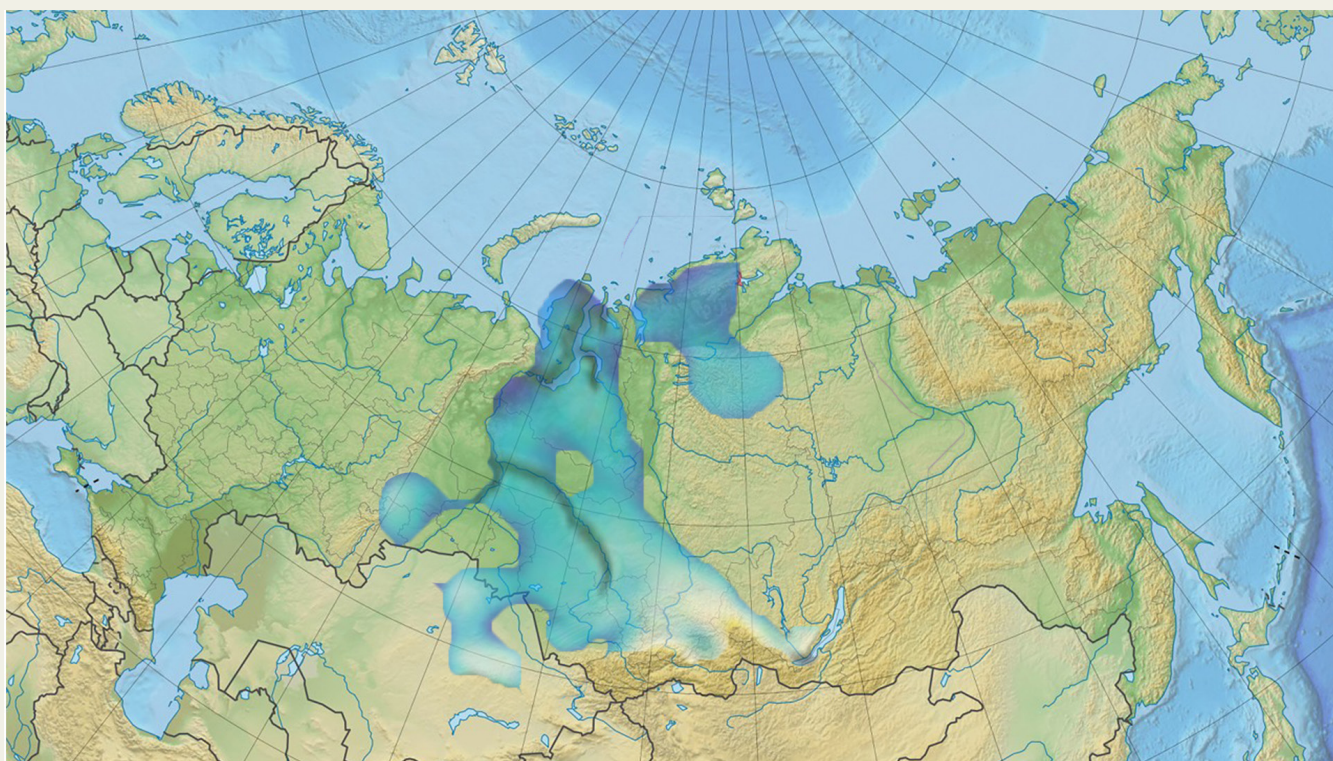
Apibendrinus dirvožemio temperatūros anomalijų, amžinojo įšalo atšilimo gylio, priežeminės temperatūros anomalijų, mažo greičio seisminių bangų anomalijų mantijoje ir anomalijų,

susijusių su magnetine anomalija, analizę, galima nustatyti dabartinę Sibiro pliumo vietą ir matmenis (Pav. 43).



43 pav.

A. Sudėtinis žemėlapis, kuriame pavaizduotos pagrindinės įvairių parametų anomalijos, išsamiai aprašytos toliau:



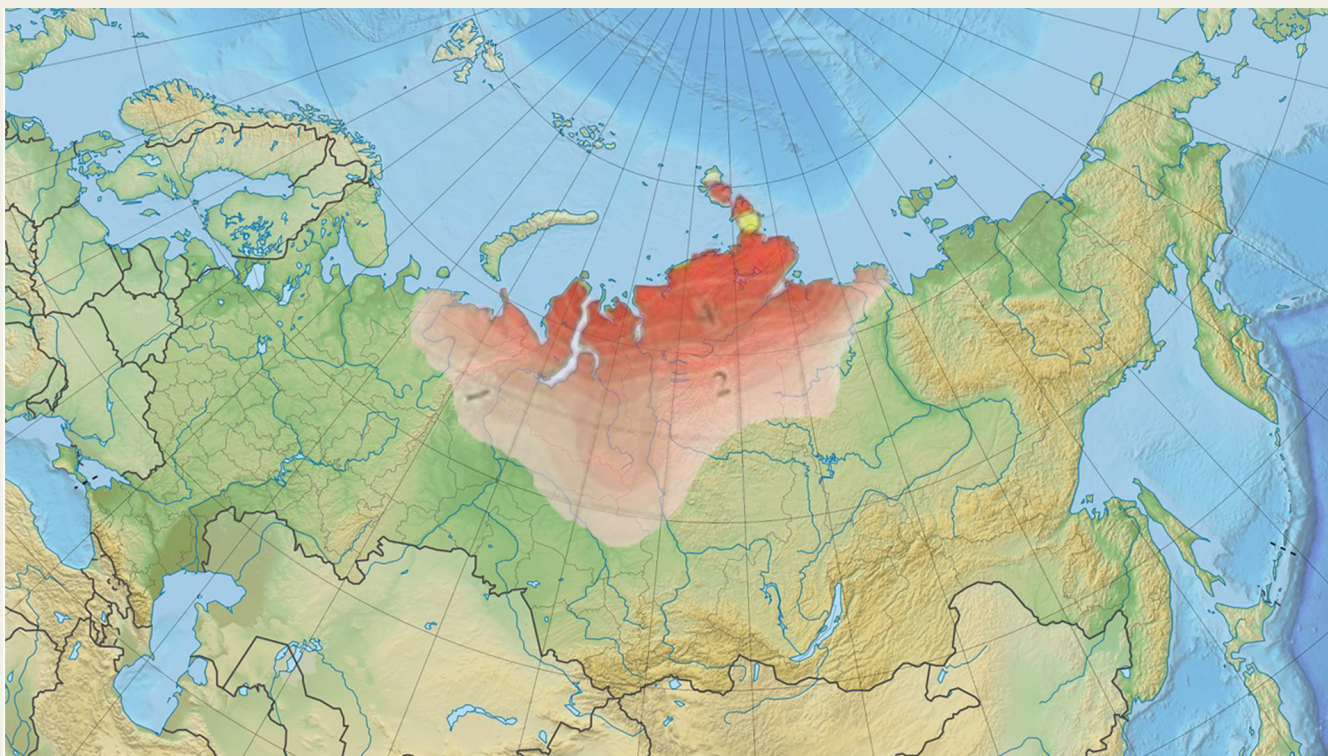
B. Mažo greičio anomalijų (rodančių daugiau išsilydžiusios medžiagos) žemėlapis 110 km gylyje, sudarytas remiantis seismotomografijos duomenimis iš Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023)



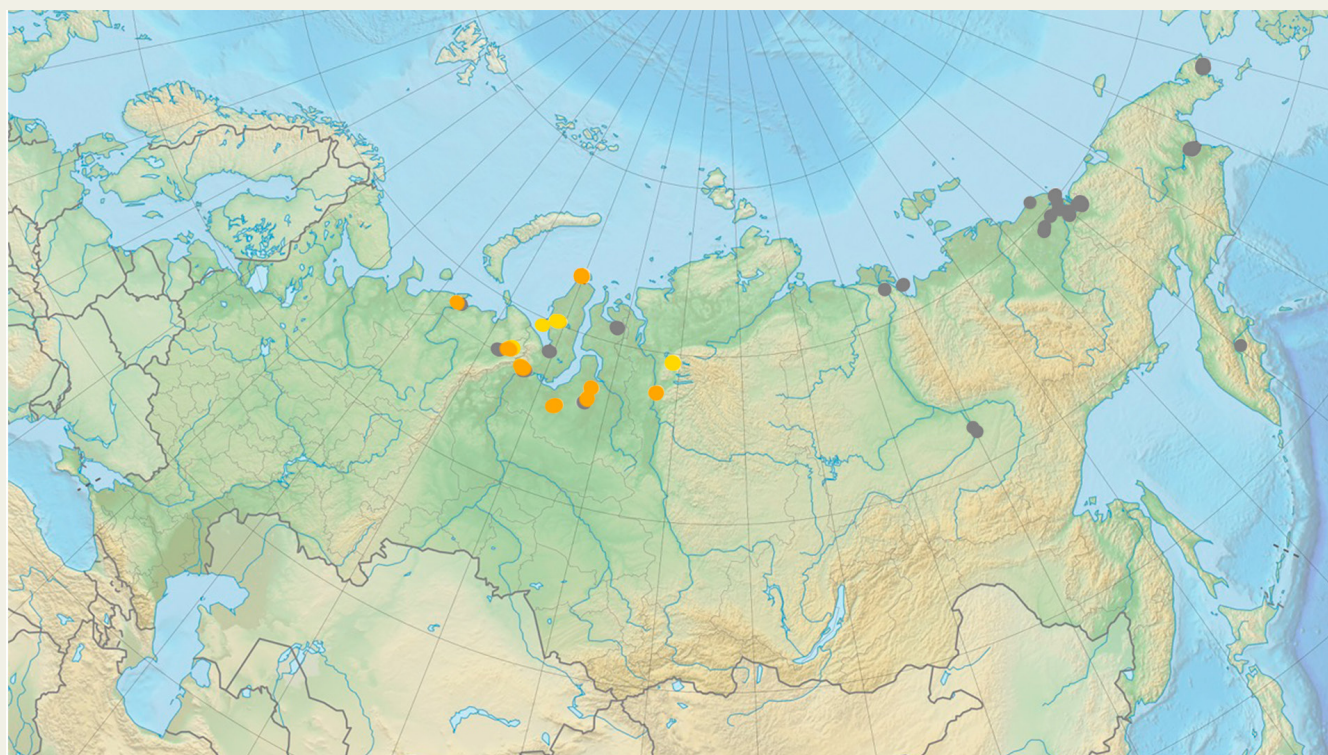
C. Naujos dirvožemio šilimo anomalijos tendencijos lyginant 1976-2021 m. ir 1976-2023 m. laikotarpius pagal Roshydromet (2021, 2023 m.).



D. 2001-2021 m. sausio mėn. vidutinės mėnesio oro temperatūros tendencija pagal Šerstiukovą (2023)



E. Vidutinė sezoninė oro temperatūra nuo 2023 m. gruodžio mėn. iki 2024 m. vasario mėn. pagal Roshydromet duomenis (2024 m.)



F. Amžinojo įšalo sluoksnio sezoninio atšilimo didėjančio gylio sritys. Duomenų šaltinis: <https://permafrost.su/>

Remiantis hipoteze, į pietus nuo Gydanio ir Taimyro pusiasalių yra kylanti pliumo dalis su keliomis atšakomis. Apskaičiuota, kad pliumo galvos skersmuo siekia 1 200-1 500 km, o magminio srauto sklaidos zona gali siekti 2 500-3 000 km. Šis regionas apima Vakarų Sibiro plokštės ir Rytų Sibiro kratono struktūras.

Šiuo metu pliumo galva daro įtaką Rytų Sibiro kratono pagrindui, skleisdama magminius srautus po jo teritoriją. Tikėtina, kad šis procesas prisideda prie padidėjusio seisminio

aktyvumo plokščių pakraščiuose, įskaitant tokias teritorijas kaip Baikalas ir net Uralas. Tokių anomalijų priežastis būtų plokščių pakraščiuose yra plokščių destabilizacija dėl po jomis esančios astenosferos suminkštėjimo ir nežymaus centrinės Sibiro bloko Žemės plutoje pakilimo, tai yra, Vakarų Sibiro plokštės ir Rytų Sibiro kratono tektoninės struktūros kartu su Verchojansko-Čiukotkos raukšlėtosios sistemos tektonine struktūra.

Seisminio aktyvumo padidėjimas kaip tektoninių plokščių destabilizacijos dėl Sibiro magminio pliumo aktyvumo indikatorius

Taikant seisminio aktyvumo analizės metodiką iš Tarptautinio seismologijos centro (ISC) interneto svetainės gauti duomenys buvo parsisiųsti ir specialiai apdoroti. Kadangi duomenyse yra skirtingų šaltinių iš įvairių šalių ir mokslinių tyrimų institutų, taip pat skirtingų magnitudžių tipų (M_w, M_s, M_b, M_L, M_D ir kt.), buvo atliktas tam tikras duomenų apdorojimo algoritmas, kad iš skirtingų šaltinių būtų atrinktas atitinkamas magnitudžių tipas (žr. 1 priedą). Pagrindinė apdorojimo algoritmo idėja buvo atrinkti medianinę reikšmę iš labiausiai paplitusių magnitudės tipų kiekvienam įvykiui, nes kiekvienam įvykiui skirtingi šaltiniai ISC duomenų bazei pateikė skirtingus magnitudės tipus ir reikšmes. Vidutiniškai toks apdorojimas lemia nedidelį magnitudės sumažėjimą, palyginti su didžiausia pateikta verte, tačiau, kaip parodė patirtis, medianos pagrindu sukurtas algoritmas duoda rezultatus, kurie gerai atitinka Gutenber-

go-Richterio dėsnį ir kitus dėsningumus bei gana gerai dera su kitų seismologinių šaltinių, tokių kaip IRIS ir USGS, duomenimis.

Algoritmu gauti duomenys buvo filtruojami pagal ISC duomenų bazėje esančius įvykių tipus (žr. 1 priedėlį), siekiant pašalinti įvykius, kuriuos sukėlė žmogaus veikla kasybos metu: sprogitus, įtariamus sprogitus, uolienų sprogitus ir kt. Be to, kadangi Rusijoje yra daug kasybos įmonių, ISC duomenų bazė buvo sugretinta su Rusijos mokslų akademijos Vieningosios geofizikos tarnybos⁴⁴ 2025 m. sausio mėn. duomenimis, kuriuose išvardyti visi žinomi sprogitai ir uolienų sprogitai Rusijoje. Šie įvykiai taip pat buvo atmesti, siekiant užtikrinti, kad gautame duomenų rinkinyje nebūtų įvykių, priskirtinų sprogitams.

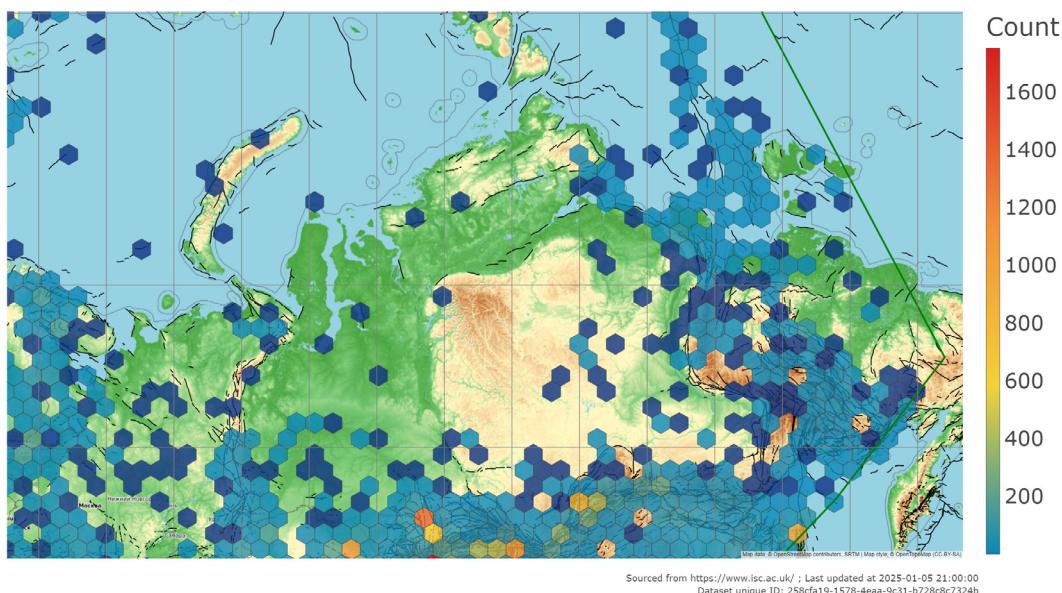
⁴⁴ Federal Research Center, Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences <http://www.ceme.gsras.ru/zr/contents.html>

Dabar panagrinėkime duomenų analizės rezultatus kylančio magminio pliumo regione ir pagrindinių tektoninių blokų, kuriuos jis tiesiogiai veikia, periferinėse zonose. Kadangi Sibiro kratonas laikomas santykinai stabilia, aseismine platforma, net ir nedidelis žemės drebėjimų skaičius jo ribose būtų laikomas anomalija.

45 pav. pavaizduotas žemės drebėjimų tankio pasiskirstymas Rusijoje. Sibiro regione didžiausia žemės drebėjimų koncentracija, kaip tikimasi,

stebima raukšlėtose srityse: Verchojansko kalnagūbryje rytuose, Gakelio kalnagūbryje, Uralo kalnuose vakaruose ir Altajaus-Sajaus regione pietuose. Pavienių įvykių yra ir pačiame Sibire - į pietus nuo Taimyro pusiasalio užfiksuoti keli maždaug 4,0 balo stiprumo žemės drebėjimai. Atidžiau pažvelkime į žemės drebėjimų dinamiką vietinėse Sibiro teritorijose ir vietinių žemės drebėjimų dinamiką Sibiro plento teritorijoje ir gretimuose regionuose.

M3+ žemės drebėjimų tankis Sibiro teritorijoje



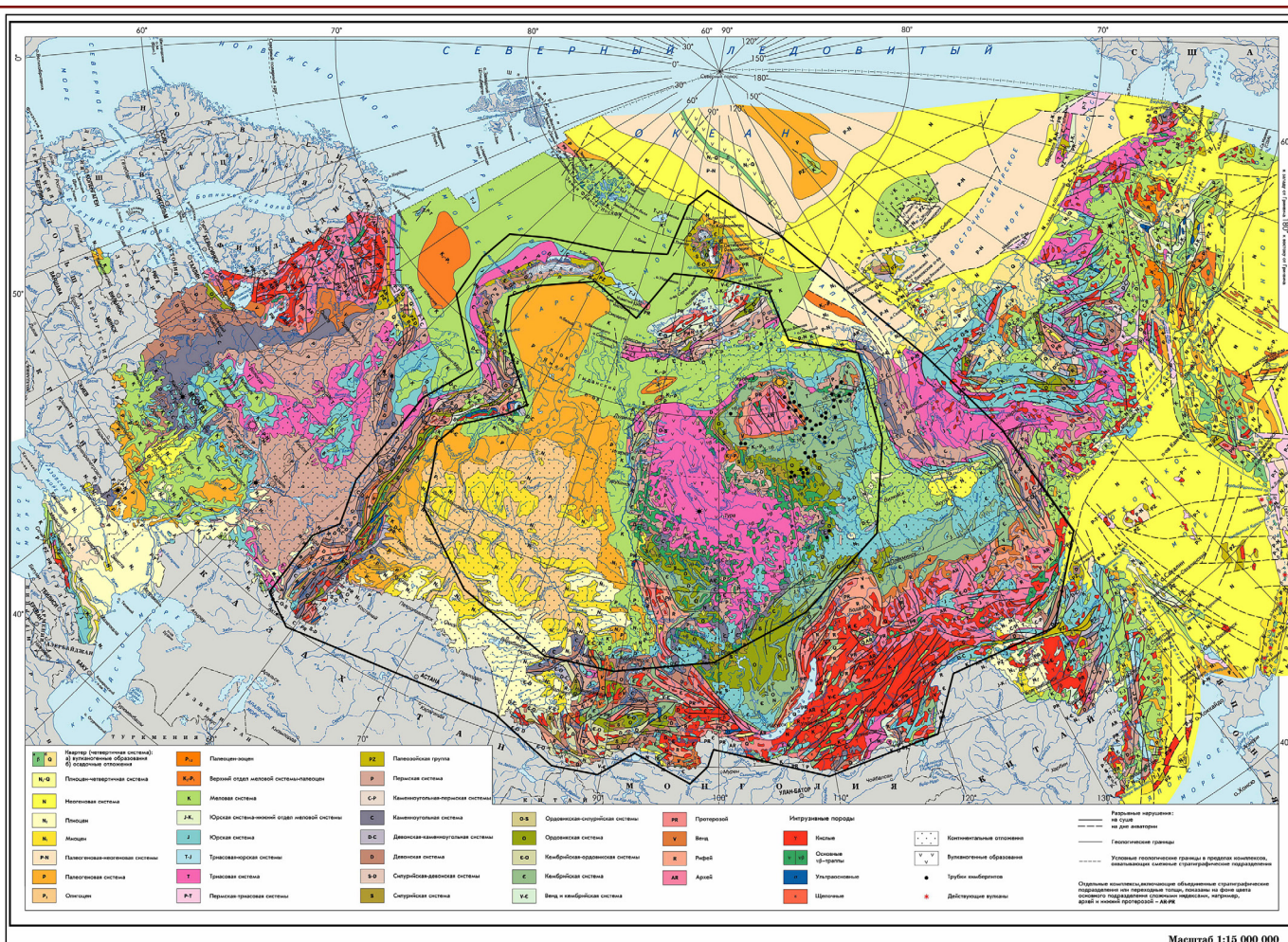
44 pav.

M3+ žemės drebėjimų tankis Sibire 1990-2024 m.

Duomenų šaltinis: ISC duomenų bazė

Remiantis geologinėmis struktūromis, buvo išskirtos sritys, kuriose mantijos pliumas gali daryti skirtingą įtaką (45 pav.). Buvo pasirinkta paties pliumo sritis, kurioje poveikis gali būti susijęs su magmos ir skystosios fazės (magminių dujų)

įsiskverbimu ir slėgiu. Kraštinėse Rytų Sibiro platformos ir Vakarų Sibiro plokštės dalyse pliumo įtaką seismiškumui greičiausiai lemia destabilizuota tankių Žemės plutos blokų padėtis.



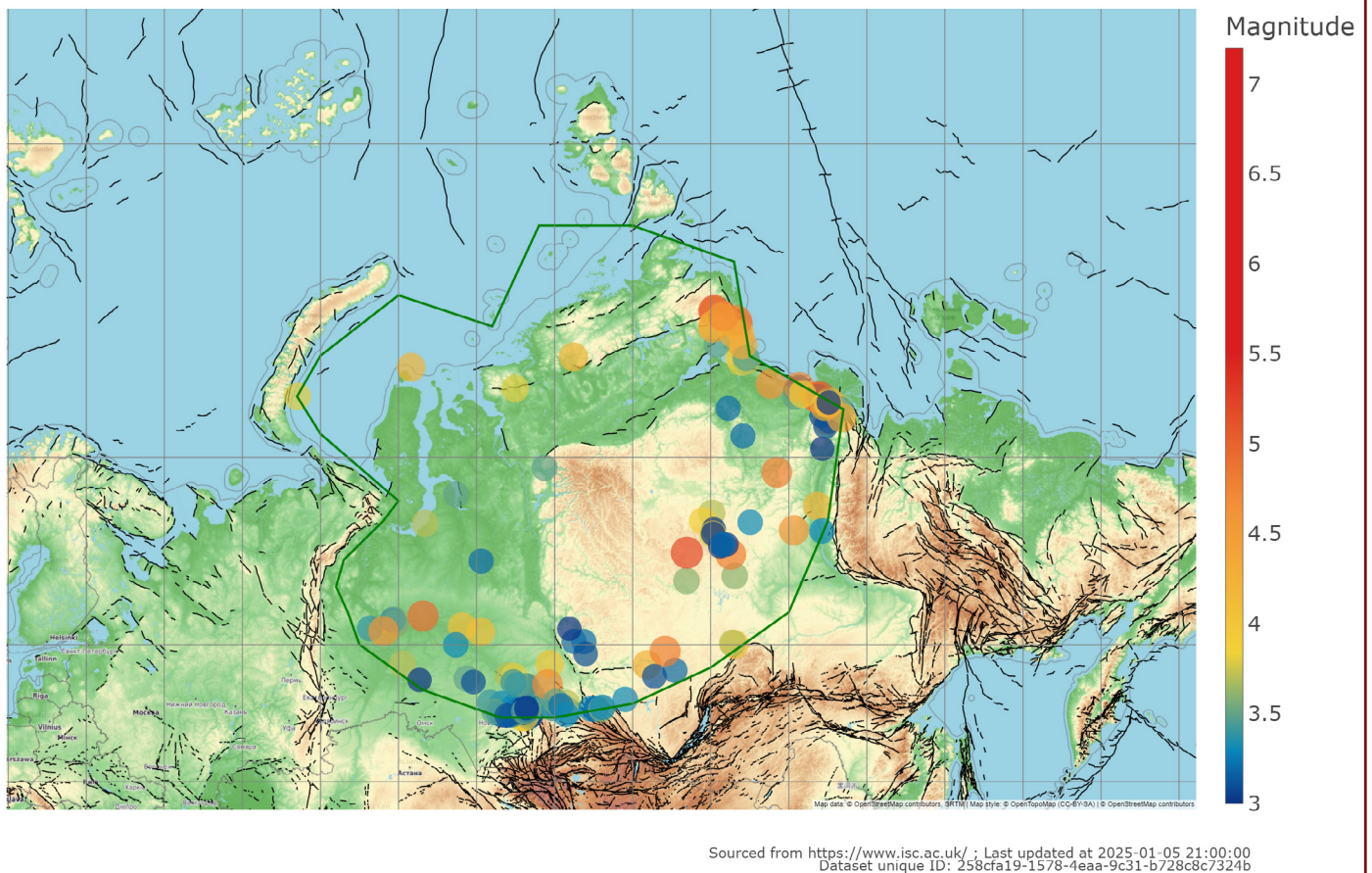
45 pav.

Geologinėmis struktūromis nubrėžta teritorija Sibiro pliumo įsiskverbimo ir šoninio plitimo zonoje (vidinė juoda vieta), skirta seisminio aktyvumo analizei. Išorinė juoda vieta atitinka Sibiro pliumo spaudimo į plokštės ribinio poveikio sritį.

Išsamiau panagrinėkime žemės drebėjimus centriniame Sibiro pliumo regione. 46 pav. pateikiamas žemėlapis, kuriame pavaizduotas žemės drebėjimų, kurių stiprumas 3,0 ir daugiau balų, pasiskirstymas. Žemės drebėjimai užfiksuoti pietinėje Taimyro pusiasalio teritorijoje. Ypač didelį susirūpinimą kelia du neseniai šiame regione 2024 m. rugpjūčio ir rugsėjo mėn. įvykę žemės drebėjimai,

kurių stiprumas buvo atitinkamai 3,5 ir 3,8 balo. Panašaus stiprumo požeminiai smūgiai užfiksuoti Gydano pusiasalio pietinėje dalyje (M3,5) ir Jamalo pusiasalyje (M3,7 ir M4,2) 10 km gylyje. Šie žemės drebėjimai užfiksuoti zonoje, atitinkančioje Sibiro pliumo galvos lokalizaciją, o tai yra nerimą kelianti tendencija, kuri bus paaiškinta toliau.

M3+ žemės drebėjimai, Sibiro pliuro regionas



46 pav.

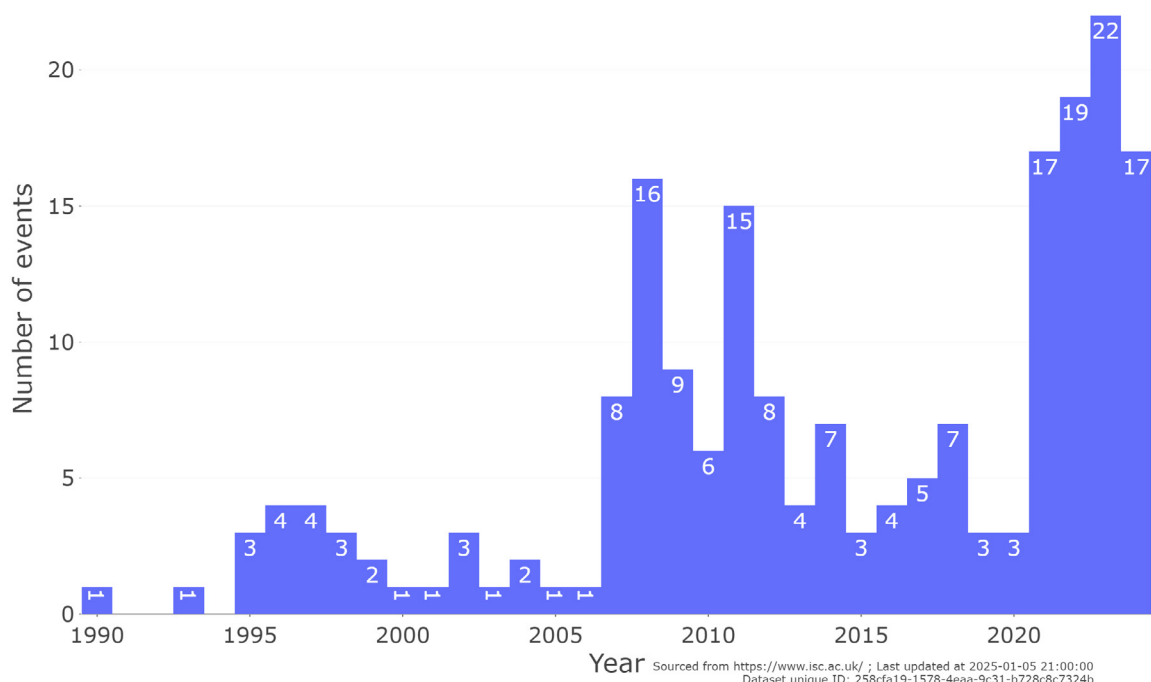
M3,0+ stiprumo žemės drebėjimų žemėlapis Sibiro pliuro regione 1990-2024 m.

Duomenų bazė: ISC.

1990-2024 m. išryškėjusiame Sibiro pliuro regione iš viso užfiksuoti 205 M3,0+ stiprumo žemės drebėjimai. Žemės drebėjimų skaičiaus padidėjimas pastebėtas 1995 m. (47 pav.), o tai sutampa su pasauline seisminio aktyvumo padidėjimo tendencija 1995 m., susijusia su didėjančiu magminiu aktyvumu. Nuo 2007 m. pastebimas žymus žemės drebėjimų skaičiaus padidėjimas, po kurio seisminis aktyvumas

palaipsniui mažėjo. Nuo 2021 m. žemės drebėjimų skaičius vėl smarkiai išaugo ir viršijo ankstesnį metinį lygį. Taigi, Sibiro pliuro regione stebimas banginis seisminio aktyvumo augimas. Pastaraisiais metais užfiksuota pastebimai daugiau įvykių, nei buvo būdinga šiam regionui anksčiau.

M3+ žemės drebėjimai, Sibiro pliumo regionas



47 pav.

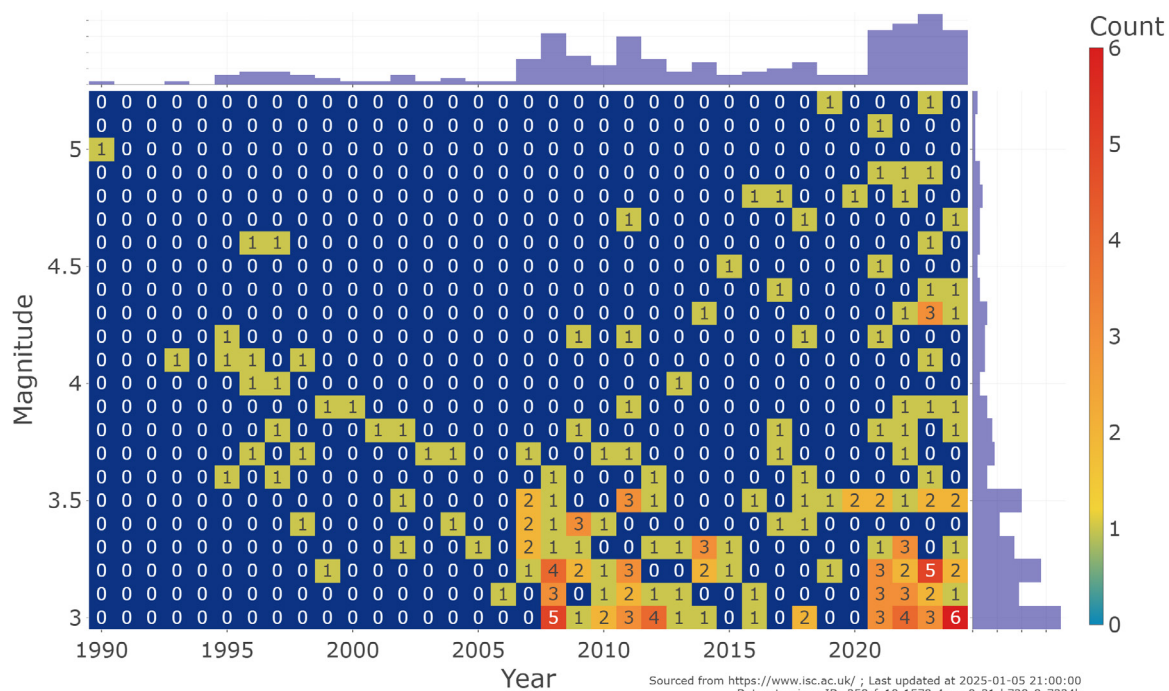
M3.0+ žemės drebėjimų skaičius Sibiro pliumo regione 1990-2024 m.

Duomenų bazė: ISC.

Po 1990 m. įvykusio M5,0 balų stiprumo žemės drebėjimo palaipsniui mažėjo žemės drebėjimų stiprumas ir jų skaičius (48 pav.). Nuo 1990 m. iki 2007 m. užregistruoti tik trys žemės drebėjimai, kurių stiprumas viršijo M4,5. Nuo 2007 m. stebimas laipsniškas žemės drebėjimų stiprumo didėjimas. Pirmą kartą per

visą užfiksuotą istoriją nuo 2019 m. įvyko M5,1 ir M5,2 stiprumo žemės drebėjimai. Visi M4,5+ magnitudės žemės drebėjimai įvyko pliumo periferijoje (49 pav.), o kai kurie - stabiliose teritorijose, kuriose nėra žinomų lūžių.

M3+ žemės drebėjimai, Sibiro pliumo regionas

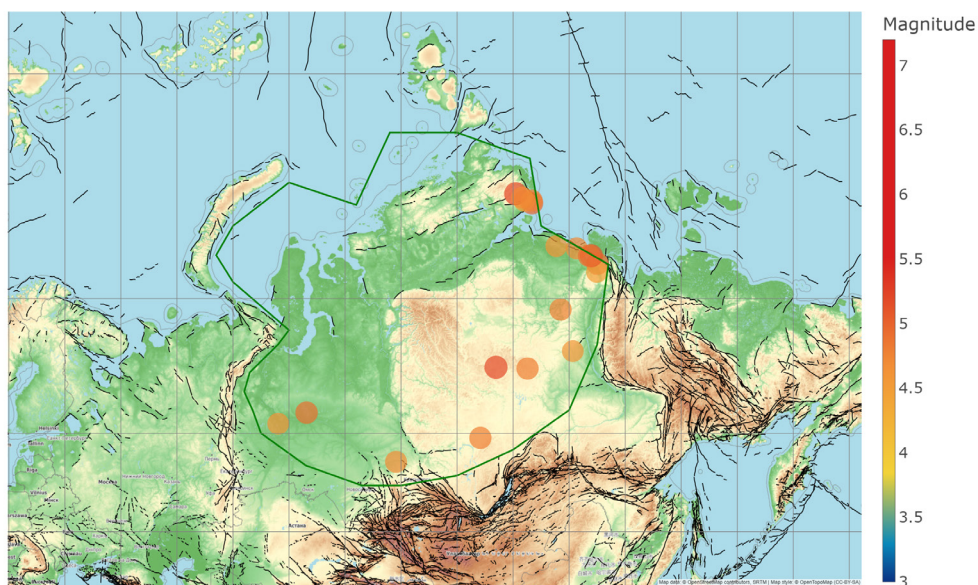


48 pav.

Žemės drebėjimų, įvykusių Sibiro pliumo regione 1990-2024 m., pasiskirstymas pagal stiprumą.

Duomenų šaltinis: ISC.

M4.5+ žemės drebėjimai, Sibiro pliumo regionas



49 pav.

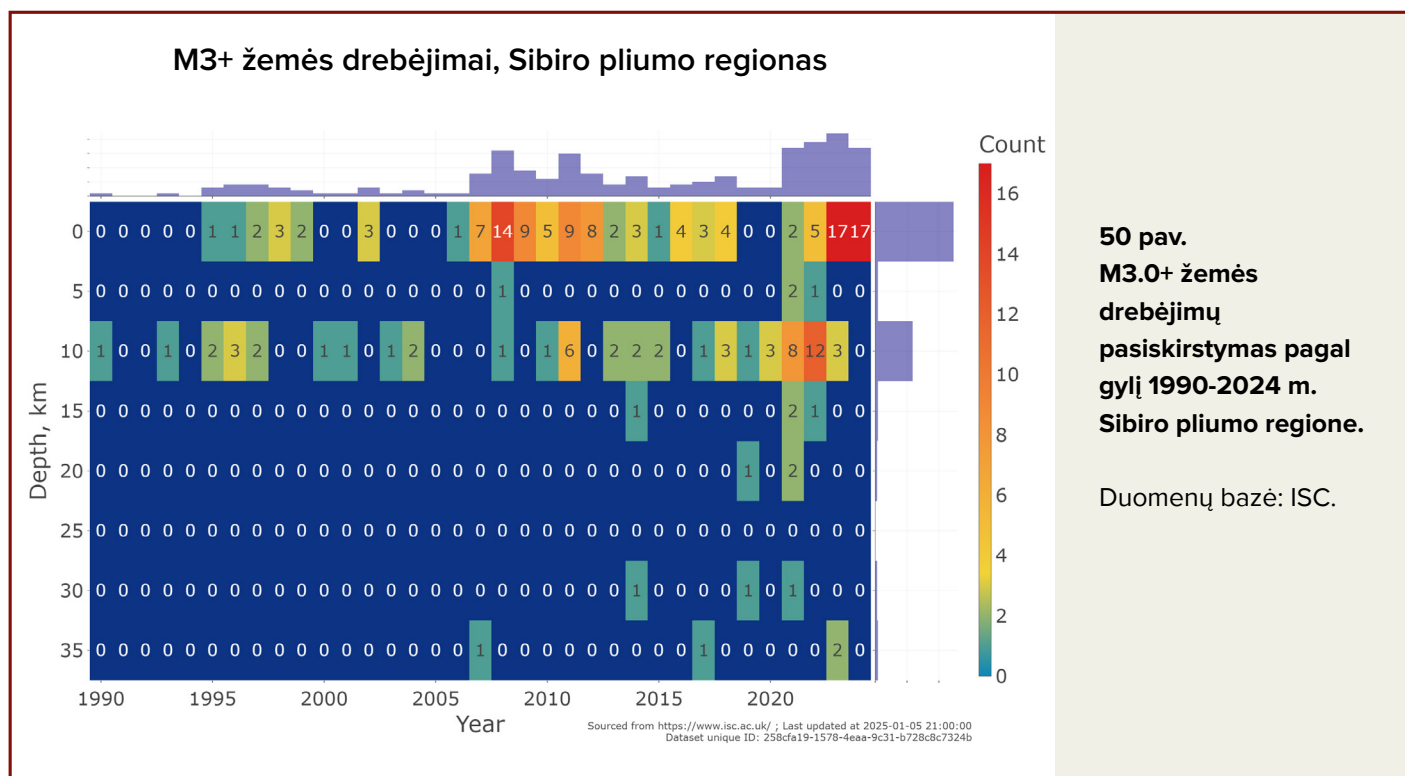
M4,5+ žemės drebėjimų žemėlapis Sibiro pliumo teritorijoje 1990-2024 m.

Duomenų šaltinis: ISC.

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

Tais pačiais 2007 m. 33 km gylyje ties Moho riba pirmą kartą užfiksuotas 3,7 balo stiprumo žemės drebėjimas (50 pav.). Po 2014 m. žemės drebėjimai žemės plutos pagrindu, 30-35 km

gylyje, ėmė vykti gerokai dažniau, o jų stiprumas priartėjo prie 5,0 balo. Visi jie išsidėstę numanomos pliumo vietos pakraščiuose.



Žemės drebėjimų analizė spėjamoje Sibiro pliumo zonoje rodo, kad seismiškumas didėja kaip banga: žemės drebėjimų skaičius didėja, jų stiprumas didėja, jie įvyksta giliau. Tai rodo, kad plokštė deformuojasi veikiamą didžiulio magmos slėgio iš apačios. Šių procesų eiga neišvengiamai lems Sibiro pliumo išsiveržimą netolimoje ateityje dėl toliau išvardytų priežasčių.

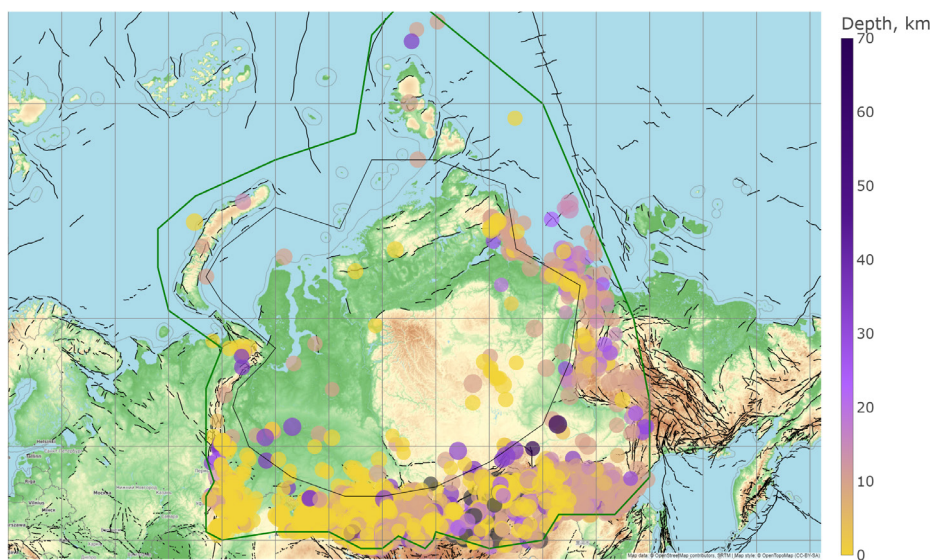
Rytų Sibiro kratono pagrindą sudaro magminės ir metamorfinės uolienos, sudarančios tankią monolitinę plutą, kurią suformavo prieš 250 mln. metų įvykę išsiveržimai. Stiprių žemės

drebėjimų, kurių stiprumas prasideda nuo 7,0 balo, atsiradimas šiame regione rodytų, kad Sibiro kratono platforminės struktūros patiria deformacijas, viršijančias uolienų stiprumo ribas. Norėdami pailustruoti, kaip monolitinis Sibiro kratonas galėtų skilti veikiamas pliumo slėgio, įsivaizduokite, kaip stiklas pradeda skilinėti prieš pat jam visiškai sudūžtant. Taigi, stiprių žemės drebėjimų atsiradimas šiame regione gali reikšti pliumo prasiveržimo į paviršių pradžią tiesiog per vieną dieną.

Šiuo metu, siekiant išsiaiškinti tikrąją padėtį, susijusią su pliumo plitimu ir Žemės plutos tvirtumu Sibiro magminio pliumo zonoje, labai svarbu įrengti papildomus seisminius jutiklius, pageidautina kelių kilometrų gylio gręžiniuose. Tai leis atlikti išsamią Žemės plutos ir mantijos seisminę tomografinę analizę ir nuolat stebėti pliumo padėtį bei aktyvumą (žr. skyrių „Planinis ir kontroliuojamas degazacijos procesas“).

Reikėtų atkreipti dėmesį į žemės drebėjimų pasiskirstymą pagal gylį Sibiro pliumo zonoje ir jo periferinėse zonose (51 pav.). Žemės drebėjimai netoli Moho ribos (didesniame nei 30 km gylyje) ir mantijoje daugiausia pasitaiko raukšlėtuose regionuose ir, matyt, apibrėžia numanomą Sibiro pliumo vietą.

M3.5+ žemės drebėjimai, Sibiro pliumo regionas



Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> : Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 25bdfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

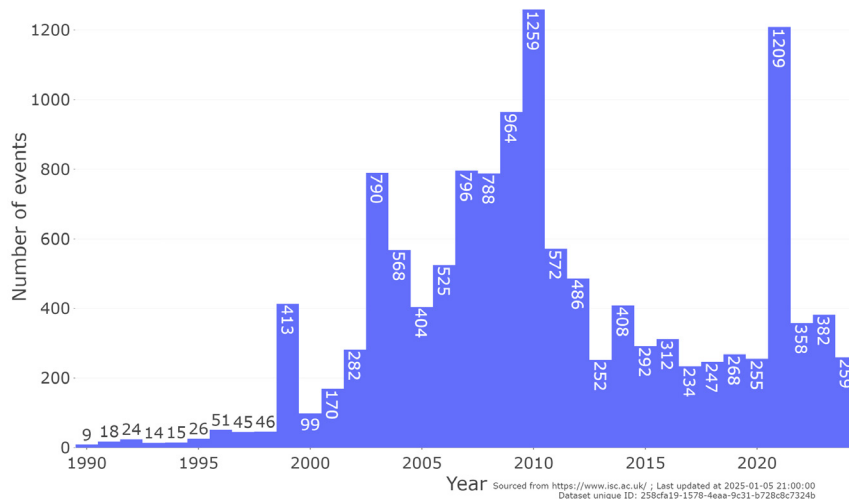
51 pav.
M3,5+ žemės drebėjimų
žemėlapis Sibiro pliumo regione
1990-2024 m. Spalvų skalė
atitinka gylį.

Duomenų bazė: ISC.

Panagrinėkime seisminį aktyvumą būtent periferinėse Sibiro pliumo dalyse. Geologiniu požiūriu šios sritys priklauso raukšlėtosioms juostoms ir seismiškai aktyviems regionams, kuriuose seismiškumą gali lemti ir tektoniniai judesiai, ir magminio pliumo įtaka. Žemės drebėjimų skaičiaus grafikas rodo mišrų persidengiančių seisminio aktyvumo veiksnių vaizdą (52 pav.). Kai kuriais metais matomi reikšmingi seisminio aktyvumo šuoliai. Norint geriau suprasti šių procesų pobūdį, kiekvieną regioną reikia nagrinėti atskirai.

Išanalizavus Verchojansko raukšlėtąsias struktūras ir lūžių zonas Laptevų jūros dugne (53 pav.), matyti, kad 2013 ir 2021-2022 m. pastebimai padaugėjo M3+ žemės drebėjimų (54 pav.). Tokie šuoliai būdingi magmos įsiskverbimo fazėms, kurios sukelia reikšmingus Žemės plutos vientisumo sutrikimus ir skysčio kiekio išsiskyrimą per uolienų lūžius ir netoliese esančius lūžius. Šiuos reiškinius dažnai lydi žemo stiprumo žemės drebėjimų padažnėjimas, žemės drebėjimų rojų, o kartais net jų serijų atsiradimas.

M3+ žemės drebėjimai Sibiro pliumo pakraščiuose

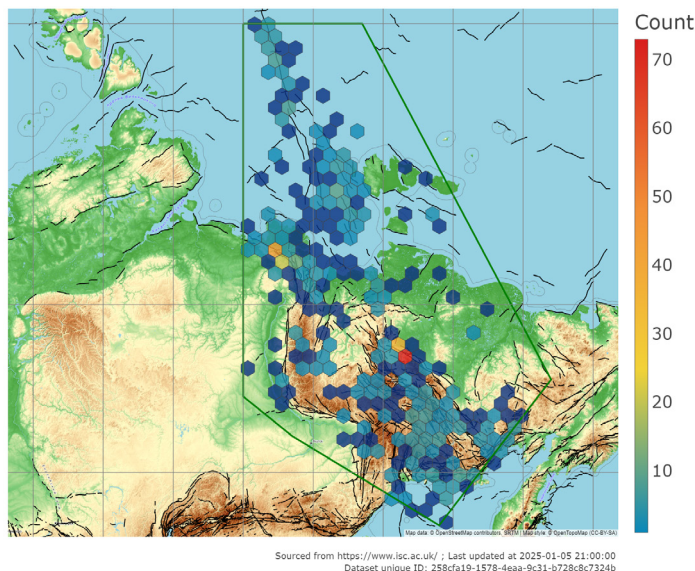


52 pav.

M3.0+ žemės drebėjimų skaičius Sibiro pliumo periferinėse teritorijose 1990-2024 m. Žemės drebėjimai pliumo viduje nebuvo įtraukti (47 pav.).

Duomenų šaltinis: ISC.

M3+ žemės drebėjimų intensyvumas, šiaurės rytų dalis

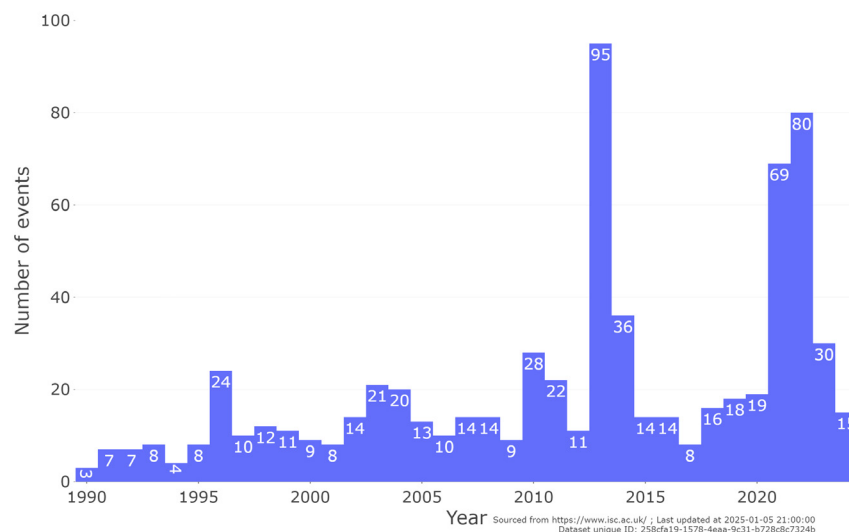


53 pav.

M3+ žemės drebėjimų tankis pasirinktame pjūvyje Sibiro plutos bloko šiaurės rytiniame pakraštyje 1990-2024 m. Juodai pažymėtos lūžių linijos.

Šaltinis: ISC duomenų bazė.

M3+ žemės drebėjimų tankis, šiaurės rytų dalis



54 pav.

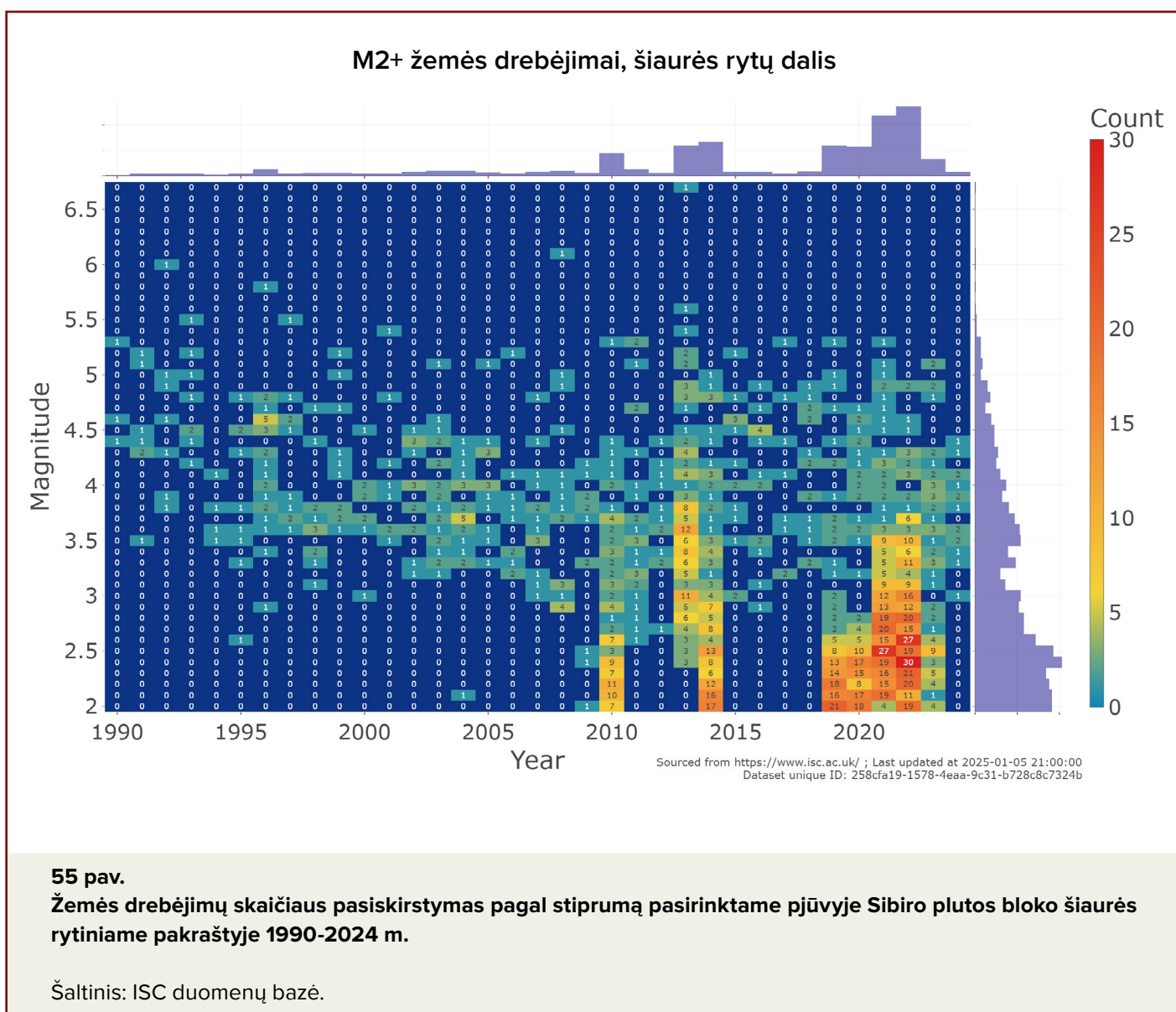
M3+ žemės drebėjimų skaičiaus grafikas pasirinktame pjūvyje Sibiro plutos bloko šiaurės rytiniame pakraštyje 1990-2024 m.

Šaltinis: ISC duomenų bazė.

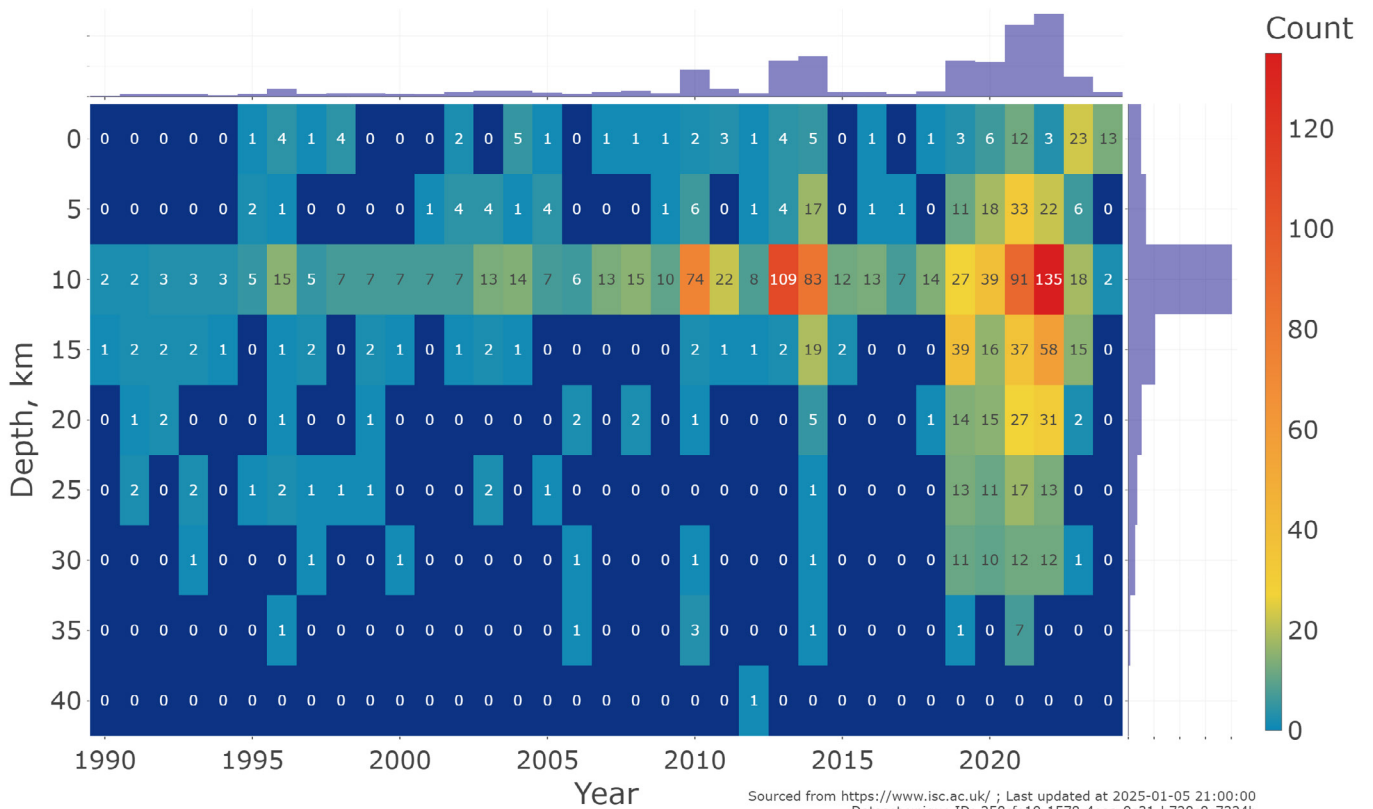
Analizuojant žemės drebėjimų stiprumą šioje zonoje matyti, kad 2010 m., 2013-2014 m. žemės drebėjimų, kurių stiprumas siekė nuo 2 iki 3,5 balo, skaičius smarkiai išaugo, o nuo 2019 m. jų gerokai padaugėjo (55 pav.). Nuo 2019 m. taip pat pastebimai padaugėjo žemės drebėjimų, paveikusių Žemės plutą beveik iki pat jos pagrindo, 35 km gylyje (56 pav.). 2013 m.

regione įvyko pirmasis 6,7 balo stiprumo žemės drebėjimas, aiškiai rodantis arba užsitęsusių slėgio kaupimosi etapą, arba susikaupusių magminių skysčių išsiskyrimą.

Atskirai reikėtų apžvelgti grupę žemės drebėjimų pietryčių kryptimi nuo Taimyro pusiasalio (57 pav.).



M2+ žemės drebėjimai, šiaurės rytų dalis

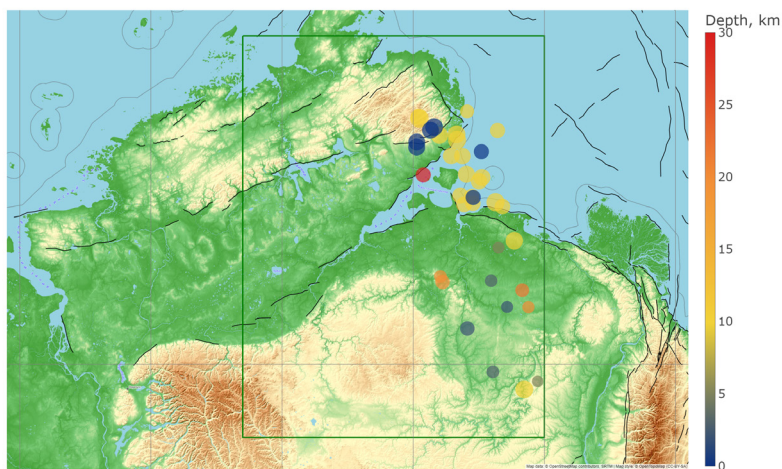


56 pav.

M2+ žemės drebėjimų pasiskirstymas pagal gylį pasirinktame pjūvyje Sibiro plutos bloko šiaurės rytiniame pakraštyje 1990-2024 m.

Šaltinis: ISC duomenų bazė.

M2+ žemės drebėjimai į šiaurės rytus nuo Taimyro pusiasalio



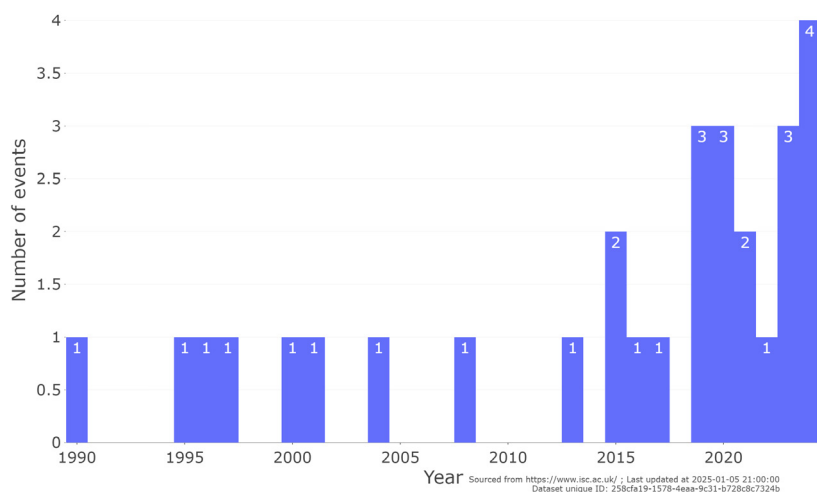
57 pav.

M2+ žemės drebėjimų pasiskirstymo žemėlapis pasirinktoje teritorijoje į šiaurės rytus nuo Taimyro pusiasalio 1990-2024 m.

Duomenų šaltinis: ISC.

2019-2020 m. šioje teritorijoje taip pat buvo stebimas nedidelio ir vidutinio stiprumo seisminio aktyvumo pakilimas (58, 59 pav.).

M3+ žemės drebėjimai į šiaurės rytus nuo Taimyro pusiasalio

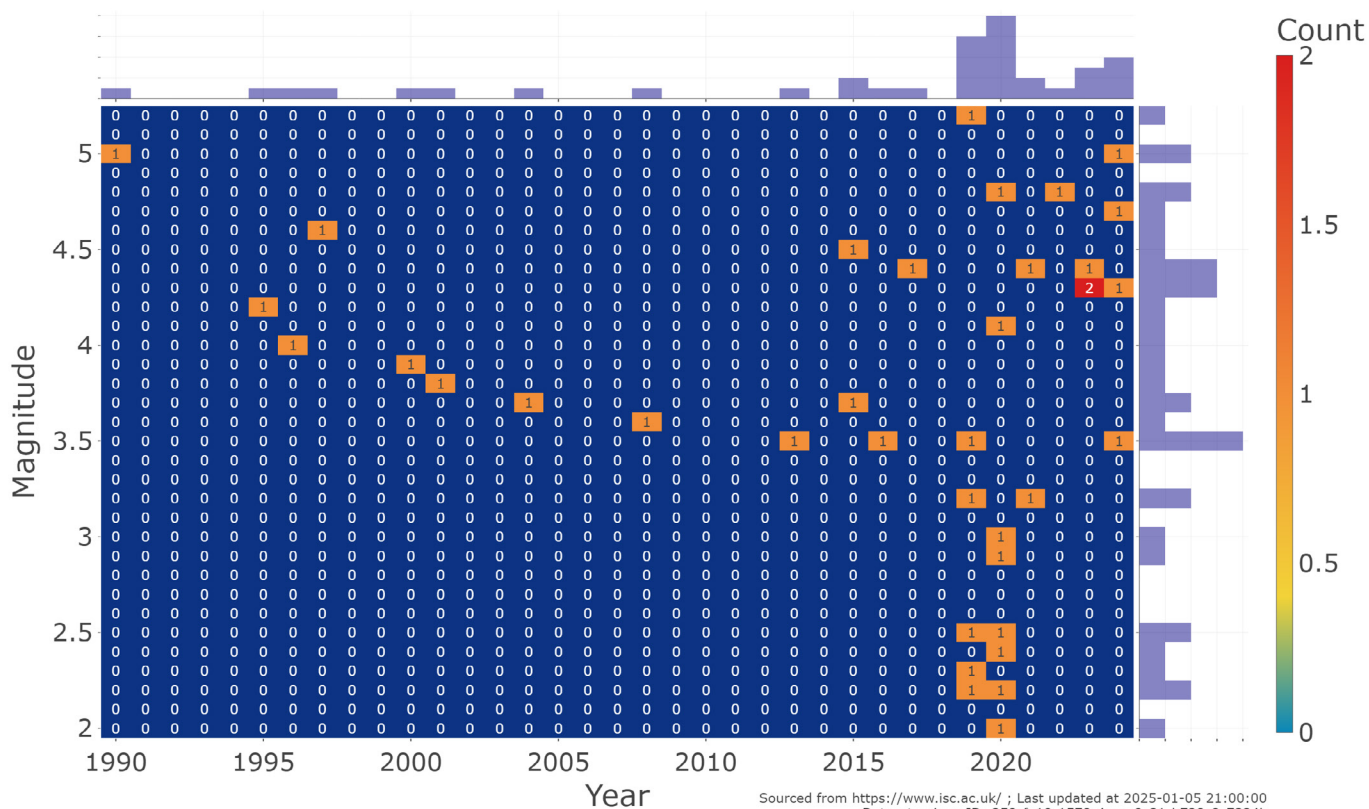


58 pav.

M3+ žemės drebėjimų skaičiaus grafikas pasirinktoje teritorijoje į šiaurės rytus nuo Taimyro pusiasalio.

Duomenų šaltinis: ISC.

M2+ žemės drebėjimai į šiaurės rytus nuo Taimyro pusiasalio



59 pav. Žemės drebėjimų skaičiaus pasiskirstymas pagal stiprumą pasirinktoje teritorijoje į šiaurės rytus nuo Taimyro pusiasalio 1990-2024 m.

Source: ISC Database.

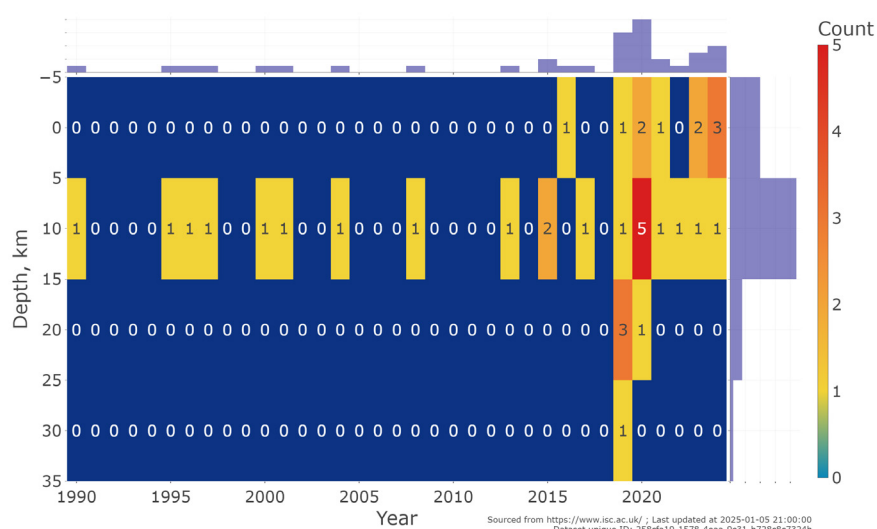
2019-2020 m. pastebimas ženklus žemės drebėjimų, pasiekiančių plutos pagrindą, gylio padidėjimas (60 pav.) tais pačiais laikotarpiais, kaip ir Verchojansko raukšlėtosios struktūros srityje.

Reikėtų pabrėžti, kad ši zona yra Sibiro pliumo galvos įtakoje. Nepaisant palyginti nedidelio žemės drebėjimų skaičiaus, šioje zonoje stebima panaši žemės drebėjimų gilėjimo ir dažnėjimo tendencija kaip ir Verchojansko raukšlėtųjų

struktūrų zonoje, tačiau pradedant 2019 m.

Tiriamos teritorijos pietinė dalis apima Altajaus-Sajano raukšlėtąjį juostos regioną ir Baikalo sritį (61 pav.). Tai tektoniškai mobilus ir seismiškai aktyvus regionas. Seisminio aktyvumo pikas buvo stebimas 1999 m. ir 2021 m. (62 pav.). Žemės drebėjimų magnitudė pradėjo augti nuo 2007 m., pasiekiant M6.8 2021 m. (63 pav.).

M2+ žemės drebėjimai į šiaurės rytus nuo Taimyro pusiasalio

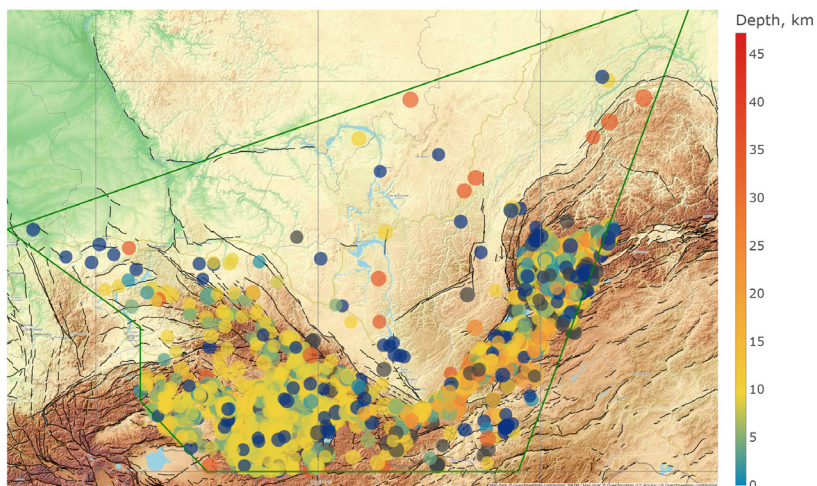


60 pav.

M2+ žemės drebėjimų skaičiaus pasiskirstymas pagal gylį pasirinktoje teritorijoje į šiaurės rytus nuo Taimyro pusiasalio.

Duomenų šaltinis: ISC.

M3+ žemės drebėjimai, pietinė Rytų Sibiro dalis

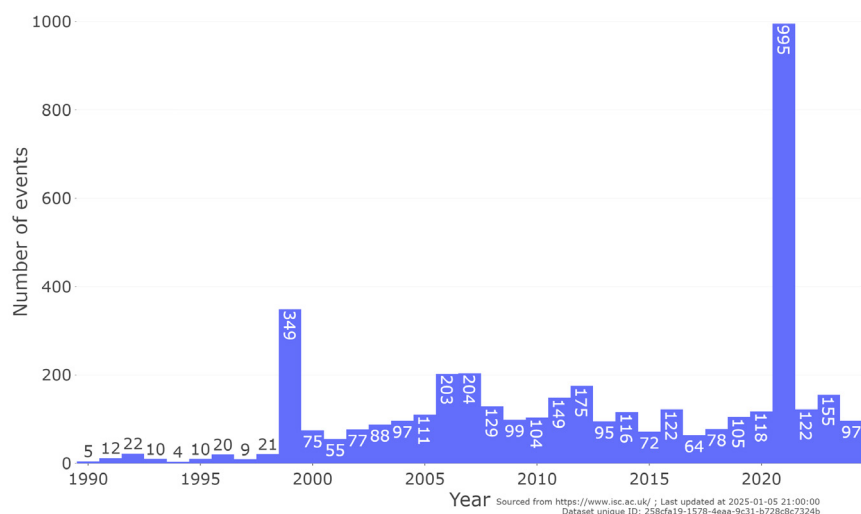


61 pav.

M3+ žemės drebėjimų, užregistruotų 1990-2024 m., epicentrų žemėlapis pasirinktoje teritorijoje pietinėje Rytų Sibiro dalyje.

Duomenų šaltinis: ISC.

M3+ žemės drebėjimai, pietinė Rytų Sibiro dalis

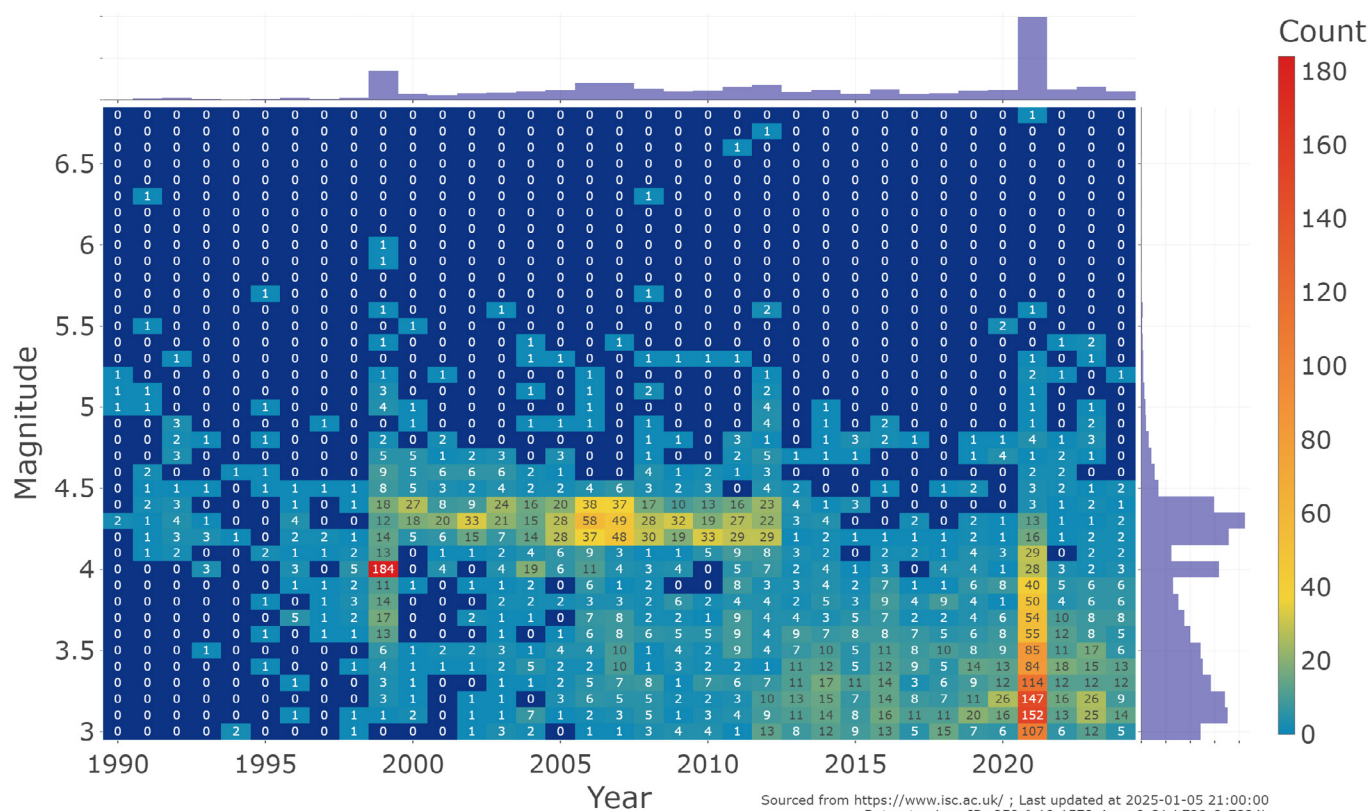


62 pav.

M3+ žemės drebėjimų skaičius
pietinėje Rytų Sibiro dalyje.

Duomenų šaltinis: ISC.

M3+ žemės drebėjimai, pietinė Rytų Sibiro dalis



63 pav.

Žemės drebėjimų pasiskirstymas pagal stiprumą pasirinktoje teritorijoje pietinėje Rytų Sibiro dalyje 1990-2024 m.

Duomenų šaltinis: ISC.

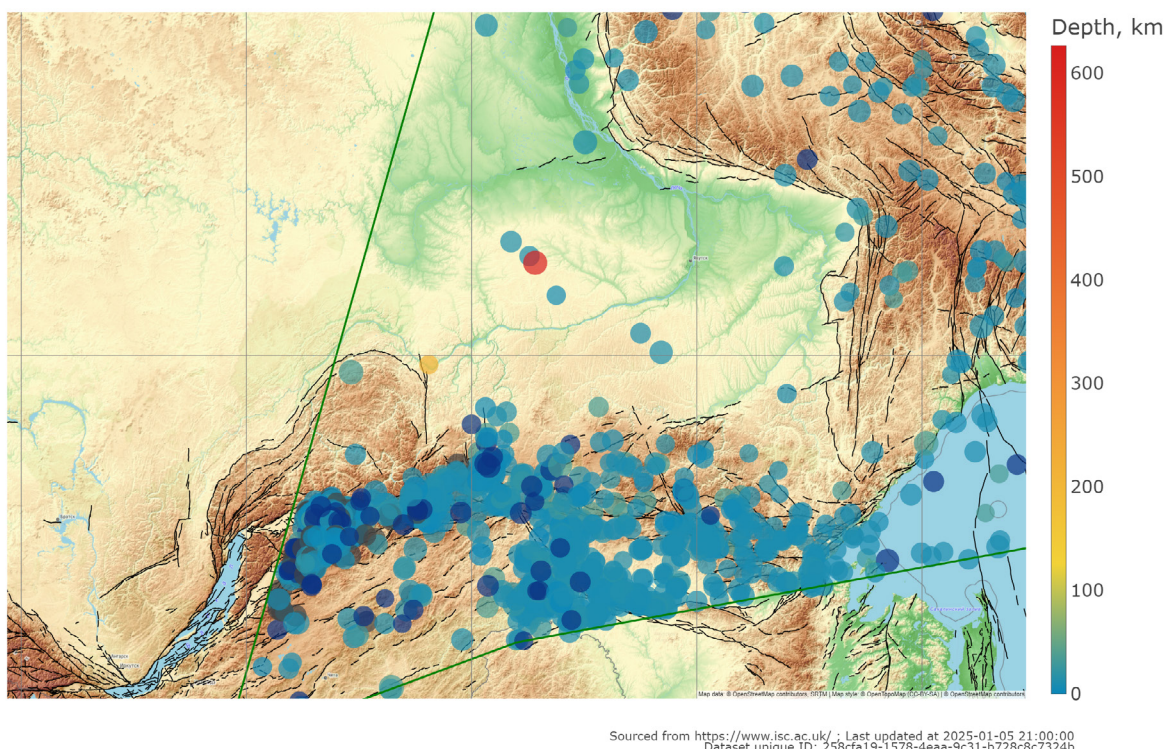
Svarbu pažymėti, kad po Sibiro kratonu vyksta mantijos žemės drebėjimai. Dar 1998 m. Viliujaus sineklizės rajone, 211 km gylyje, užfiksuotas 3,3 balo stiprumo žemės drebėjimas. Tai buvo netikėtas faktas, tačiau dar unikalesnis įvykis buvo 2023 m. tame pačiame regione 627 km gylyje įvykęs stiprus 5,1 balo žemės drebėjimas (64 pav.).

Pats gilaus židinio seisminio aktyvumo pasireiškimas po stabiliu Žemės plutos kratoniniu bloku yra išskirtinis įvykis. Tradiciškai manoma, kad tokie vidinės mantijos žemės drebėjimai vyksta vadinamosiose subdukcijos zonose, tačiau artimiausia subdukcijos zona yra už tūkstančių kilometrų ir negali daryti įtakos šiam regionui.

Šios ataskaitos autoriai mano, kad šių žemės drebėjimų giluminiuose židiniuose priežastys

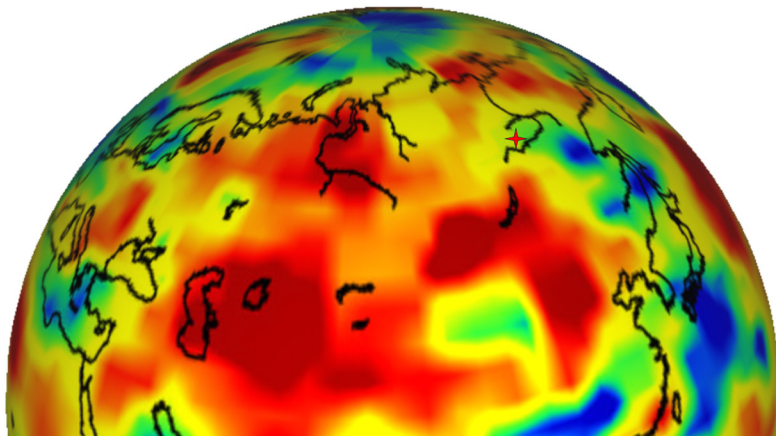
yra milžiniškos galios vidiniai sproginiai, kurie įvyksta santykinai karštesniems magmos srautams susidūrus su santykinai vėsesniais. Pagal seismotomografinį modelį abiejų gilaus židinio žemės drebėjimų vietose stebimos seisminių bangų greičių anomalijos. Šios anomalijos atitinka santykinai klampesnių ir skystesnių srautų regionus, kurie greičiausiai atspindi jų temperatūrų skirtumus. Taigi šie du mantijos žemės drebėjimai įvyko santykinai šaltų ir santykinai karštų mantijos srautų sandūroje (65 pav.), išlaisvinant didelius energijos kiekius, kurie sukėlė akustines bangas, seisminių jutiklių užfiksuotas kaip žemės drebėjimai. Tai akivaizdžiai rodo didelį mantijos srautų aktyvumą šioje srityje.

Giluminių žemės drebėjimų Sibire lokacijos



64 pav.

Žemėlapyje pažymėtas gilaus židinio M5,1 žemės drebėjimo epicentras 627 km gylyje po Sibiro platforma 2023 m. ir M3,3 žemės drebėjimo epicentras 211 km gylyje (pažymėta geltonai).



65 pav.

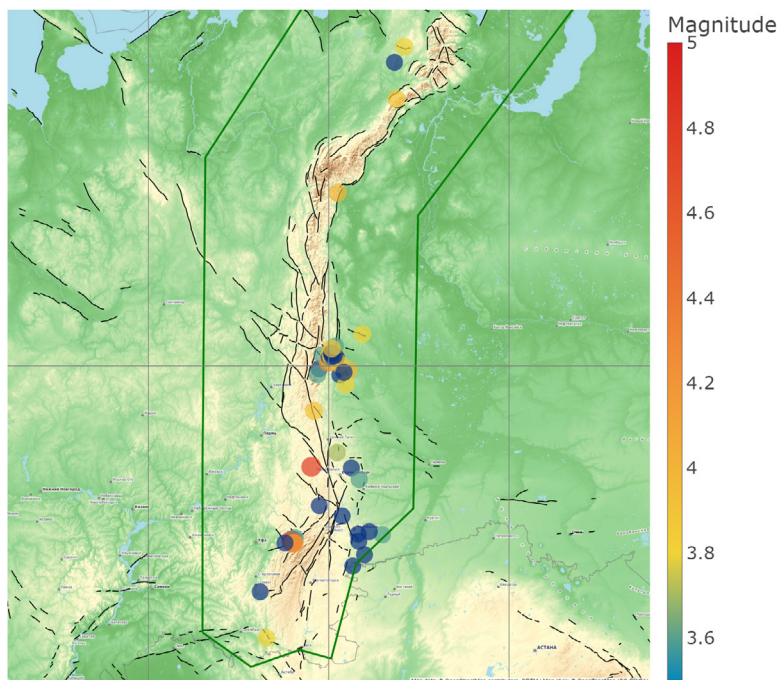
Mažų seisminių greičių zonos mantijoje maždaug 600 km gylyje. 2023 m. M 5,1 žemės drebėjimo hipocentras yra sąlyčio tarp santykinai karštos ir santykinai šaltos mantijos sričių zonoje.

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

Dėl Sibiro bloko kraštinių dalių svyravimo Uralo regione padidėja seisminis aktyvumas. Duomenys analizei buvo filtruojami, siekiant pašalinti su kasybos veikla susijusius seisminius įvykius, atsižvelgiant tik į 3,5 ir didesnio

stiprumo žemės drebėjimus, kad būtų pašalinti žmogaus sukelti įvykiai (66, 67 pav.). Vadinasi, pastebėtas bangų pavidalo seismo aktyvumo padidėjimas atspindi natūralius procesus.

M3.5+ žemės drebėjimai Urale

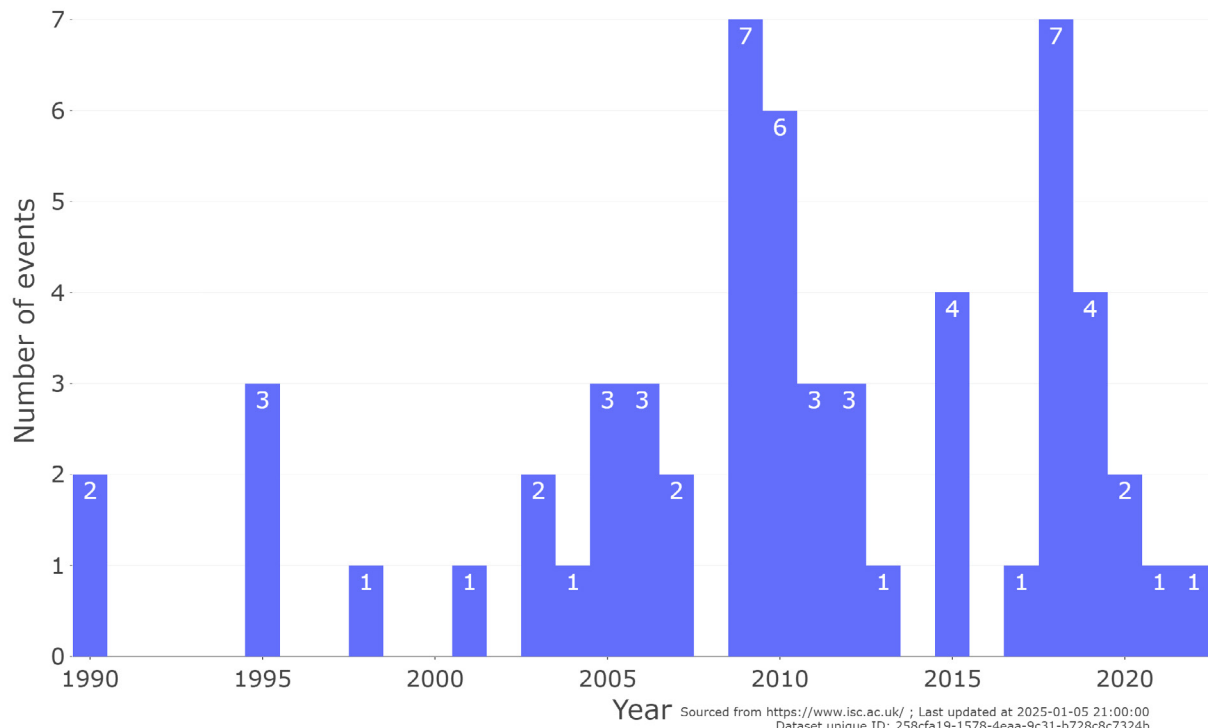


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

66 pav.

Uralo regione 1990-2022 m. užregistruotų M3,5+ žemės drebėjimų epicentų žemėlapis.

M3.5+ žemės drebėjimai Urale



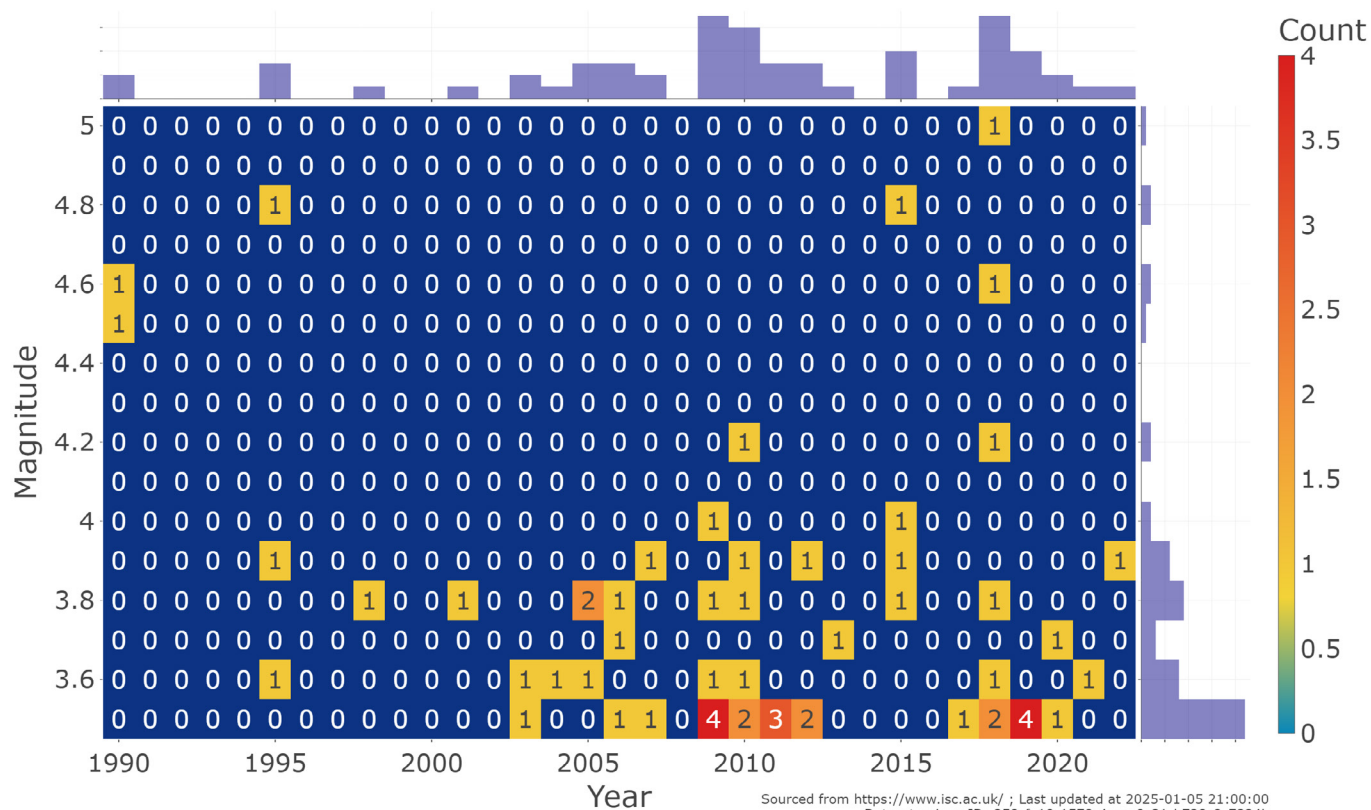
67 pav.

Uralo regione 1990-2022 m. užregistruotų M3,5+ žemės drebėjimų skaičius.

Be to, regione įvyko nuo 4,0 iki 5,0 balų stiprumo žemės drebėjimų, kurie dar kartą įrodo natūralų seismoaktyvumo padidėjimą

(68 pav.). Seismoaktyvumo didėjimas Uralo regione vyksta ne tolygiai, o bangomis, ir tai yra natūralus dėsningumas.

M3.5+ žemės drebėjimai Urale



68 pav.

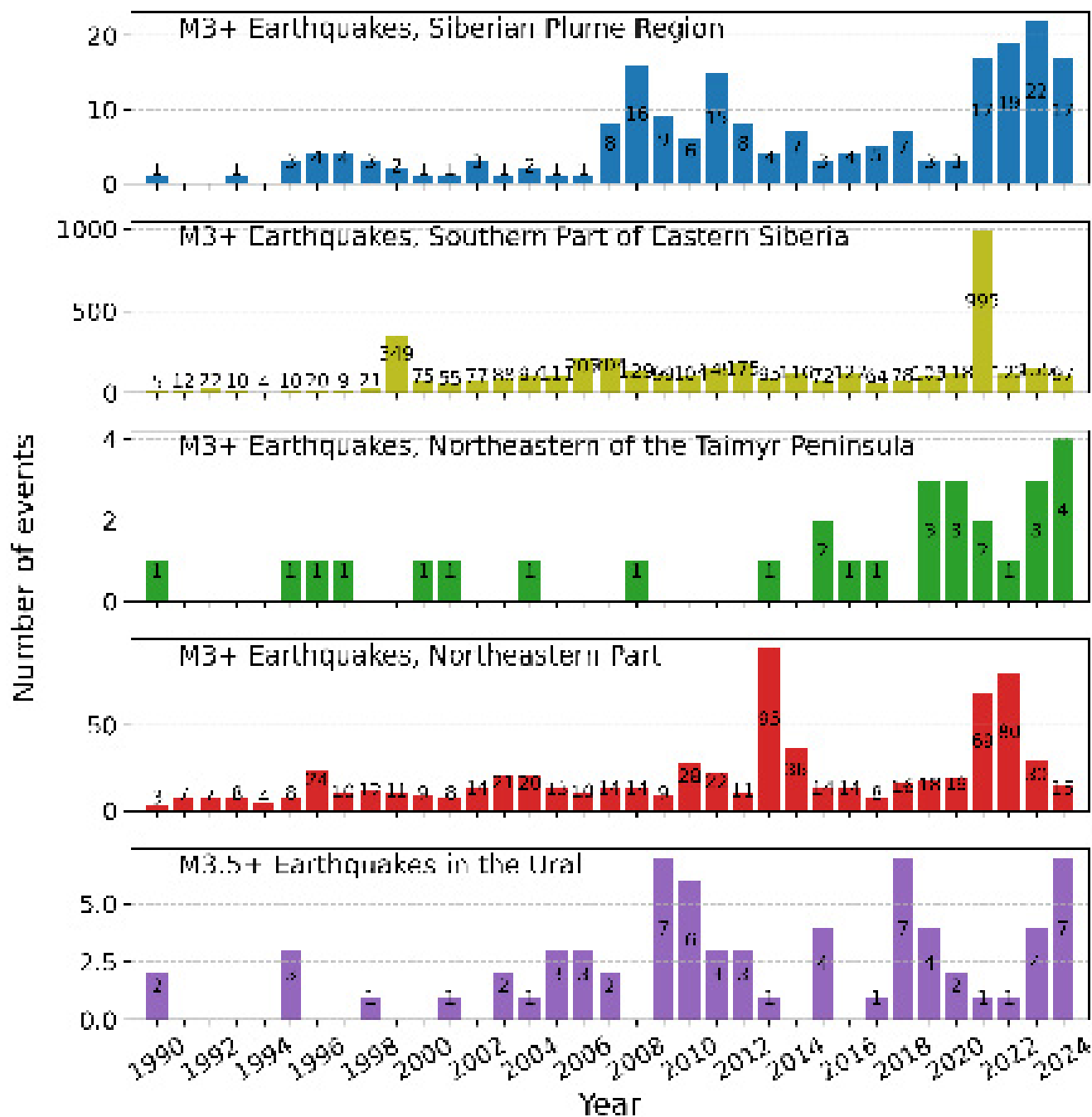
Uralo regione 1990-2022 m. užregistruotų žemės drebėjimų pasiskirstymas pagal stiprumą.

Duomenų šaltinis: ISC.

Norint palyginti seisminio aktyvumo pikų laiką skirtingose Sibiro pliumo regiono dalyse ir aplink jas, pateikiamas grafikas (69 pav.). 2021 m. seisminis aktyvumas padidėjo visuose nagrinėtuose regionuose, išskyrus Uralą. Pastebime, kad aktyvumas didėja visuose regionuose, o pastaraisiais metais įvairiuose regionuose jis didėjo bangų pavidalo, „pulsuojančiais“ šuoliais. Kartu pastebimas tam tikras dėsningumas, primenantis laipsnišką plokštės svyravimą iš vakarų į rytus ir iš šiaurės į pietus.

Taip pat reikėtų atsižvelgti į tai, kad tam

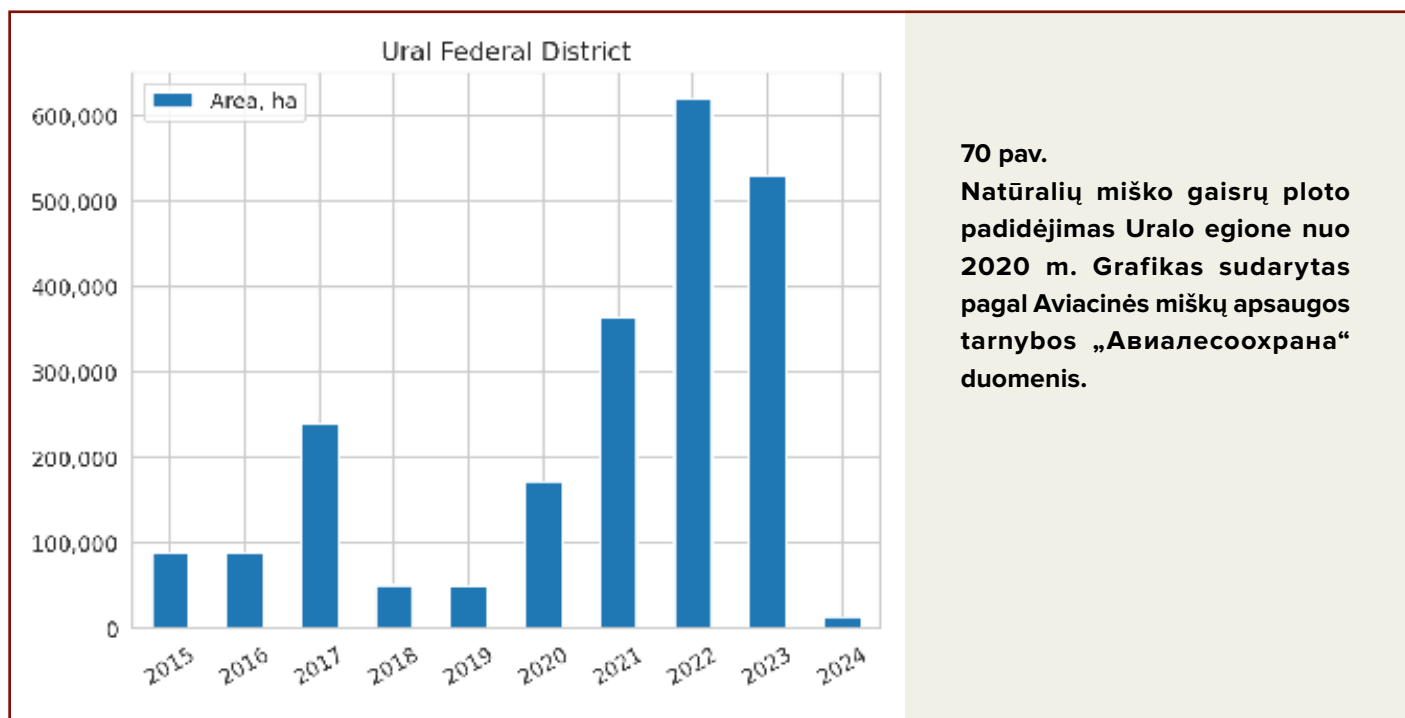
tikrose vietovėse kyla gaisrai. Gaisrų paveiktos teritorijos padidėjimas šiame regione rodo padidėjusį požeminį aktyvumą, nes gaisrai dažnai kyla lūžių zonose, iš kurių išsiskiria degiosios dujos. Šiuos gaisrus sunku užgesinti ir jie labai greitai išplinta dideliuose plotuose. Uralo regione nuo 2020 m. smarkiai padidėjo gamtinių gaisrų plotas (70 pav.). Grafikas sudarytas remiantis Aviacinės miškų apsaugos tarnybos (Авиалесоохрана) duomenimis.



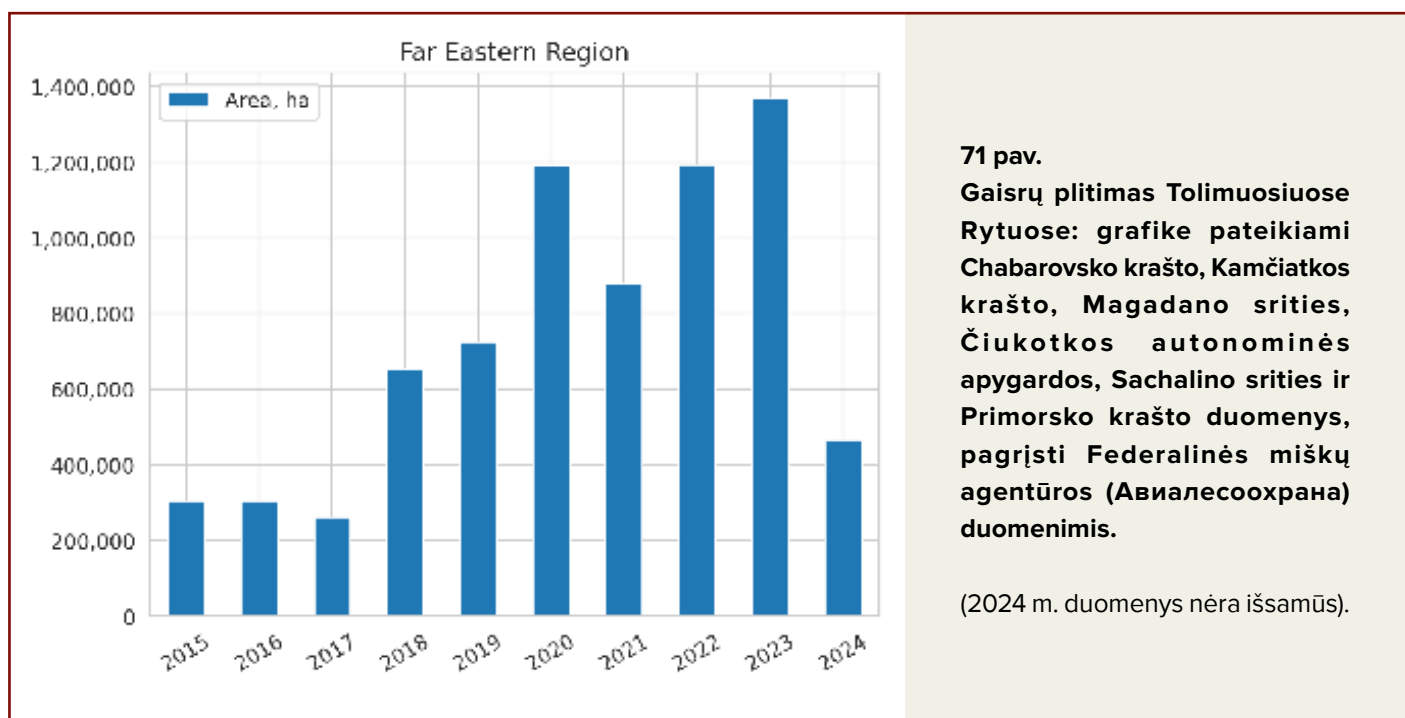
69 pav.

Seisminio aktyvumo pikų pasiskirstymas Verchojansko regione (į rytus nuo Sibiro platformos), pietinėje Rytų Sibiro dalyje, Uralo regione (į vakarus nuo Sibiro platformos) ir centriniame Sibire (įskaitant Vakarų Sibiro plokštę ir Rytų Sibiro platformą) pagal metus. M3+ žemės drebėjimai.

Duomenų šaltinis: ISC.



Tolimųjų Rytų regione gaisrų paveiktas plotas taip pat sparčiai didėja, kaip aiškiai matyti iš diagramos (71 pav.).

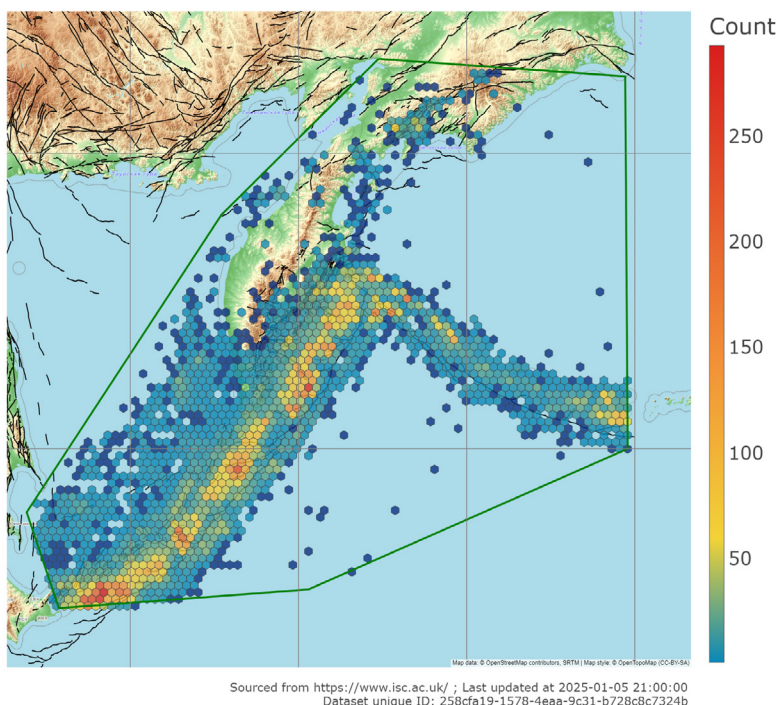


Taigi panašūs seisminio aktyvumo didėjimo ir miškų gaisrų procesai vyksta priešingoje Sibiro ir Tolimųjų Rytų plutos blokų pusėje, ties riba su Ramiojo vandenyno plokšte.

Daroma prielaida, kad Sibiro pliumo įsiskverbimas veikia ir Kurilų-Kamčiatkos regioną, kuris yra žemyninės plutos bloko, spaudžiamo pliumo, galinis regionas. Seisminių duomenų analizė Kamčiatkos ir Kurilų salų

regione rodo, kad pastebimai padaugėjo M4.0+ žemės drebėjimų (72, 73 pav.). Šis regionas yra Ramiojo vandenyno ugnies žiedo dalis (74 pav.) ir rodo seisminio aktyvumo didėjimo tendenciją pagal šios tektoninės struktūros dėsningumus. Tačiau dauguma seisminio aktyvumo šuolių yra nepriklausomi. Tai gali reikšti, kad Sibiro pliumas daro savo įtaką Kamčiatkos ir Kurilų salų regionui.

**M4+ žemės drebėjimų intensyvumas
Kamčiatkos pusiasalyje ir Kurilų salose**

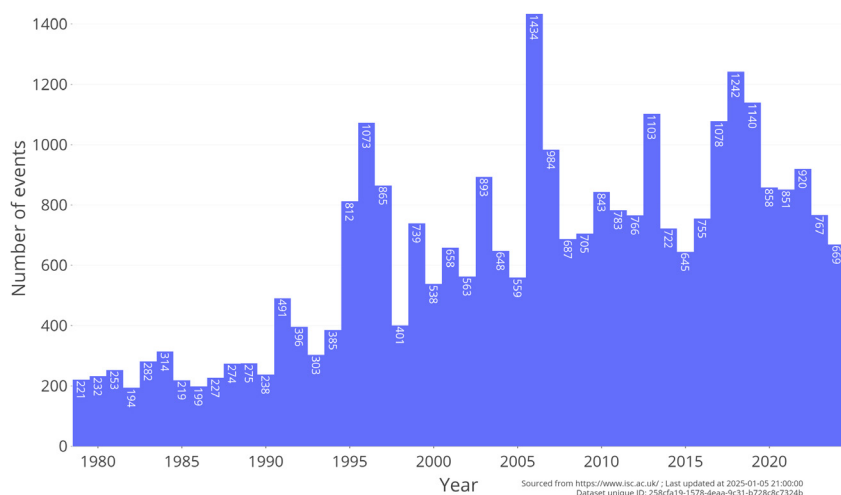


72 pav.

**M4+ žemės drebėjimų tankis
Kamčiatkos pusiasalio ir Kurilų
salų regione 1979-2024 m.**

Duomenų šaltinis: ISC.

M4+ žemės drebėjimai Kamčiatkos pusiasalyje ir Kurilų salose

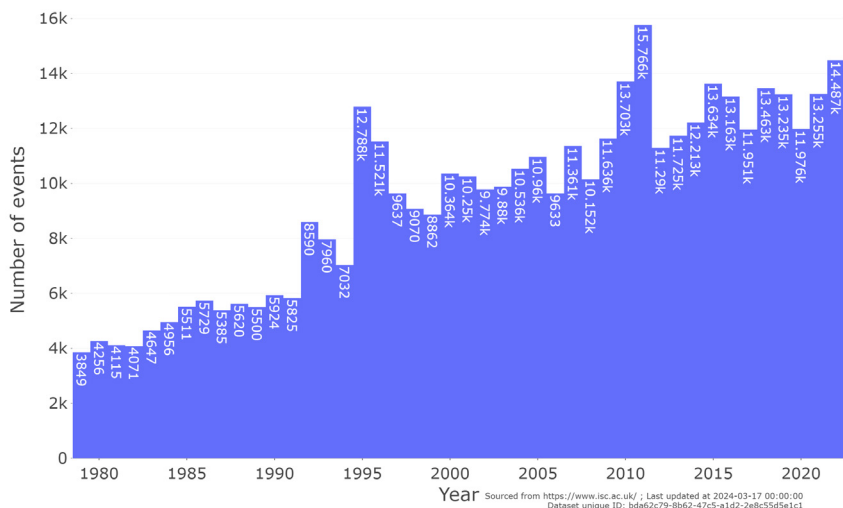


73 pav.

**M4+ žemės drebėjimų skaičiaus
padidėjimas Kamčiatkos
pusiasalio ir Kurilų salų regione
1979-2024 m.**

Duomenų šaltinis: ISC.

M4+ žemės drebėjimai Ugnies žiede 1979-2022



74 pav.

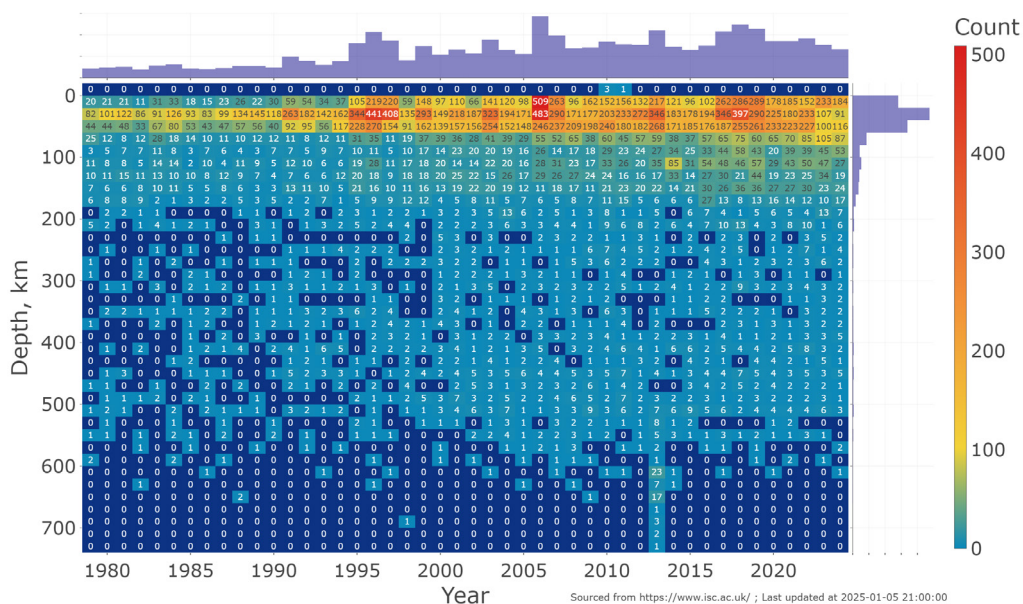
M4+ žemės drebėjimų skaičiaus padidėjimas Ugnies žiedo regione 1979-2022 m.

Duomenų šaltinis: ISC.

Pažymėtina, kad Kurilų-Kamčiatkos regione didėja ir žemės drebėjimų gylis (75 pav.). Tai rodo, kad litosferos plokščių sąveika tampa dinamiškesnė dėl Sibiro mantijos plumo įtakos. Tikimasi padidėjusio vulkaninio aktyvumo šiame regione, kartu su anomalijomis, susijusiomis su greitu giluminės magmos kilimu ir sparčiu jos

sudėties pokyčių vulkaninių išsiveržimų metu į labiau mafinę magmą. Panašus sudėties poslinkis gilesnių šaltinių link buvo stebėtas Bevardžio (Bezimianny) ugnikalnio 2017 m. išsiveržimo metu.⁴⁵

M4+ žemės drebėjimai Kamčiatkos pusiasalyje ir Kurilų salose



75 pav.

Kamčiatkos pusiasalio ir Kurilų salų regiono pasirinktame sektoriuje 1979-2024 m. užregistruotų M4+ žemės drebėjimų pasiskirstymas pagal gylį. Duomenų šaltinis: ISC.

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

Seisminio aktyvumo, miškų gaisrų ir vulkaninio aktyvumo anomalijų padidėjimas yra kraštiniai Sibiro bloko Žemės plutoje pakilimo efektai, kuriuos sukelia Sibiro pliumo intruzijos spaudimas.

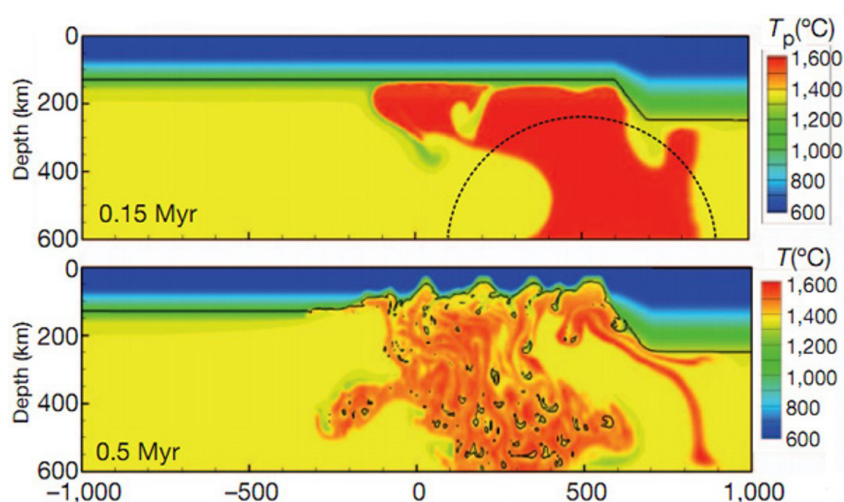
Seisminio aktyvumo padidėjimas ne tik Sibire, bet ypač palei Vakarų Sibiro plokštės ir Rytų Sibiro kratono pakraščius rodo, kad plokštės poslinkis į viršų dėl slėgio, atsirandančio iš po ja esančio mantijos pliumo, jau prasidėjo. Tai rodo, kad magmos pliumo poveikis plokštei yra didelis ir plačiai paplitęs.

Tradiciniuose modeliuose buvo daroma prielaida, kad, kylant mantijos pliumams ir kaitinant juos dengiančią litosferą, prieš prasiveržiant magmai, paviršius turėtų gerokai

pakilti - iki 2 kilometrų aukščio. Tačiau geologinių įrodymų apie tokį staigų pakilimą nėra Sibiro trapų regione, kuris susiformavo dėl magmos pliumo įsiskverbimo prieš 250 mln. metų.

Rusijos, Vokietijos ir Prancūzijos institutų mokslininkai, remdamiesi Sibiro trapų magminių uolienų tyrimais, nustatė⁴⁶, kad pliumas ne kilo kaip burbulas, o palaipsniui ardė litosferą iš apačios (76 pav.).

Kai išlydytos pliumo medžiagos ir viršutinės mantijos uolienų sąlyčio zonoje erozija pasiekė 50 km gylį, prasidėjo didelio masto lavos išsiliejimai ir išsiveržimai paviršiuje.



76 pav.

Sibiro trapų formavimosi pradinių stadijų rekonstrukcija.

Vertikaliajoje ašyje pavaizduotas gylis (km). Skirtingos spalvos rodo uolienų temperatūrą. Mantijos pliumo viršūnės pradinė padėtis pažymėta brūkšniniu puslankiu. Pliumas artėja prie apatinės litosferos ribos—pavaizduotos vientisa juoda linija—ir „išsiskleidžia“ po ją.

Apačioje: dėl pliumo viršūnės sukulto erozijos proceso—matomi į gelmes grimztantys litosferos fragmentai—susiformavo kelias per viršutinę mantiją Žemės plutos link. Tai atitinka pagrindinės su trapais susijusios magmatizmo fazės pradžią.

Šaltinis: 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.

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

Tikėtina, kad šiuolaikinis pliumo aktyvumas vyksta pagal tą patį mechanizmą. Todėl reikšmingo vietinio paviršiaus pakilimo vienoje vietoje, į kurią įsiterpia pliumo galva, nenumatoma. Tačiau šis mechanizmas neatmeta plataus masto regioninio visos Rytų Sibiro platformos pakilimo nedideliu mastu. Remiantis tektonofizikinio modeliavimo duomenimis, net tokio nedidelio pakilimo pakaktų, kad prasidėtų magmos proveržiai, išlaisvinantys išsilydžiusią medžiagą esant dideliame slėgiui ir sukeliantys

katastrofą.

Spėjamas pliumo židinio centras yra į šiaurę nuo Putoranos plynaukštės, maždaug už 225 km į šiaurės rytus nuo Norilsko. Be to, proveržis paveiktų visą ploną Vakarų Sibiro plokštę, kurioje gali atsiverti senosios siūlės - Žemės plutos plyšiai ir giluminiai lūžiai.



Sibiro pliumo išsiveržimo neišvengiamumo įrodymai

Didelę magmos prasiveržimo iš šiuolaikinio Sibiro pliumo riziką dabartiniu laikotarpiu lemia šios sąlygos:

Per pastaruosius 30 metų Žemėje palaipsniui daugėjo geofizinių anomalijų, kurios yra tiesioginis išorinių jėgų, stiprinančių šiluminę energiją netoli planetos branduolio, padarinys. Tačiau dabartinė padėtis labai skiriasi nuo ankstesnio laikotarpio. **Iki 2024 m. pabaigos planeta įžengs į padidėjusio energetinio poveikio jos branduoliui etapą. Skačiavimai rodo, kad 2030 m. pasieksime šios fazės viršūnę.**

Labai svarbus veiksnys, bloginantis padėtį, yra pasaulinė vandenynų tarša dėl antropogeninio poveikio, įskaitant angliavandenilius, mikroplastikus ir nanoplastikus. Dėl šios taršos labai pakito vandenynų vandens šiluminis laidumas, todėl sumažėjo jo gebėjimas veiksmingai išsklaidyti šilumą iš Žemės gelmių. Istorškai vandenynas buvo pagrindinis planetos šilumos reguliatorius, tačiau dabar jis prarado didelę dalį savo šilumos laidumo gebėjimo.

Dėl šios priežasties mantijoje neįprastai kaupiasi šiluminė energija, todėl ji lydosi beprecedenčiu Žemės istorijoje greičiu.

Geofiziniai tyrimai rodo, kad labai padaugėjo giluminių žemės drebėjimų, kurie yra tiesioginiai aktyvaus mantijos lydymosi rodikliai. Besiplečiantis išsilydžiusios magmos tūris daro didžiulį spaudimą Žemės plutai. Šis procesas panašus į baliono

išpūtimo procesą. Galiausiai slėgis viršys plutos tvirtumą, todėl įvyks plyšimas.

Sibiro regionas dėl savo unikalios geologinės struktūros yra ypač jautrus šiems procesams, nes po šia teritorija formuojasi galingas mantijos pliumas - kylantis išlydytos mantijos medžiagos srautas. Šį pliumą sukėlė 1997-1998 m. įvykęs branduolio poslinkis šia kryptimi. Didėjančios temperatūros anomalijos Sibire rodo, kad po Sibiro kratonu esančios magmos tūris ir toliau eksponentiškai didėja. Remiantis geologiniais duomenimis ir naujausiais stebėjimais, labai tikėtina, kad Sibiro pliumas įžengė į kritinę pasirengimo išsiveržimui fazę.

Ypač didelį nerimą kelia tuo pat metu susidariusi kritinė padėtis Marianų įduboje, giliausioje vandenyno dugno vietoje, kur pluta yra ploniausia ir pažeidžiamiausia. Šiame regione taip pat kyla išsilydžiusi magma, o kartu smarkiai didėja seisminis aktyvumas. Vandenyno plyšimo grėsmė čia sukelia realų planetos sunaikinimo scenarijų.

Galimi du scenarijai. Pirmasis susijęs su Sibiro pliumo išsiveržimu, kuris dėl didėjančio magmos slėgio gali įvykti bet kuriuo metu. Antrasis susijęs su Marianų įdubos plyšimu, kuris gali įvykti prieš Sibiro katastrofą. Sibiro pliumas neišsiveržtų, jei Marianų įdubos įtrūkimas įvyktų pirmiau.

Marso geologinė istorija yra ryškus tokio scenarijaus pasekmių pavyzdys - Marinerio slėnis yra nebylus panašios katastrofos liudijimas, kai po vandenynu išsiveržęs pliumas sukėlė katastrofiškas pasekmes visai planetai.

Remiantis dabartinėmis geofizinio aktyvumo tendencijomis atliktais skaičiavimais, kritinis Marianų įdubos plyšimo taškas gali būti pasiektas iki 2036 m. Tačiau svarbu pripažinti, kad šis terminas yra sąlyginis. Žemės pluta Sibire gali pasiduoti didėjančiam slėgiui daug anksčiau. Atsižvelgiant į dabartinę įvykių trajektoriją, atrodo, kad Sibiro plutos arba Marianų įdubos plyšimas yra neišvengiama Žemės gelmėse vykstančių

procesų pasekmė. Vienintelis neaiškumas yra susijęs su tiksliai katastrofos laiku ir vieta, o ne su jos artėjimo tikrumu.

Panagrinėkime tris galimus Sibiro pliumo situacijos raidos scenarijus. Pirmasis scenarijus - staigus, vienkartinis Sibiro pliumo proveržis. Antrasis scenarijus apima lėtą ir laipsnišką lavos išsiveržimą Sibire, panašų į Sibiro trapų susidarymą. Trečiasis scenarijus įvyksta, jei žmonija imasi reikiamų priemonių, kad degazuotų antrinius Sibiro pliumo magminius židinius Žemės plutoje.

1 scenarijus:

Momentinis vienkartinis Sibiro pliumo išsiveržimas

Lyginamoji istorinių geologinių įvykių analizė gali būti naudojama siekiant įvertinti galimą staigaus Sibiro pliumo išsiveržimo žalą. Tačiau svarbu atsižvelgti į tai, kad dabartinės sąlygos Žemėje - konkrečiai, intensyviausio 24 000 metų ciklo konvergencija su antropogeniniu pagrindinės planetos vėsinimo sistemos - vandenynų - užterštumu - yra beprecedentės. Dėl šios priežasties staigus Sibiro pliumo proveržis laikomas labiausiai tikėtiniu scenarijumi, jei žmonija nesiims priemonių jo keliamai rizikai sumažinti.

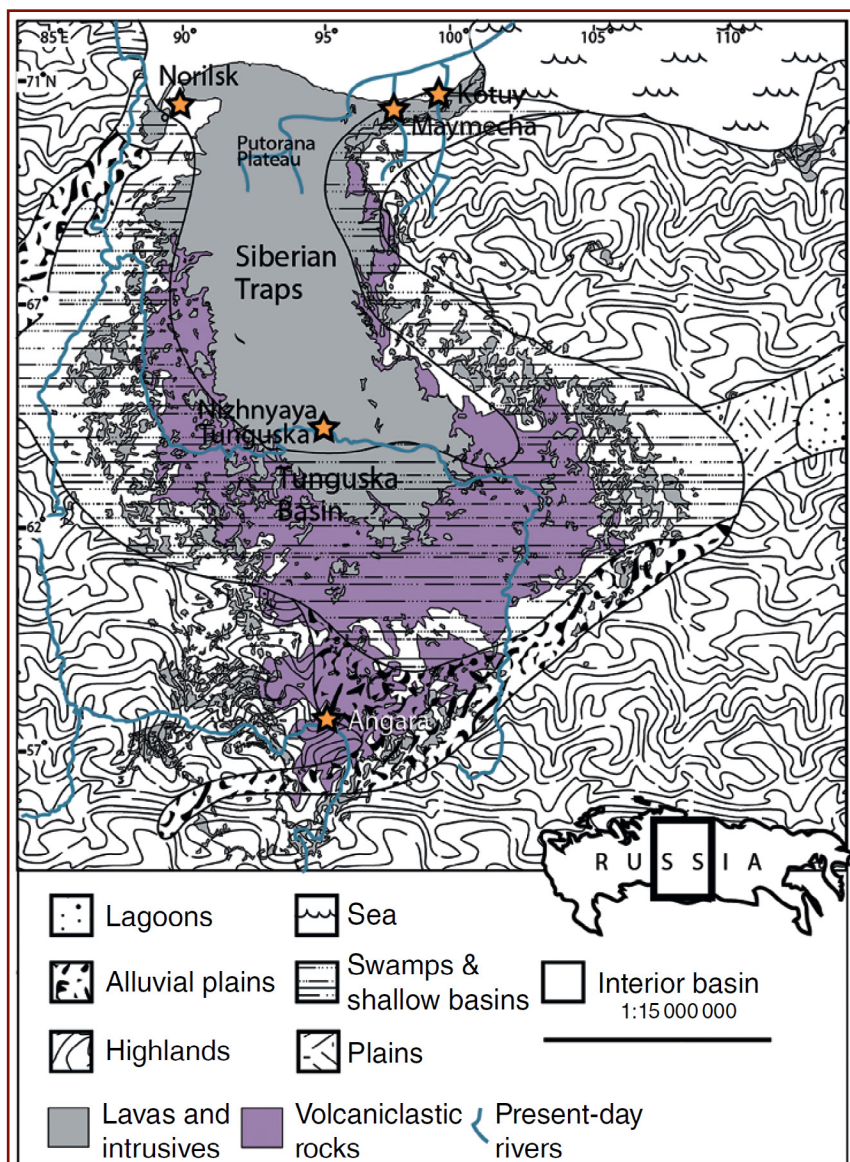
Siekiant įvertinti ugnikalnių išsiveržimų mastą, naudojamas išmestos medžiagos tūris.

Pavyzdžiui, per vieną galingiausių Jeloustouno superugnikalnio išsiveržimų prieš 2,1 mln. metų išmestos magmos tūris siekė apie 2500 km³ (600 mylių), kaip nustatyta tiriant Šiaurės Amerikoje esančias tufų sankaupas.⁴⁷ Šio išsiveržimo metu pelenai ir dujos pakilo į 50 km (31 mylios) aukštį ir pasiekė viršutinę stratosferos ribą. Panašaus masto išsiveržimas buvo stebimas ir per Tobos superugnikalnio išsiveržimą Sumatros saloje, kuris įvyko maždaug prieš 72 000-74 000 metų ir buvo galingiausias išsiveržimas per pastaruosius 25 mln. metų.

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>

Įvairiais vertinimais, maždaug prieš 250 mln. metų per Sibiro trapų išsiveržimą išmestos medžiagos tūris siekė nuo 3 iki 4 mln. km³ (720 000 iki 960 000 mylių³) lavos ir tufų⁴⁸ (77 pav.). Tai reiškia, kad Sibiro trapų išsiveržimas pagal išmestos medžiagos kiekį buvo 1000 kartų didesnis už galingiausius žinomus Jeloustouno kalderos ar Tobos superugnikalnio išsiveržimus.

Atsižvelgiant į staigų galimo Sibiro trapų išsiveržimo pobūdį, jo suaktyvėjimas galėtų sukelti įvykį, kurio galia būtų 1 000 kartų didesnė nei šių istorinių išsiveržimų, pavyzdžiui, Jeloustouno kalderos ar Tobos superugnikalnio išsiveržimų.



77 pav.

Sibiro trapų paleogeografinis žemėlapis, kuriame pavaizduotas pagrindinių vulkanoklastinių išgraužų ir su Sibiro trapais susijusių regionų mastas. Jis sudarytas remiantis Malich et al. 1974, Polozov et al. 2010 ir Black et al. 2015 duomenimis, o supaprastinta vėlyvojo Permo paleogeografija pritaikyta pagal Czamanske et al. 1998.

Šaltinis: 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>

Spėjama, kad staigus Sibiro pliumo proveržis sukeltų sprogstamąjį išsiveržimą ir suformuotų vieną kalderą. Remiantis šia hipoteze, dėl Sibiro pliumo proveržio susidariusi kaldera užimtų maždaug 75 000 km² (29 000 mylių) plotą, jos spindulys būtų apie 150 km (93 mylios) arba 380 km x 250 km (236 x 155 mylios) dydžio. Per Sibiro trapų išsiveržimą prieš 250 mln. metų lava užliejo nuo 4 iki 7 mln. km² (nuo 1,5 iki 2,7 mln. mylių) plotą, kaip užfiksuota literatūroje.^{49,50} Panašaus masto žemės plotą galėtų paveikti ir šis įvykis.

Nuomonė, kad lavos srautai yra pavojingiausi vulkaniniai reiškiniai, yra klaidinga. Iš tikrųjų pelenai dažnai tampa pagrindine mirtinų pasekmių priežastimi. Dideliu sprogstamumu pasižyminčių superugnikalnių atveju didelė dalis magmos netampa lava. Vietoj to ji suskyla sprogo metu, todėl susidaro didžiuliai kiekiai smulkių vulkaninių pelenų - aštrių, dantytų uolienu dalelių, kurios išsisklaido atmosferoje. Įkvėpus šių pelenų, žmogaus plaučiuose susidaro į cementą panašus mišinys, todėl mirtis neišvengiama.

Apskaičiuota, kad Sibiro pliumo išsiveržimo metu tokių degančių pelenų sklaidos spindulys siektų maždaug 9 000 km (5 592 mylios) ir apimtų maždaug 255 mln. km² (98,5 mln. mylių) plotą. Atsižvelgiant į tai, kad bendras Žemės paviršiaus plotas yra kiek daugiau nei 510 mln. km² (197 mln. mi²), pelenų paveikta zona, kurioje taptų neįmanoma kvėpuoti, apimtų maždaug pusę planetos, t. y. apie 50 % Žemės paviršiaus.

Taigi, tikėtina, kad staiga prasiveržus Sibiro

pliumui susidarytų trys gyvybei pavojingos poveikio zonos.

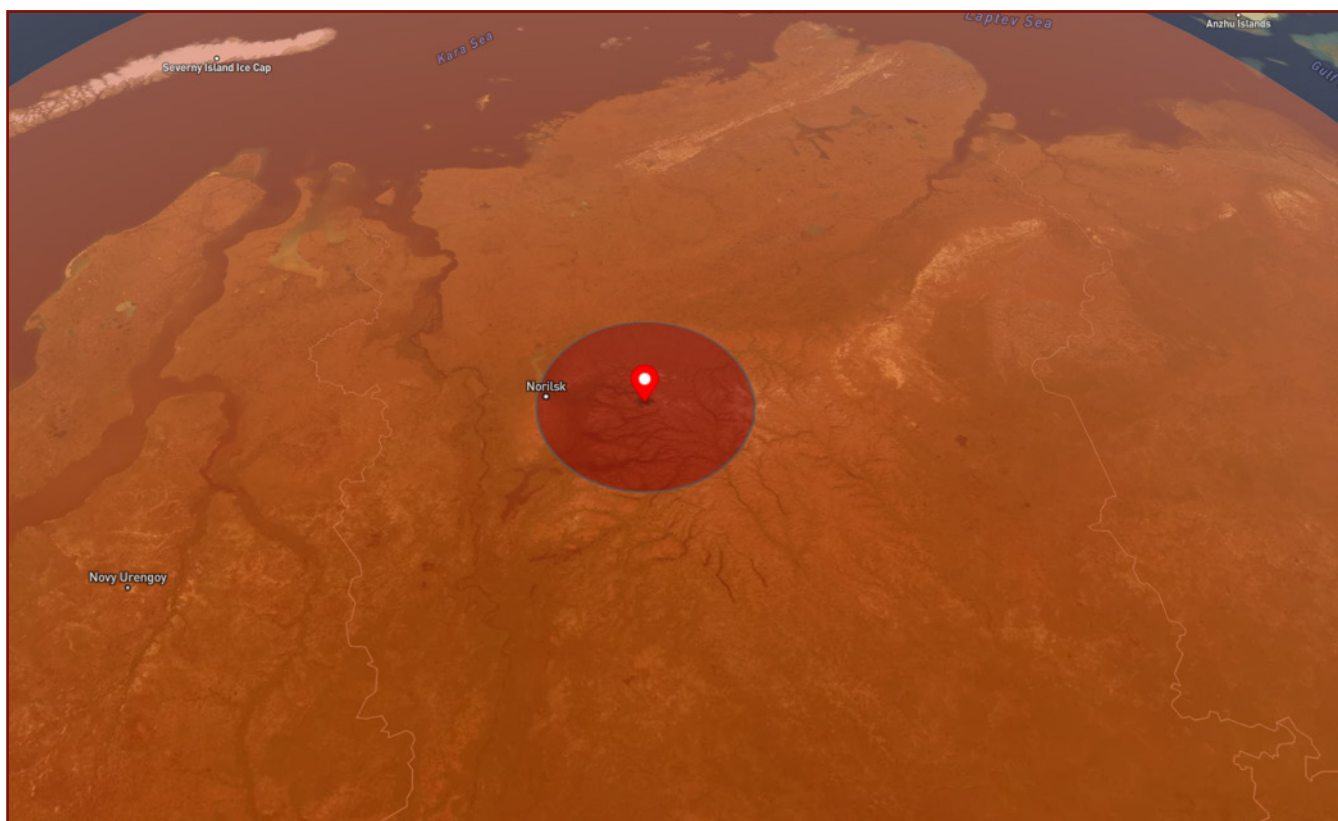
Pirmoji (centrinė) poveikio zona - tai 150 km (93 mylių) spindulio regionas Putoranos plynaukštės šiaurės vakarinėje dalyje, kur turėtų susiformuoti kaldera (78 pav.). Ši zona apima Krasnojarsko krašto Norilsko, Dudinkos ir Talnacho miestus. Šioje zonoje suaktyvėjus pliumui dėl smūginės bangos ir deginančių piroklastinių srautų pradinėje išsiveržimo fazėje akimirksniu būtų sunaikinti visi statiniai.

Antroji poveikio zona, besitęsianti 1 500 km spinduliu nuo centro, yra lavos srautų ir sunkiųjų vulkaninių medžiagų paveikta teritorija (79 pav.). Ši zona apimtų didžiulius šiaurės Sibiro plotus, įskaitant Jamalo-Nencų autonominę apygardą, Taimyro pusiasalį, dalį Chanty-Mansi autonominės apygardos, šiaurinę Krasnojarsko kraštą, vakarinę Jakutiją ir šiaurės rytinę europinę Rusijos dalį. Didžiausi miestai, patenkantys į šį spindulį, yra Igarka, Naujasis Urenkojus, Nadimas, Salechardas, Vorkuta, Narjan-Maras, Mirnas, Kogalimas, Lesosibirskas, Surgutas, Krasnojarskas, Chanty Mansijskas, Tomskas ir Nižnevartovskas.

Pirmosiomis išsiveržimo valandomis ši teritorija būtų veikiamą greitai judančių deginančių dujų, pelenų ir lavos srautų, kurie judėtų iki 700 km/h greičiu. Šie srautai sunaikintų visą gyvybę ir infrastruktūrą, palaidotų regioną po storu vulkaninių medžiagų sluoksniu ir sunaikintų gamtos išteklius.

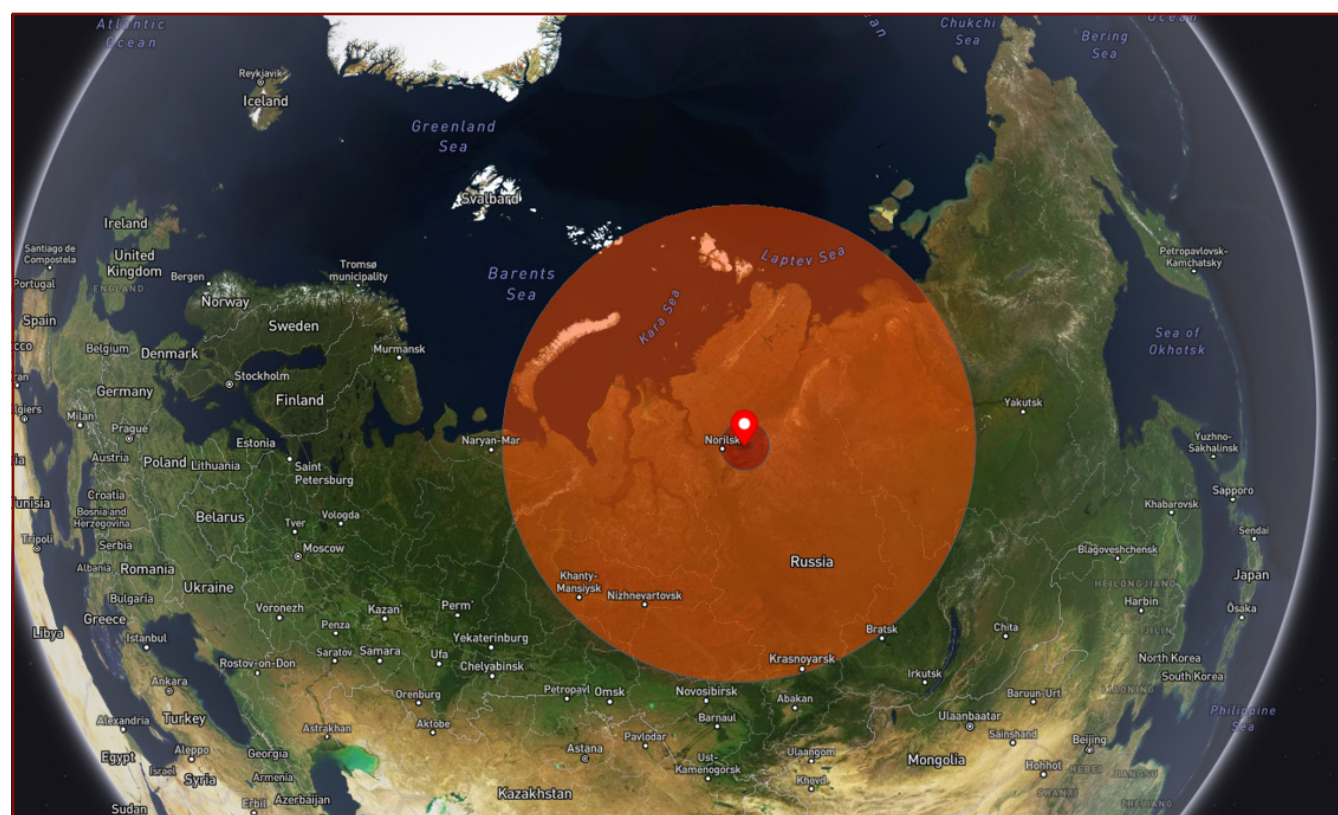
⁴⁹ Fedorenko, V. A., Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., Czamanske, G. K., Hawkesworth, C. J., Wooden, J. L., & Ebel, D. S. (1996). Petrogenesis of the Flood-Basalt Sequence at Noril'sk, North Central Siberia. *International Geology Review*, 38(2), 99-135. <https://doi.org/10.1080/00206819709465327>

⁵⁰ Ivanov, A.V., He, H., Yan, L., Ryabov, V.V., Shevko, A.Y., Palevskii, 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>



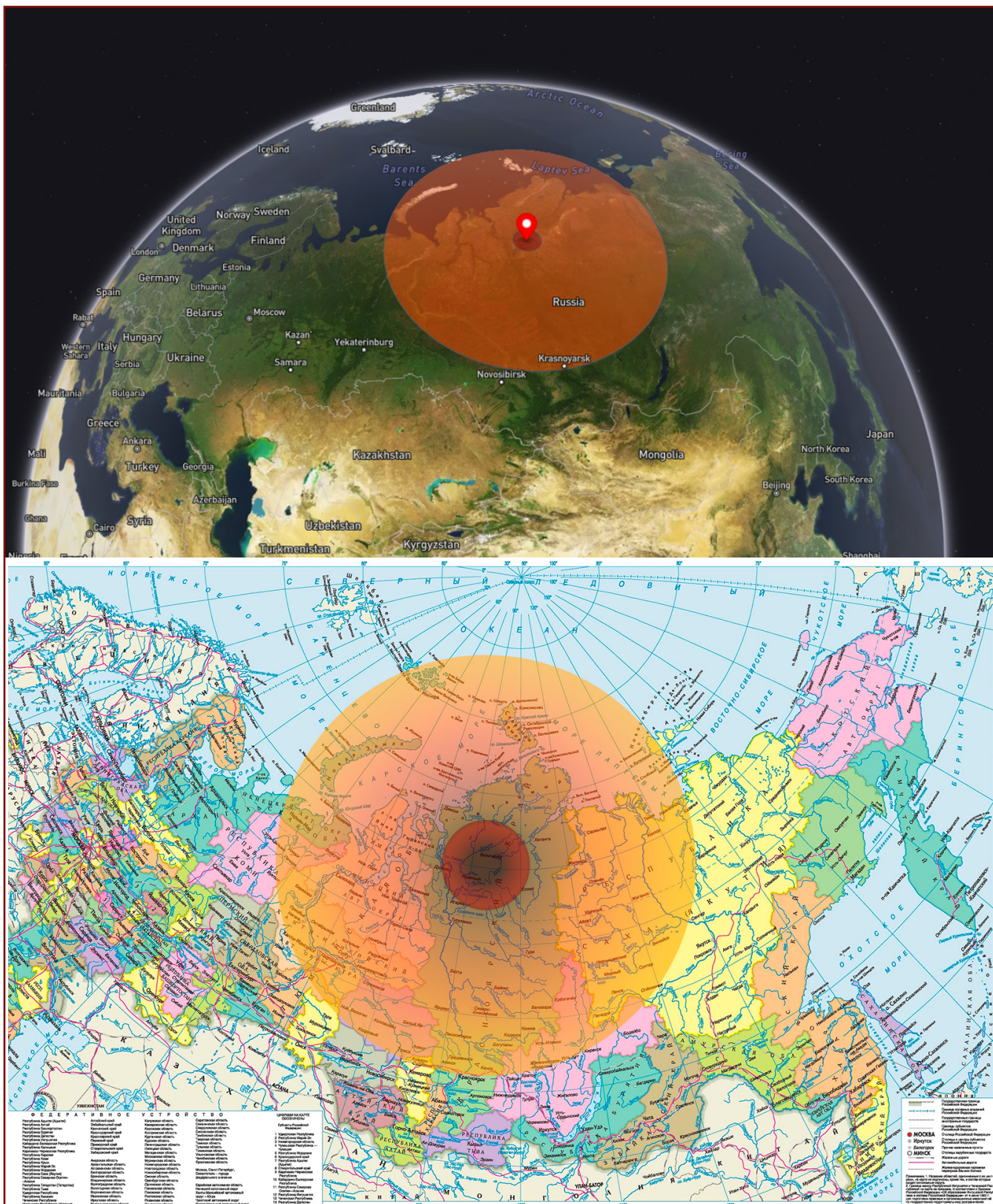
78 pav.

Raudona spalva pažymėta kalderos formavimosi zona, kurios apytikslis spindulys yra 150 km.



79 pav.

Oranžine spalva pažymėta lavos srauto ir sunkiųjų piroklastinių kritulių zona, kurios spindulys apytiksliai yra 1500 km.



79 pav.

Oranžine spalva pažymėta lavos srauto ir sunkiųjų piroklastinių kritulių zona, kurios spindulys apytiksliai yra 1500 km.

Trečioji poveikio zona, kurios spindulys yra maždaug 9 000 km, apima smulkių piroklastinių medžiagų ir vulkaninių pelenų sklaidos zoną, apimančią maždaug 50 % Žemės paviršiaus (80 pav.).

Pradiniame etape (per pirmąsias 24 valandas po išsiveržimo) pelenų krituliai pirmiausia paveiks

Rusijos Federacijos, žemyninės Azijos, Europos, Arabijos pusiasalio, šiaurinės Afrikos žemyno dalies ir Šiaurės Amerikos teritorijas. Tikėtina, kad per kitas 7-10 dienų pelenų masė išplis į Australijos žemyną, Pietų Ameriką ir Antarktidą.



80 pav.

Geltonai pažymėta smulkių vulkaninių pelenų pasklidimo zona, kurios apytikslis spindulys yra 9000 km.



80 pav.

Geltonai pažymėta smulkių vulkaninių pelenų pasklidimo zona, kurios apytikslis spindulys yra 9000 km.

Geologinių procesų tyrimai rodo, kad Sibiro pliumo suaktyvėjimas sukeltų daugybę papildomų katastrofinių reiškinių. Tarp jų - galingos smūgio bangos susidarymas, galingų žemės drebėjimų (apie 10 balų stiprumo) atsiradimas, griaujamųjų cunamijų susidarymas ir galimas kitų didelių Žemės vulkaninių sistemų pažadinimas. Per išsiveržimą išsiskyrusi energija gali inicijuoti grandininę reakciją, suaktyvinti superugnikalnius ir didelius

vulkaninius regionus visoje planetoje. Šios išvados pagrįstos matematiniais energijos procesų ir jų poveikio Žemės plutai skaičiavimais.

Toliau panagrinėsime papildomus rizikos veiksnius, kurie gresia žmonijai dėl staigaus Sibiro pliumo proveržio.

Smūginė banga

Remiantis viešai prieinamais duomenimis, išsiveržus Jeloustouno superugnikalniui gali išsiskirti maždaug 900 000 megatonų energijos ir sukelti 11,2 balo stiprumo žemės drebėjimą. Kadangi magnitudės skalė yra logaritminė (kiekvienas padidėjęs sveikasis skaičius reiškia 32 kartus padidėjusią energiją), Sibiro pliumo išsiveržimas, kuris, kaip manoma, yra 1 000 kartų galingesnis už Jeloustouno, galėtų sukelti 13,2 balo stiprumo žemės drebėjimą. Tai būtų 350 000 kartų galingesnis žemės drebėjimas nei stipriausias kada nors užfiksuotas žemės drebėjimas - Didysis Čilės žemės drebėjimas (9,5 balo, 1960 m.) - ir prilygtų didžiulio asteroido susidūrimo smūgiui.

Išsiskyrusi energija, siekianti apie 10^{24} džaulių, sukeltų nepaprastai galingą smūginę bangą pasauliniu mastu. Išsiveržimo centre slėgis pasiektų tokį lygį, kad uolienos akimirksniu išgaruotų ir būtų išmestos į viršutinius atmosferos sluoksnius. Viršgarsinė smūgio banga per kelias minutes nuniokotų už tūkstančių kilometrų

esančias teritorijas, panašiai kaip Tunguskos meteorito smūgis, bet kur kas galingiau.

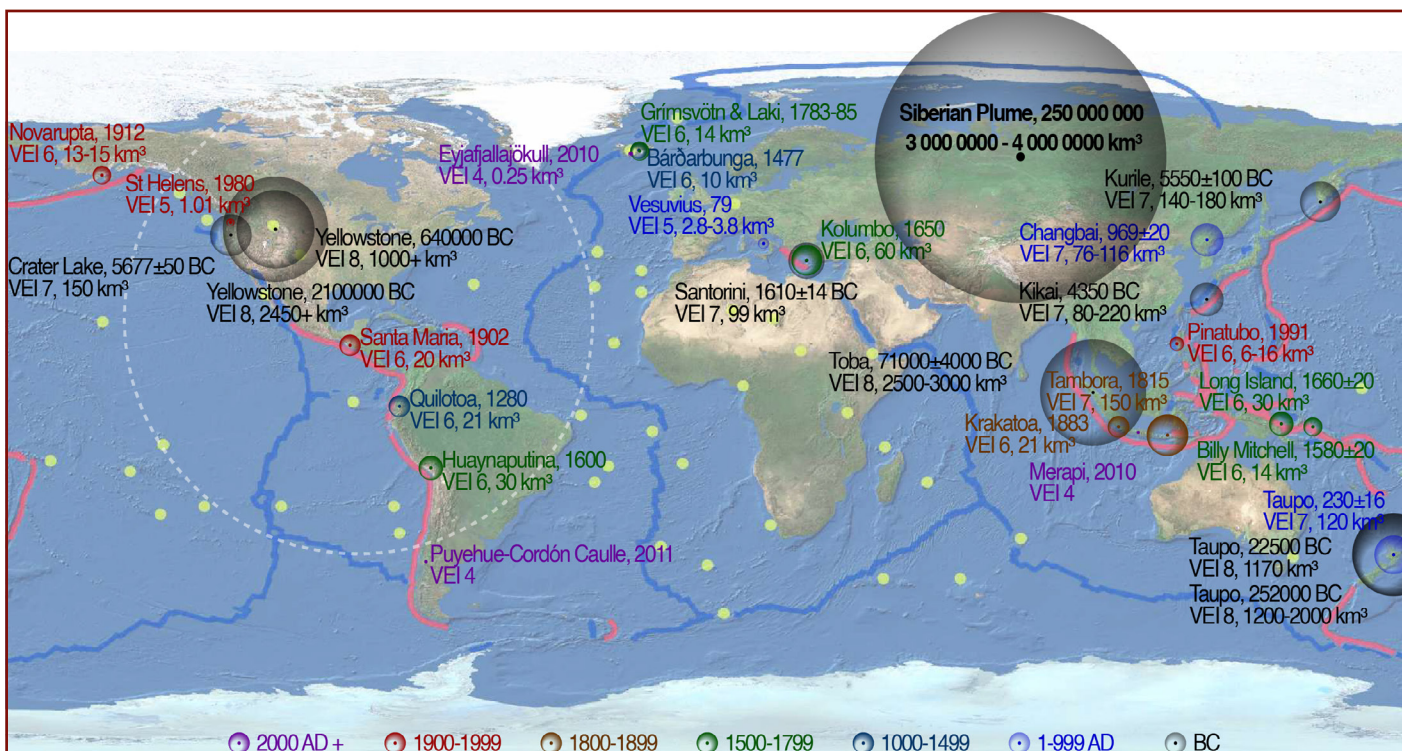
Sibiro taigoje kils didžiuliai gaisrai, kurie palaidos didžiulius regionus po storu vulkaninių pelenų sluoksniu. Amžinasis įšalas greitai ištirptų tūkstančių kilometrų ruožuose, išskirdamas didelį kiekį šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Kraštovaizdis būtų smarkiai sunaikintas, suaktyvėjus žemės plutos lūžių linijoms. Seisminės bangos sklįstų per visą planetą, sukeldamos papildomus žemės drebėjimus, kurių stiprumas viršytų 10 balų.

Arkties vandenyne susiformuotų milžiniški šimtų metrų aukščio cunamiai, keliantys grėsmę Rusijos, Kanados, Grenlandijos ir Skandinavijos pakrantėms. Antriniai cunamiai smogtų Indonezijos, Japonijos, Australijos, Šiaurės ir Pietų Amerikos pakrantėms. Dėl pasaulinių atmosferos sutrikimų susidarytų stiprūs uraganai ir audros.

Superugnikalnių ir vulkaninių sistemų suaktyvėjimas

Sibiro pliumo išsiveržimo sukeltos seisminės bangos sklis ne tik atmosferoje ir Žemės paviršiuje, bet ir giliai mantijoje. Kadangi visi superugnikalniai tarpusavyje susiję per išlydytus mantijos sluoksnius, tikėtina, kad tokio dydžio seisminės bangos per pirmąsias 24 valandas sukeltų grandininę išsiveržimų reakciją (81

pav.). Didžiausios vulkaninės sistemos, kurios gali suaktyvėti, yra Jeloustouno ir Long Valley kalderos (Šiaurės Amerika), Flegrėjaus laukai (Apeninų pusiasalis), Toba (Sundos salynas), Airos kaldera (Japonijos salos) ir Taupo ugnikalnių kompleksas (Naujoji Zelandija).



81 pav.

Žemėlapyje pavaizduotas didžiausių ugnikalnių išsiveržimų, suskirstytų pagal geologinius laikotarpius nuo Prekambro iki šių dienų, pasiskirstymas pasaulyje.

Simbolių dydis proporcingas išmestos medžiagos kiekiui (km³). Žemėlapyje išryškinta chronologinė išsiveržimų, kurių ugnikalnių sprogimo indeksas (VEI) yra ≥4, seka, pabrėžiant tokius įvykius kaip Toba (71 000 ± 4 000 m. pr. m. e., 2 500-3 000 km³), Jeloustounas (640 000 m. pr. m. e., > 1 000 km³) ir Tambora (1815 m. pr. m. e., 150 km³). Tikėtini panašūs išsiveržimai, jei išsiveržtų Sibiro pliumas, kurio apytikris tūris - 3-4 mln. km³. Raudonos linijos žymi tektoninių plokščių ribas, iliustruojančias erdvinę koreliaciją su didžiųjų išsiveržimų vietomis.

Tikėtina, kad išsiveržimai prasidės ne tik superugnikalniuose, bet ir daugelyje Ramiojo vandenyno ugnies žiedo ugnikalnių ir kitose seismiškai aktyviose zonose. Didelė tikimybė, kad atsinaujins tokių ugnikalnių kaip Fudži kalnas (Japonija), Krakatau ir Merapis (Indonezija), Vezuvijus ir Etna (Italija), Popokatépetlis (Meksika), Kamčiatkos, Andų ir Aliaskos ugnikalnių grupės, taip pat poledinės vulkaninės sistemos Vakarų Antarktidoje.

Taip pat gali atsinaujinti miegančios vulkaninės struktūros, įskaitant stratovulkanus Araratą (Anatolijos plynaukštė), Kilimandžarą ir Nyiragongo (Rytų Afrikos riftų sistema); Elbruso vulkaninį masivą (Kaukazo regionas), Laacher See ugnikalnį (Vidurio Europa) ir vulkaninius centrus Arabijos pusiasalyje.

Rūgštūs lietūs

Dėl išsiveržimo metu katastrofiškai išsiskyrusių vulkaninių pelenų ir sieros dioksido visame pasaulyje iškrintantys krituliai įgautų rūgštaus lietaus pavidalą. Norint pailustruoti išmetamų teršalų mastą, galima paminėti prieš 630 000 metų įvykusį Jeloustouno superugnikalnio išsiveržimą, kurio metu į atmosferą buvo išmesta apie 500 megatonų sieros dioksido. Šiuos duomenis palyginus su hipotetinio Sibiro pliumo išsiveržimo galia, galima teigti, kad sieros dioksido emisijos siekia 1 500 000 megatonų (arba $1,5 \times 10^{12}$ tonų), o tai yra maždaug milijoną kartų daugiau nei Tamboros emisijos 1815 m. („metai be vasaros“). Svarbu pažymėti, kad šiame skaičiavime neatsižvelgta į kitų ugnikalnių, kurie gali sukelti grandininę reakciją, išmetamus teršalus.

Dėl tokios sieros dioksido koncentracijos stratosferoje susidarytų aerozolio dalelių, kurios per dešimtmečius palaipsniui būtų išplaunamos kaip rūgštus lietus. Prognozuojama, kad pirminis rūgščiųjų kritulių periodas truks nuo 3 iki 10 metų, priklausomai nuo klimato procesų ir atmosferos cirkuliacijos. Arčiau epicentro esančiuose regionuose, pavyzdžiui, dabartiniame Sibire, kritulių pH būtų mažesnis nei 1,5 ir prilygtų praskiestai sieros rūgščiai.

Dėl to būtų sunaikinta augmenija, pavyzdžiui,

šaknys, lapai ir šakos, ir iš dirvožemio išplautos mineralinės medžiagos, todėl jis taptų netinkamas gyvybei palaikyti. Vandens ekosistemos taip pat smarkiai rūgštėtų, vandens telkiniai virstų toksiškais rūgščiais ežerais, kurių pH būtų 2-3. Tokios sąlygos būtų pražūtingos daugumai gyvybės formų.

Be to, dėl rūgšties prasiskverbimo į vandens tiekimo sistemas geriamasis vanduo be pažangių filtravimo sistemų taptų netinkamas naudoti. Cemento, marmuro ir metalų infrastruktūros objektai dėl sulfatų junginių pradėtų greičiau irti.

Didžiausias rūgščiųjų lietų intensyvumas būtų pasiektas pirmaisiais mėnesiais po išsiveržimo, tačiau krituliai palaipsniui lokalizuotųsi tam tikruose regionuose. Prasidėjus vulkaninei žiemai, didžioji dalis kritulių pereitų į sniegą, todėl sumažėtų tiesioginė rūgščių našta ekosistemoms. Tačiau tuo metu rūgščiųjų lietų sukeltas visuotinis floros ir faunos naikinimas jau būtų negrįžtamas.

Ekosistemoms padaryta žala turėtų didelį poveikį gamtos ir žmogaus procesams gerokai anksčiau, nei prasidėtų visuotinis atšalimas.

Vulkaninė žiema

Bendras Sibiro pliumo išsiveržimo poveikis, kurį sustiprintų vienu metu suaktyvėję daugybė ugnikalnių, sukeltų katastrofišką pasaulio klimato ir ekologinių sąlygų pasikeitimą. Masinis vulkaninių pelenų, dujų (ypač sieros dioksido, SO_2) ir aerozolių išmetimas į atmosferą dešimtmečiams sudarytų neįveikiamą barjerą Saulės spinduliuotei.

Didelė sulfatų aerozolių koncentracija stratosferoje atspindėtų didelę dalį Saulės spinduliuotės ir taip sutrikdytų planetos energijos balansą. Dėl to smarkiai sumažėtų Žemės paviršių pasiekiančios šilumos kiekis, o tai lemtų itin didelį klimato atšalimą - būseną, kurią būtų galima pavadinti „hipervulkanine žiema“. Tokiomis sąlygomis Žemė būtų panaši į „ledo rutulį“, o gyvenamosios zonos apimtų tik ribotus regionus, daugiausia netoli ekvatoriaus.

Galimo poveikio prognozės grindžiamos istoriniais duomenimis apie didelius išsiveržimus. Pavyzdžiui, per didžiausią Jeloustouno išsiveržimą prieš 2,1 mln. metų pasaulinė temperatūra vidutiniškai sumažėjo $3-5^\circ\text{C}$ ($5,4-9^\circ\text{F}$). Apskaičiuota, kad Sibiro pliumo išsiveržimo, kurio mastas gerokai viršytų šį įvykį, atveju vidutinė temperatūra Žemėje galėtų sumažėti maždaug $24-31^\circ\text{C}$ ($43,2-55,8^\circ\text{F}$).

Poliariniuose regionuose temperatūra turėtų sumažėti iki $28-36^\circ\text{C}$ ar daugiau, dėl to visiškai

užšaltų svarbiausi vandens telkiniai, įskaitant Šiaurės Atlanto vandenyną ir didelę dalį Ramiojo vandenyno. Vidutinėse platumose temperatūra sumažės $24-31^\circ\text{C}$, todėl išnyktų visa augmenija ir prasidėtų masinė organizmų žūtis.

Vandenynų ekosistemos būtų katastrofiškai sunaikintos. Paviršiuje ir pakrančių zonose prasidėtų užšalimas, dėl kurio pasauliniu mastu išnyktų jūrų gyvūnija ir augalija. Prognozuojama, kad ekvatoriniuose regionuose temperatūra nukristų $20-27^\circ\text{C}$, todėl net atogrąžų zonos taptų per šaltos gyvybei palaikyti.

Dėl visuotinio šalčio, tamsos ir nutrūkusios fotosintezės beveik visi sausumos paviršiai taptų nederlingi. Žlugtų maisto grandinės, dėl to žlugtų žemės ūkis ir masiškai išnyktų flora, fauna ir didelė dalis žmonijos. Išliktų gyvybingos tik pavienės mikrobinės ekosistemos, prisitaikiusios prie ekstremalių sąlygų.

Stratosferoje išlikę sulfatų aerozoliai dešimtmečius ir toliau blokuotų saulės šviesą. Tačiau hipervulkaninės žiemos padariniai būtų jaučiami kur kas ilgiau. Net ir nusėdus pelenams ir aerozoliams, atsižvelgiant į užšalusį vandenyną, ledynų plėtrą ir radikalias biosferos transformacijas, Žemei prireiktų šimtų ar net tūkstančių metų natūraliam klimatui ir ekologinei pusiausvyrai atkurti.

Išvados dėl 1 scenarijaus: Staigus Sibiro pliumo prasiveržimas

Staigus Sibiro pliumo išsiveržimas būtų katastrofiškas geologinis ir klimato įvykis, kuris sukeltų pasaulinius atmosferos, hidrosferos ir biosferos pokyčius. Galingas sprogimas Putoranos plynaukštėje akimirksniu sunaikintų viską 150 km (93 mylių) spinduliu ir suformuotų milžinišką kalderą. Piroklastiniai srautai ir lava išsiplėstų 1 500 km spinduliu, paversdami Sibirą išdeginta dykuma. Pusę Žemės paviršiaus padengtų pelenai.

Pliumo sprogo sukeltas iki 13,2 balo stiprumo žemės drebėjimas sukeltų griaujamąsias seismines bangas, kurios pasklistų po visą planetą, suaktyvintų lūžių linijas, antrinius žemės drebėjimus ir šimtų metrų aukščio megacunami, kuris užlietų žemynų pakrančių zonas.

Išmetus 1,5 mln. megatonų sieros dioksido (SO_2), susidarytų rūgštus lietus, kurio pH būtų mažesnis nei 1,5, o tai sunaikintų dirvožemį, augaliją ir vandens ekosistemas. Vandens telkiniai taptų netinkami gyvybei, o žemė greitai prarastų derlingumą. Nutrūkus fotosintezai ir maisto grandinėms, masiškai išnyktų augalija,

gyvūnija ir žmonių civilizacija.

Masinis superugnikalnių, įskaitant Jeloustouną, Kampi Flegrėjų ir Tobą, suaktyvėjimas padidintų pasaulinio klimato pokyčius, nes padidėtų vulkaninių pelenų, sieros dioksido (SO_2) ir aerozolių išmetimas. Jų sankaupos stratosferoje uždengtų saulės šviesą, sukeltų planetos atšalimą („hipervulkaninę žiemą“) ir dešimtimis laipsnių sumažėjusią temperatūrą. Poliariniuose regionuose temperatūra nukristų daugiau kaip 28-36 °C, vidutinio klimato juostose - 24-31 °C, o tropikuose - 20-27 °C. Dėl to užšaltų vandenynai, sustotų vandenynų cirkuliacija, suirtų ekosistemos ir sausumoje susidarytų didžiuliai ledynai.

Dėl hipervulkaninės žiemos poveikio Žemė taptų praktiškai negyvenama, o natūralioms sąlygoms atsikurti prireiktų nuo tūkstančių iki milijonų metų. Toks įvykis būtų didžiausias išnykimas per visą planetos geologinę istoriją.

2 scenarijus:

Laipsniškas Sibiro pliumo išsiveržimas

Antrasis scenarijus numato ne vieną sprogimą, o laipsniškus išsiveržimus ir lavos tekėjimą per Žemės plutos lūžius bei susilpnėjusias zonas. Šį procesą galima palyginti su Sibiro trapų susidarymu tame pačiame regione Permo periodo pabaigoje prieš 250 mln. metų.

Sibiro trapų provincijų susiformavimas buvo didžiausia sausumos vulkanizmo apraiška. Tuo metu Žemė patyrė didžiausią aplinkosauginę katastrofą savo istorijoje - Permo-Triaso masinį išmirimą, per kurį išnyko iki 90 % jūrinių ir 70 %

sausumos rūšių (82, 83 pav.).

Geologiniai duomenys⁵¹ rodo, kad Sibiro išsiveržimai galėjo būti neįprastai sprogūs (Campbell et al., 1992), o piroklastinių nuosėdų storis siekė iki 800 metrų (Khain, 1985). Dėl didelio sprogstamumo išsiveržimai išstūmė nuosėdines uolienas iš maždaug 10 km (6,2 mylios) gylio.



82 pav.
Menišškai pavaizduoti išsiveržimai Sibire per Permo-Triaso periodo išnykimo laikotarpį.

Iliustr: Tigrano Nšanjano nuotrauka.

83 pav.
Menišškai pavaizduoti masinio išmirimo metu išgyvenę listerozaurai, dominuojantys apleistame kraštovaizdyje, iliustruojantys ekosistemos pokyčius po Permo-Triaso krizės.

Iliustr: 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>

Vulkaninė veikla regione vyko keliais etapais ir smarkiai pakeitė geologinį kraštovaizdį. Iš pradžių magma įsiskverbė į nuosėdinius sluoksnius ir suformavo įvairius intruzinius kūnus, pvz., slenksčius. Vėliau išsiveržimo stilius pasikeitė į sprogstamąjį, todėl išsiskyrė didžiuliai piroklastinės medžiagos kiekiai ir susidarė stori vulkaniniai klodai. Šio proceso kulminacija buvo milžiniškų bazaltinės lavos kiekių, matuojamų šimtais tūkstančių kubinių kilometrų, išsiveržimas. Apskaičiuota, kad bendras vulkaninių uolienų, įskaitant intruzijas, piroklastines nuosėdas ir lavos srautus, tūris yra apie 3 mln. kubinių kilometrų. Svarbu pažymėti, kad šis skaičius atspindi tik tas uolienas, kurios išliko iki šių dienų, ir galima drąsiai teigti, kad pirminis išsiveržimų mastas buvo daug didesnis, tačiau vėliau buvo suardytas.

Susidarius Sibiro trapams, į atmosferą išsiskyrė milžiniški anglies dioksido (CO₂), sieros (SO₂), chloro (HCl) ir kitų lakiųjų junginių kiekiai. Šios dujos labai sustiprino šiltnamio efektą, sukeldamos greitą atšilimą po vulkaninės žiemos. CO₂ koncentracija atmosferoje pasiekė 8 000 ppm, t. y. 20 kartų viršijo dabartinį lygį. Dėl to tropinių jūrų temperatūra pakilo nuo 22-25 °C iki 30 °C, o vandenynai ėmė rūgštėti, todėl žuvo karbonatinius skeletus turintys organizmai.

Iš viso į atmosferą išsiskyrė iki 7800 gigatonų sieros, iki 8700 gigatonų chloro ir iki 13 600 gigatonų fluoro⁵².

Vulkaniniai pelenai ir aerosoliai užstojo saulės šviesą, sutrikdė fotosintezę, sukėlė masinį miškų nykimą ir mitybos grandinių griūtį, todėl dar labiau išnyko augalų ir gyvūnų rūšys.

To meto ekologinė krizė pabrėžia galimą pasekmių mastą net ir palaipsniui išsiveržus Sibiro pliumui.

Tyrimai rodo, kad išsiveržimus prieš 250 mln. metų lėmė mantijos plutos - didžiulio magmos srauto, kylančio iš Žemės gelmių po dabartine Putoranos plynaukšte - kilimas. Pasikartojus tokiam scenarijui šiandien, susidarytų milžiniškos lavos plynaukštės, vieni didžiausių geologinių darinių planetoje, sunaikinantys beveik visą gyvybę tūkstančių kilometrų spinduliu, apimantys Sibirą ir kaimyninius regionus. Geologiniai duomenys rodo, kad tokios katastrofos, pasižyminčios milžiniškų bazalto laukų išsiveržimu⁵³, įvyko ne kartą ir kiekvieną kartą sukėlė didelius masinius išmirimus (84 pav.).

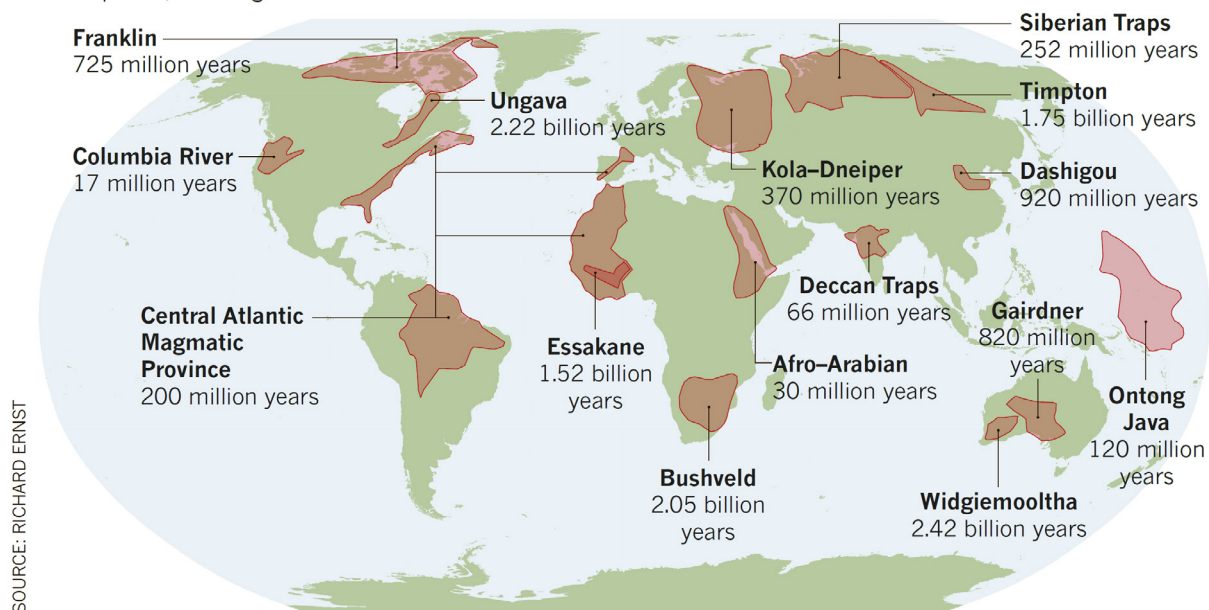
⁵²Benjamin A. Black, Linda T. Elkins-Tanton, Michael C. Rowe, Ingrid Ukstins Peate, Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps, *Earth and Planetary Science Letters*, Volumes 317–318, 2012, Pages 363–373, ISSN 0012-821X, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001>

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 pav.

Žemėlapyje pavaizduotos didžiausių Žemės istorijoje ugnikalnių išsiveržimų geografinės vietos ir amžius, taip pat šių įvykių metu susiformavusios lavos plynaukštės.

Iliustr: Richard Ernst.

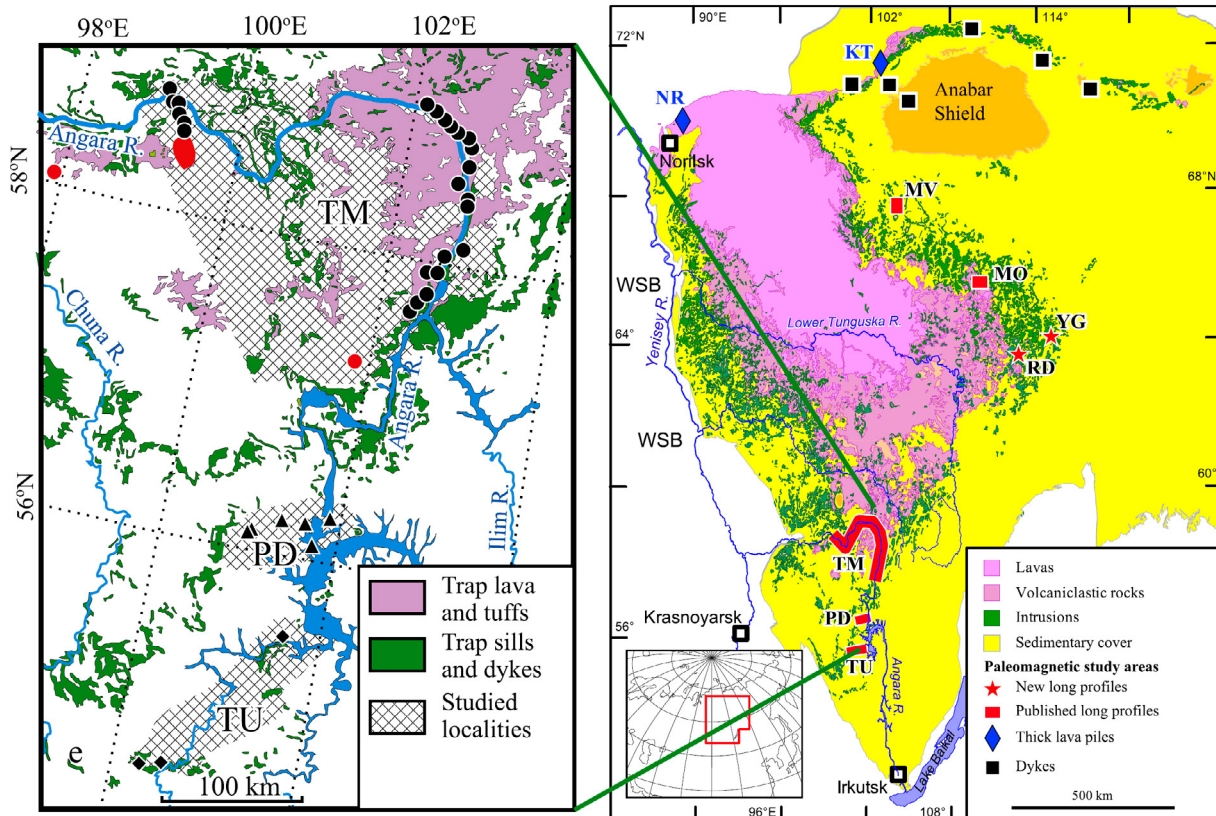
Šaltinis: Witze, A. (2017). Earth's lost history of planet-altering eruptions revealed. Nature, 543, 295-296.

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

Kaip ir ankstesnėse geologinėse epochose, magma kils iš mantijos, prasiskverbdoma pro Žemės plutos įtrūkimus, panašiai kaip minkšta medžiaga prasiskverbia pro tankų filtrą. Dėl šio proceso paviršius perkais, susidarys daugybė vidinių magmos intruzijų ir ištirps litosfera.

85 pav. pavaizduotas efuzinių uolienų pasiskirstymas Sibire: violetine spalva pažymėti lavos srautai, o žalia spalva - Žemės plutoje sukietėję magminiai kūnai. Žemėlapyje

pažymėtos žalios zonos rodo, kaip magma ardė Žemės plutą, sudarydama lūžius ir judėdama išilgai šių susilpnėjusių vietų. Toks padidėjęs magmos slėgis vėl gali inicijuoti panašų procesą, galintį turėti katastrofiškų padarinių.



85 pav.

Dešinėje pusėje esančiame žemėlapyje apžvelgiama Sibiro trapų provincija (supaprastintas ir modifikuotas pagal Svensen et al., 2009), o pagrindinės geologinės struktūros pažymėtos skirtingomis spalvomis: rausva - lavos srautai, žalia - intruziniai kūnai, geltona - nuosėdinė danga. Kairėje pusėje esančiame detalijame žemėlapyje pavaizduotas trapų magmatizmo pasiskirstymas: violetine spalva žymimos lavos ir tufai, o žalia - slenkščiai ir diksai.

Šaltinis: 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.

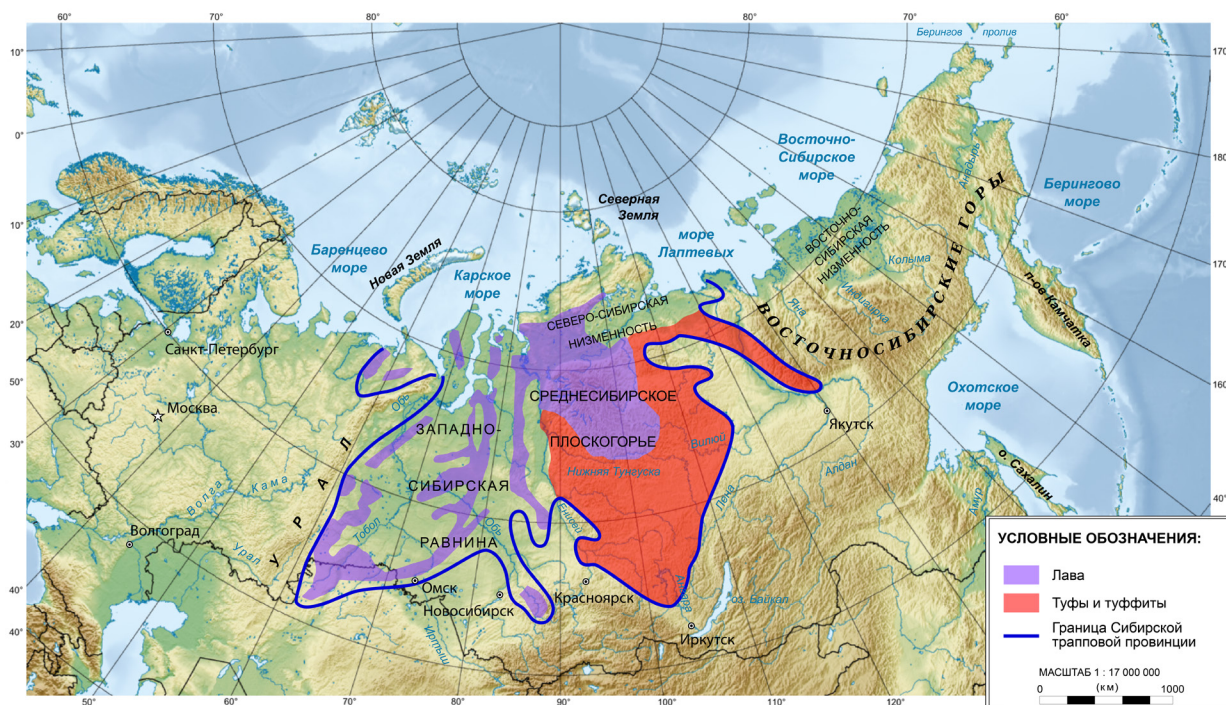
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029>

Laipsniško išsiveržimo scenarijus panašus į staigų Sibiro pliumo sprogimą, tačiau išsitusį per ilgesnį laiką. Jį galima įsivaizduoti kaip ugnikalnių, išsiveržiančių kas savaitę, seką kartu su staigiais plyšiais, išlaisvinančiais bazaltinės lavos srautus Vakarų Sibire.

86 pav. pavaizduoti šie procesai, o lavos srautų regionai pažymėti violetine spalva. Lava plito didelėse teritorijose tankesnės ir stabilesnės Rytų Sibiro platformos plutos srityje. Priešingai, Vakarų Sibire, kuriam būdinga plonesnė, jaunesnė ir nevienalytė pluta, lavos išsiveržimai

vyko išilgai pailgų įdubų arba plyšių. Žemėlapyje pažymėtos raudonai tufų zonos, sudarytos iš cementuotų piroklastinių fragmentų ir pelenų.

Išsiveržimai Rytų ir Vakarų Sibire labai skirtingi. Rytų Sibire magma susidurtų su tankiu archajiniu kratonu, kuris sukuria didelį barjerą. Kildama magma „išsiskverbia“ į priimančiąsias uolienas, atvėsta ir praturtėja lakiaisiais komponentais. Tai lemia sprogstamuosius išsiveržimus, kurių metu išsiskiria daug pelenų ir gali susidaryti rūgšti, klampi magma.



86 pav.

Sibiro trapų provincijos žemėlapis, kuriame pavaizduotos pagrindinės geologinės struktūros, įskaitant lavos srautų (violetinė spalva) ir tufų su tufitais (raudona spalva) sritis. Mėlynos linijos žymi Sibiro trapų provincijos ribas.

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

Vakarų Sibire, kur plona ir jauna pluta, tikėtina, kad išsiveržimų metu daugiausia išsiverš skysta bazaltinė lava.

Tikėtina, kad lavos srautai ir tufai padengs maždaug 7 mln. km² plotą Vakarų ir Rytų Sibire, t. y. panašų į dabartinės Australijos plotą. Tačiau tikėtina, kad degradacijos veikiami regionai viršys dešimtis milijonų kvadratinį kilometrų. Šiose teritorijose kiltų didžiuliai gaisrai, rūgščiųjų lietu sukelta erozija, pelenų krituliai, nuošliaužos ir ugnikalnių nuosėdas nešantys laharai. Visam Sibiro amžinajam įšalui iškils pavojus būti sunaikintam.

Verta paminėti, kad į vakarus nuo Putoranos plynaukštės esančiame Taimyro pusiasalyje yra didžiausi pasaulyje nikelio, vario ir platinos grupės metalų telkiniai, kuriuos eksploatuoja bendrovė

„Norilsk Nickel“. Šie telkiniai yra magminės kilmės ir susiformavo maždaug prieš 250 mln. metų per Sibiro trapų magminės provincijos išsiveržimus, kurie palengvino unikalių rūdos mazgų susidarymą. Didelė nikelio koncentracija to laikmečio magmose greičiausiai susijusi su medžiagų pernešimu iš Žemės branduolio į paviršių.

Sibiro magmos pliumo kilimas tebesitęsia, o jo pagreitėjimas sietinas su 1998 m. įvykusi branduolio poslinkiu link Taimyro pusiasalio, kaip nustatė dr. Jurijus Barkinas. Artimiausiu metu yra didelis pavojus, kad Sibiro pliumas gali prasiveržti netoli Norilsko miesto - toje pačioje vietoje, kur panašus įvykis įvyko prieš 250 mln. metų.

Toliau nagrinėsime, kokių pasekmių šis scenarijus turėtų Rusijai ir pasauliui.

Laipsniško Sibiro pliumo proveržio pasekmės Rusijai

Tyrimų metu buvo tiksliai nustatytos astenosferos lydymosi lęšių vietos pietų Sibiro litosferoje, kurias lemia plona regiono pluta. Tačiau šiaurinė Sibiro dalis seisminiuose žemėlapiuose iš esmės netyrinėta ir yra „baltoji dėmė“ apatinės plutos ir mantijos tyrimuose. Dėl tokio duomenų trūkumo neįmanoma prognozuoti pirminių lavos proveržių ir dujų turtingos magmos išsiveržimų vietų, ypač atsižvelgiant į tai, kad Sibiro pliumo zonoje nėra išsamaus požeminio monitoringo.

Pirmieji įspėjamieji artėjančios katastrofos požymiai yra padidėjęs seisminis aktyvumas ir lokalizuotas dujų išmetimas. Magmai artėjant prie paviršiaus, prasidės spartus amžinojo įšalo tirpimas, dėl kurio bus destabilizuojama ant amžinojo įšalo dirvožemio pastatyta infrastruktūra. Dirvožemio įkaitimas taip pat gali sukelti dujų hidratų (ledo struktūrose įstrigusio metano) sprogimus, dėl kurių susidarys didžiuliai krateriai ir bus sunaikintos gyvenvietės.

Dėl metano išsiskyrimo, dirvožemio perkaitimo ir vulkaninių dujų išsiskyrimo neišvengiami taptų didžiuliai miškų gaisrai. Angliavandenilių telkiniai Sibire ir anglies baseinuose, pavyzdžiui, Kuzbase, gali užsiliepsnoti, kaip tai įvyko Permo-Triaso laikotarpiu⁵⁴, kai anglies telkiniai termiškai įkaito iki 600 °C (1 112 °F).

Išsiveržimai prasidėtų staiga ir paveiktų daugybę taškų didžiulėje teritorijoje. Dėl 7-8 balų stiprumo žemės drebėjimų ir įtrūkimų bei lūžių

lavos srautai apimtų šimtus tūkstančių kvadratinį kilometrą. Aplink lavos proveržius išsiskiriančios toksinės medžiagos sukeltų masines augalų, gyvūnų ir žmonių žūties, atmosferoje sudarydamos mirtiną „kokteilį“.

Per pirmąsias dienas žūtų milijonai žmonių. Vulkaniniai pelenai sunaikintų transporto tinklus, susikauptų ant kelių ir geležinkelių, sumažintų matomumą ir suniokotų infrastruktūrą. Dėl pelenų keliamo pavojaus orlaivių varikliams visiškai nutrūktų aviacija.

Dėl amžinojo įšalo tirpimo krizė dar labiau paaštrėtų: pradėtų griūti transporto keliai, vamzdynai, pastatai ir infrastruktūra. Daugelis miestų netektų galimybės gauti vandens, maisto ir elektros energijos, kiltų humanitarinė krizė. Masinė evakuacija didžiojoje išsiveržimo zonos dalyje būtų neįmanoma, nes dėl lavos, dujų, gaisrų ir rūgščiųjų lietų keliai taptų netinkami naudoti. Milijonus žmonių apimtų panika, o pastangos perkelti Sibiro gyventojus sukeltų socialinį nestabilumą ir visuotinius neramumus.

Šalies ekonomika patirtų katastrofiškų nuostolių. Naftos, dujų, anglies, deimantų ir metalų gavyba nutrūktų dėl fizinio infrastruktūros sunaikinimo, būtų sustabdyta pramonės veikla, trūktų žaliavų ir energijos. Vulkaninė veikla sunaikintų regiono gamtinius išteklius, įskaitant naftos ir anglių atsargas, todėl šalis netektų svarbiausio ekonominio turto.

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>

Praėjus keliems dešimtmečiams po išsiveržimo, Sibiras išliks ekologinės katastrofos zona. Katastrofa negrįžtamai pakeistų Rusijos geografią, ekonomiką ir visuomenę. Tik 25 % šalies teritorijos liktų tinkama gyventi, tačiau ji patirtų didžiulį

spaudimą dėl ekologinės ir socialinės krizės. Būtų prarasti ekonominiai atramos taškai, istorinės vertybės ir didžioji dalis šalies gamtos turtų, todėl Sibiras taptų netinkamas gyventi šiuolaikinei civilizacijai.

Laipsniško Sibiro pliomo išsiveržimo pasauliniai padariniai

Sibiro pliomo išsiveržimo padariniai turės poveikį visam pasauliui ir pasireikš keliais etapais.

Pirmosiomis dienomis dėl atmosferoje esančių vulkaninių pelenų nutrūks susisiekimas tarp Europos ir Azijos per Sibirą, bus sustabdytas oro susisiekimas. Šie sutrikimai paralyžiuotų pasaulinę logistiką, sukeltų didelio masto maisto krizę, nes Rusija, viena didžiausių kviečių ir kitų produktų eksportuotojų, nutrauktų jų tiekimą. Nutraukus naftos, dujų ir kitų išteklių eksportą iš Rusijos, sparčiai kiltų kainos, prasidėtų energetikos krizė ir ekonominis nestabilumas daugelyje šalių. Pasaulinę ekonomiką apimtų grandininė finansinių ir socialinių sukrėtimų reakcija.

Pelenų debesys ir sieros aerozoliai sukeltų visuotinį užtemimą, sumažintų Saulės spinduliuotę ir sukeltų „vulkaninę žiemą“, temperatūra nukristų 2-3 °C. Rūgštūs lietūs ir dirvožemio užterštumas nuniokotų žemės ūkį ne tik Rusijoje, bet ir visame pasaulyje. Dėl plačiai paplitusio bado, vandens trūkumo, nuodingo oro ir klimato sistemų suirimo palaipsniui išnyktų milijardai žmonių ir gyvūnų. Per kelerius metus žlugtų socialinės sistemos.

Laikui bėgant vulkaniniai pelenai pradės

nusėsti, tačiau įvyks staigūs klimato pokyčiai. Dėl tirpstančio amžinojo įšalo išsiskiriantis metanas ir anglies dioksidas sustiprins šiltnamio efektą. Temperatūra palaipsniui pakils 5-10 °C, todėl klimatas taps nestabilus ir pasižymės staigiais temperatūros svyravimais. Dėl ozono sluoksnio sunaikinimo padidės ultravioletinės spinduliuotės lygis Šiaurės pusrutulyje, o tai dar labiau sustiprins išsiveržimų padarinius.

Nepaisant to, kad Europa yra nutolusi nuo Sibiro, Sibiro pliomo išsiveržimas Europai sukeltų rimtų padarinių. Pelenai užklotų Šiaurės ir Rytų Europą, todėl plačiai paplistų kvėpavimo takų ligos. Rūgštūs lietūs sunaikintų miškus, miestų infrastruktūrą ir žemės ūkio naudmenas. Po laikino atšalimo etapo prasidėtų staigus atšilimas, kuris atneštų sausras pietuose ir potvynius Vidurio ir Šiaurės Europoje.

Masinė migracija iš Rusijos, Azijos ir Artimųjų Rytų sukeltų demografinę krizę ir padidėtų konkurencija dėl išteklių. Europos šalys susidurtų su nuolatinėmis ekologinėmis, ekonominėmis ir socialinėmis problemomis.

Azijoje, kuri yra arčiausiai išsiveržimo epicentro, išsiveržimo padariniai būtų skaudžiausi. Oro tarša dulkėmis ir pelenais sukeltų plačiai paplitusius kvėpavimo takų sutrikimus ir rūgščius lietus, ypač Kinijoje, Mongolijoje ir Kazachstane. Šiaurės Kinijoje, svarbiausiame maisto regione, dėl saulės šviesos trūkumo ir prastėjančios dirvožemio kokybės žemės ūkis bus nualintas.

Temperatūros svyravimai visame žemyne suardytų infrastruktūrą ir žemės ūkio sistemas. Palaipsniui šiltėjant vandenynams, sumažėtų

deguonies kiekis, išnyktų jūrų ekosistemos ir žlugtų žuvininkystė.

Laikui bėgant, vykstantys išsiveržimai dar labiau padidintų visuotinę destruktiją. Klimato ir ekologinės krizės sustiprėtų, sunaikindamos didžiąją dalį žmonijos technologinės ir intelektualinės pažangos ir civilizacija patirtų didelį vystymosi nuosmukį. Žmonija atsidurtų ant visiško visuomenės žlugimo slenksčio.

Ilgalaikės laipsniško Sibiro pliumo išsiveržimo pasekmės planetai

Lėtas Sibiro pliumo išsiveržimas sukeltų didžiulį ir toli siekiantį poveikį, kuris pakeistų planetą milijonams metų. Atmosferą užlietų nuodingos medžiagos, dėl kurių visoje planetoje susidarytų rūgštūs lietus ir būtų sunaikintas ozono sluoksnis. Tai sustiprintų ultravioletinę spinduliuotę ir dar labiau destabilizuotų pasaulio klimato sistemas.

Vandenynuose prasidėtų kritinis rūgštėjimas, dėl kurio masiškai išnyktų jūrų gyvybė. Dėl to žlugtų jūrų ekosistemos, sutriktų pasaulinės maisto grandinės ir išnyktų beveik visa jūrų biologinė įvairovė.

Sausumoje toksinių išmetamųjų teršalų poveikis, dirvožemio ekosistemų sunaikinimas ir daugumos augalų rūšių išnykimas sukeltų masinį

išnykimą. Be apdulkintųjų sausumos ekosistemos sugriūtų, ir manoma, kad 75–95 % esamų rūšių išnyktų.

Dėl išsiveržimo kils visapusiška klimato, biologinė ir geologinė krizė, visiškai pakeisianti Žemės biosferą. Šis procesas lems žmonijos civilizacijos žlugimą, milijardų žmonių žūtį ir išlikusių, susiskaldžiusių žmonių grupių regresą iki akmens amžiaus išsivystymo lygio. Šios katastrofos mastas prilygs didžiausiems masiniams išnykimams Žemės istorijoje ir žymės naujo biosferos evoliucijos etapo pradžią, kuris truks mažiausiai milijonus metų.

3 scenarijus:

Planinė ir kontroliuojama degazacija

Esami vulkaninės geoinžinerijos metodai

Atsižvelgiant į didėjančią slėgį po Vakarų Sibiro plokšte ir Rytų Sibiro kratonu dėl kylančio Sibiro pliumo, būtina nedelsiant imtis veiksmų, kad būtų sumažintos galimos pasekmės. Vienas iš tokių sprendimų - kontroliuojamas slėgio, lavos ir dujų, artėjančių prie paviršiaus iš antrinių kamerų, išleidimas, t. y. **planinė degazacija**.

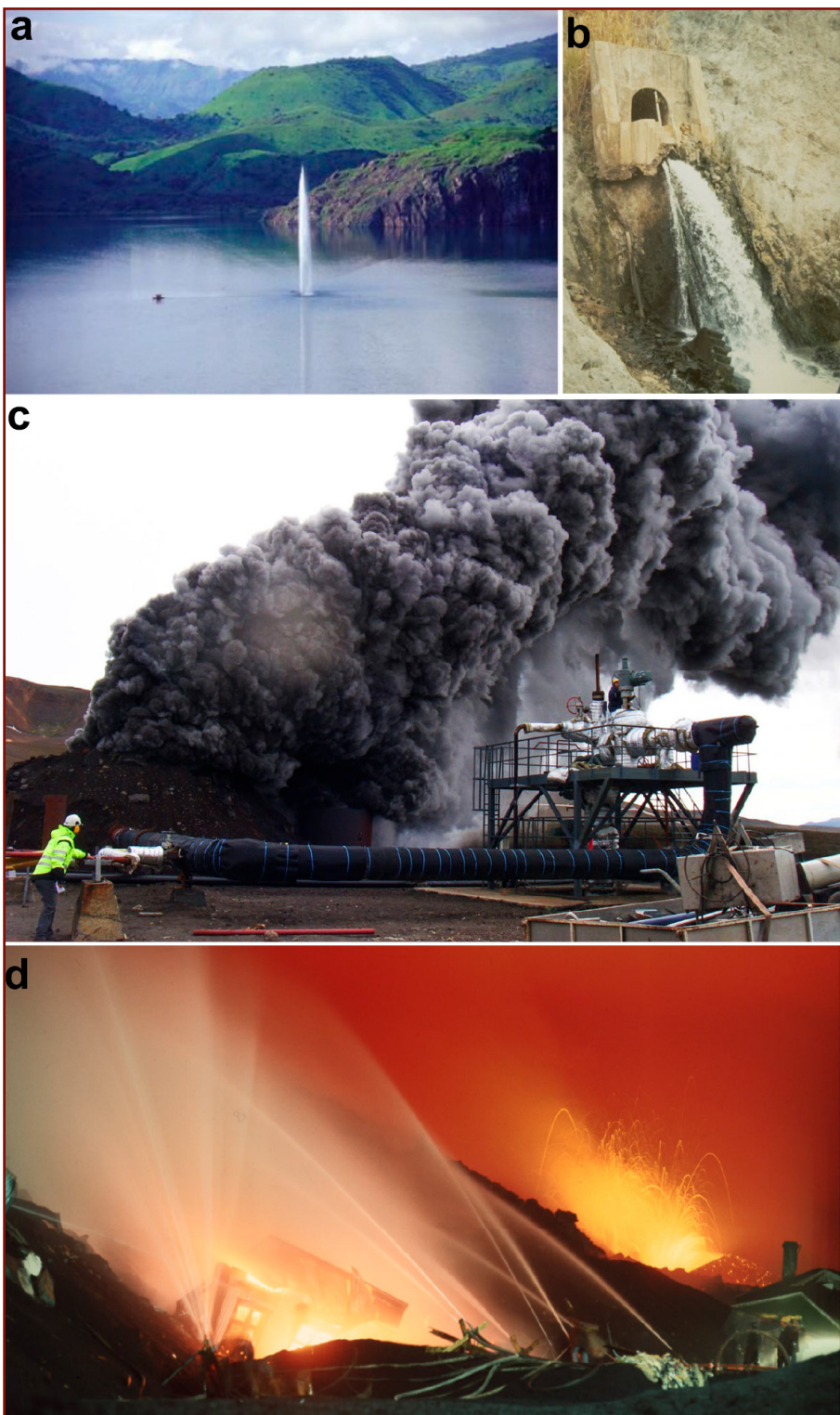
Šiuolaikiniuose moksliniuose tyrimuose magminių kamerų degazacija laikoma perspektyviu didelio masto išsiveržimų prevencijos metodu. Toks požiūris patvirtina, kad vulkaninės geoinžinerijos technologijos gali būti taikomos ne tik ugnikalniams ar superugnikalniams, bet ir mantijos pliumų aktyvumui valdyti. Daugybėje mokslinių publikacijų ir patentų, kuriuos parengė įvairių šalių ekspertai, nagrinėjama kontroliuojamo degazavimo koncepcija.

Teoriniai vulkaninės geoinžinerijos pagrindai buvo sukurti XX amžiuje, o praktiniai eksperimentai atlikti praėjusiam šimtmečiui. Buvo taikomi tokie vulkaninės intervencijos metodai kaip gręžimas į kraterius, vulkaninių ežerų sausinimas, kanalų, nukreipiančių lavos srautus, kūrimas, lavos srautų aušinimas jūros vandeniu,

lavos srautų bombardavimas ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų, tokių kaip anglies dioksidas ir metanas, ištraukimas (87 pav.).

Nuo XX a. septintojo dešimtmečio JAV Geologijos tarnyba (USGS) Havajų Kilauėjos ugnikalnio lavos ežerų regionuose vykdo gręžimo darbus, kad nukreiptų lavos srautus. Panašios iniciatyvos įgyvendintos Japonijoje, Islandijoje ir Italijoje. Pavyzdžiui, Japonija išbandė technologijas, skirtas slėgiui magminėse kamerose sumažinti. Islandija sėkmingai nukreipė lavos srautus, pavyzdžiui, Heimaey saloje, kur lava buvo aušinama naudojant vandens patrankas. Italijoje buvo sukurtos ankstyvojo perspėjimo sistemos ir lavos srautų valdymo metodai, įskaitant 1983 m. Etnos kalno lavos barjerų sunaikinimą sprogmenimis.

Tarptautinėse mokslinėse konferencijose ir simpoziumuose, skirtuose giluminiam gręžimui vulkaninio ir geoterminio aktyvumo zonose, plečiamos vulkaninės geoinžinerijos taikymo galimybės, siekiant užkirsti kelią išsiveržimams ir sušvelninti jų padarinius visame pasaulyje.



87 pav.

(a) Anglies dioksido degazacija iš Nyoso ežero Kamerūne, kaip užfiksuota Halbwachs et al. (2020).

(b) Drenažo tunelis Keludo kalno (Indonezija) kraterio sienoje (Global Volcanism Program, nuotrauka GVP-01120).

(c) Pagalbinis gręžimas magminėje kišenėje Krafløje, Islandijoje, 2009 m. (GO Friðleifsson/IDDP vaizdas).

(d) Lavos srautų aušinimas įleidžiant jūros vandenį Heimaey, Islandija, 1973 m., Tristanas H. Benediktssonas (Tristan H. Benediktsson).

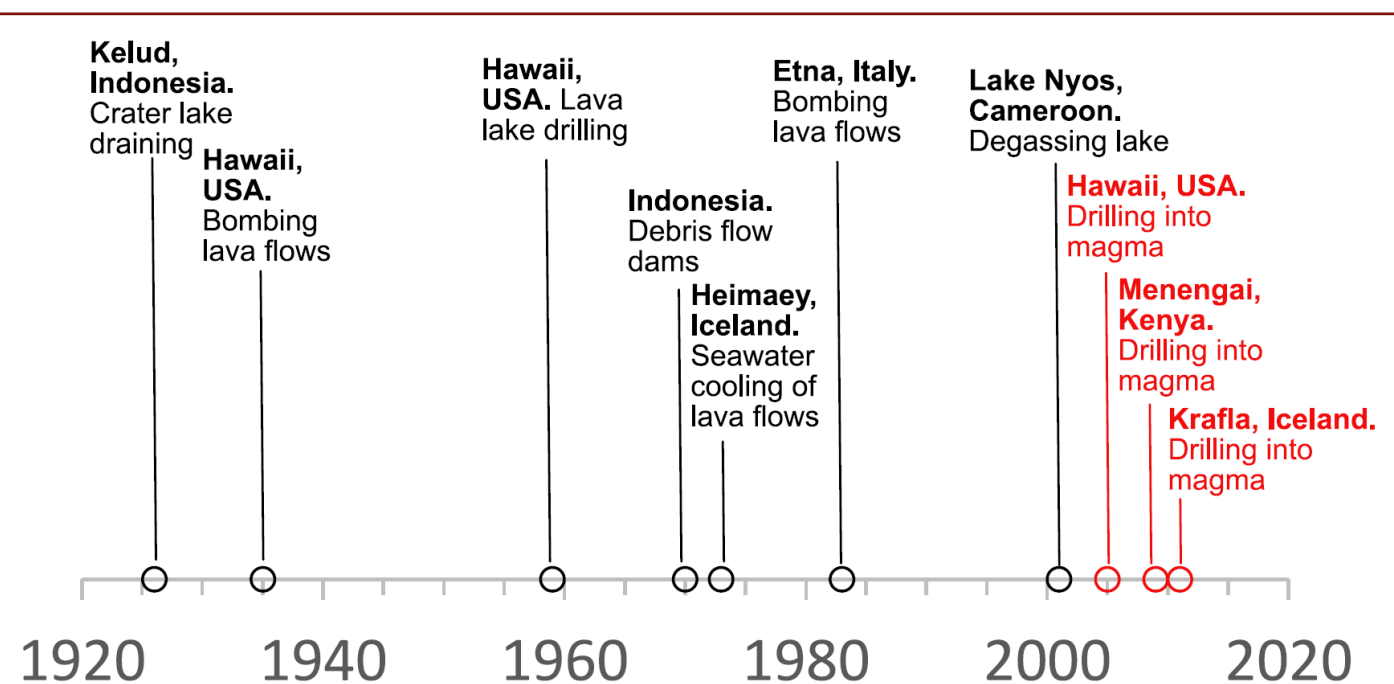
Šaltinis: Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). The Ethics of Volcano Geoengineering. *Earth's Future*, 11(10), e2023EF003714.

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

88 pav. pateiktoje diagramoje pateikiama žymiausių vulkaninės geoinžinerijos atvejų chronologija. Juodais apskritimais pažymėtos sąmoningos intervencijos, o raudonais apskritimais - nenumatytas poveikis ugnikalnių veiklai.

Taip pat yra patentuotų metodų, kaip planuoti degazaciją ir sumažinti ugnikalnių ir superugnikalnių išsiveržimų riziką.

Pavyzdžiui, dviejų Rusijos ekspertų užpatentuota technologija, pagal kurią nekontroliuojamų kaskadinių ugnikalnių išsiveržimų užkertamas kelias nekontroliuojamiems ugnikalnių išsiveržimams, naudojant kampinį gręžinių gręžimą slėgiui magmos kameroje reguliuoti. (89 pav.).



88 pav.

Kai kurių žymių ugnikalnių geoinžinerijos atvejų laiko juosta. Juodais apskritimais pažymėtos tikslingos intervencijos, o raudonais apskritimais - nenumatytos ugnikalnių intervencijos.

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



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

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

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.04.2007

(45) Опубликовано: 10.01.2009 Бюл. № 1

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

(72) Автор(ы):

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

(73) Патентообладатель(и):

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

(54) СПОСОБ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЛАВИНООБРАЗНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ

(57) Реферат:

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

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

5 0 8 C 1

RU 2 343 508 C 1

89 pav.

Patentas: lavinos tipo ugnikalnio išsiveržimo prevencijos būdas.

Šis išradimas susijęs su nekontroliuojamų, į laviną panašių ugnikalnių išsiveržimų prevencijos būdais ir kontroliuojamo magmos transportavimo, skirto naudoti statybose, organizavimo metodais. Jis padidina metodo veiksmingumą.

Išradimo santrauka:

Metodas susijęs su slėgio valdymu antrinėse magmos kameroje, esančiose po sulfatų aktyviais ugnikalniais. Tai pasiekama įstrižai gręžiant kanalus į antrinės magminės kameros pagrindą. Į kamerą įpurškiamos suslėgtos dujos, kad padidėtų slėgis ir taip sulėtėtų magmos antplūdis iš pirminės kameros. Tuo pat metu antrinėje kameroje susikaupusi magma ištraukiama ir išgręžtais kanalais transportuojama statybos tikslais. Šis procesas užtikrina, kad slėgis nepasiektų kritinio lygio, kuris galėtų sukelti į laviną panašų išsiveržimą.

Šaltinis: <https://patentimages.storage.googleapis.com/Oe/4a/51/11fd6e028d2813/RU2343508C1.pdf>

Kitą technologiją sukūrė amerikiečių išradėjas. (90 pav.) Šioje technologijoje aprašyti metodai, kaip iš ugnikalnių magmos kamerų, pavyzdžiui, Jeloustouno superugnikalnio kameros, pašalinti magmą, kad būtų išvengta galimų katastrofiškų išsiveržimų.

Pagrindinė idėja - sukurti dirbtinius kanalus (vamzdžius), kuriais magma būtų nukreipta į paviršių, kur ją būtų galima apdoroti ir potencialiai panaudoti, pavyzdžiui, energijos gamybai.

(12) **United States Patent**
Stratford

(10) **Patent No.:** **US 7,284,931 B2**
(45) **Date of Patent:** **Oct. 23, 2007**

(54) **MAGMA EVACUATION SYSTEMS FOR THE PREVENTION OF EXPLOSIONS FROM SUPERVOLCANOES**

(76) Inventor: **Brian Stapleton Stratford**, 40 Field Ris , Little ver, Derby DE23 1DE (GB)

(*) Notice: Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 0 days.

3,357,505 A *	12/1967	Armstrong et al.	175/16
3,396,806 A *	8/1968	Benson	165/45
3,693,731 A *	9/1972	Armstrong et al.	175/16
3,957,108 A *	5/1976	Van Huisen	165/45
3,967,675 A *	7/1976	Georgii	166/302
3,991,817 A *	11/1976	Clay	165/45
4,134,462 A *	1/1979	Clay	175/16
4,776,169 A *	10/1988	Coles, Jr.	165/45

FOREIGN PATENT DOCUMENTS

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

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

(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

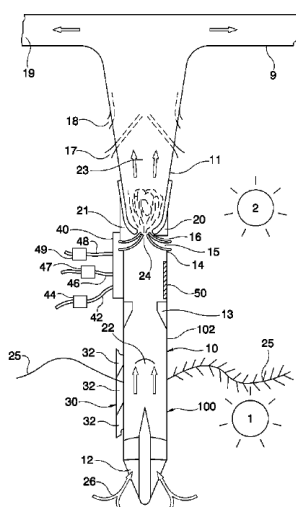
* cited by examiner

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



Pav. 90

Patentas: Magmos evakuacijos sistemos, skirtos superugnikalnio sprogamų prevencijai.

Aparatas kontroliuoja ugnikalnių magmos evakuaciją, kad būtų išvengta sprogamų. Magma evakuojama per vieną evakuacijos vamzdį, kuris įkaitina magmos srautą vamzdyje, kad magma vamzdyje nesuliptų. Šildymui gali būti naudojamos mažos degimo kameros, kuriose kaitinamas garas, kuris savo ruožtu kaitina ir stabilizuoja magmos srautą. Stabilumą padeda užtikrinti centrinis aušinimas, kai reikia, naudojant vandens čiurkšles iš ant vamzdžio sienelės esančių purkštukų.

Šaltinis:

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

Sėkmingo degazavimo pavyzdys - Japonijos projektas „[Unzeno mokslinio gręžimo projektas](#)“ (USDP), šešerių metų trukmės iniciatyva, pradėta 1999 m. balandžio mėn. Juo siekiama ištirti Unzeno kalno augimo istoriją, požeminę struktūrą ir magmos kilimo procesus (91 pav.). Pirmajame etape ugnikalnio šlaituose buvo išgręžti du gręžiniai ir sukurtas struktūrinis

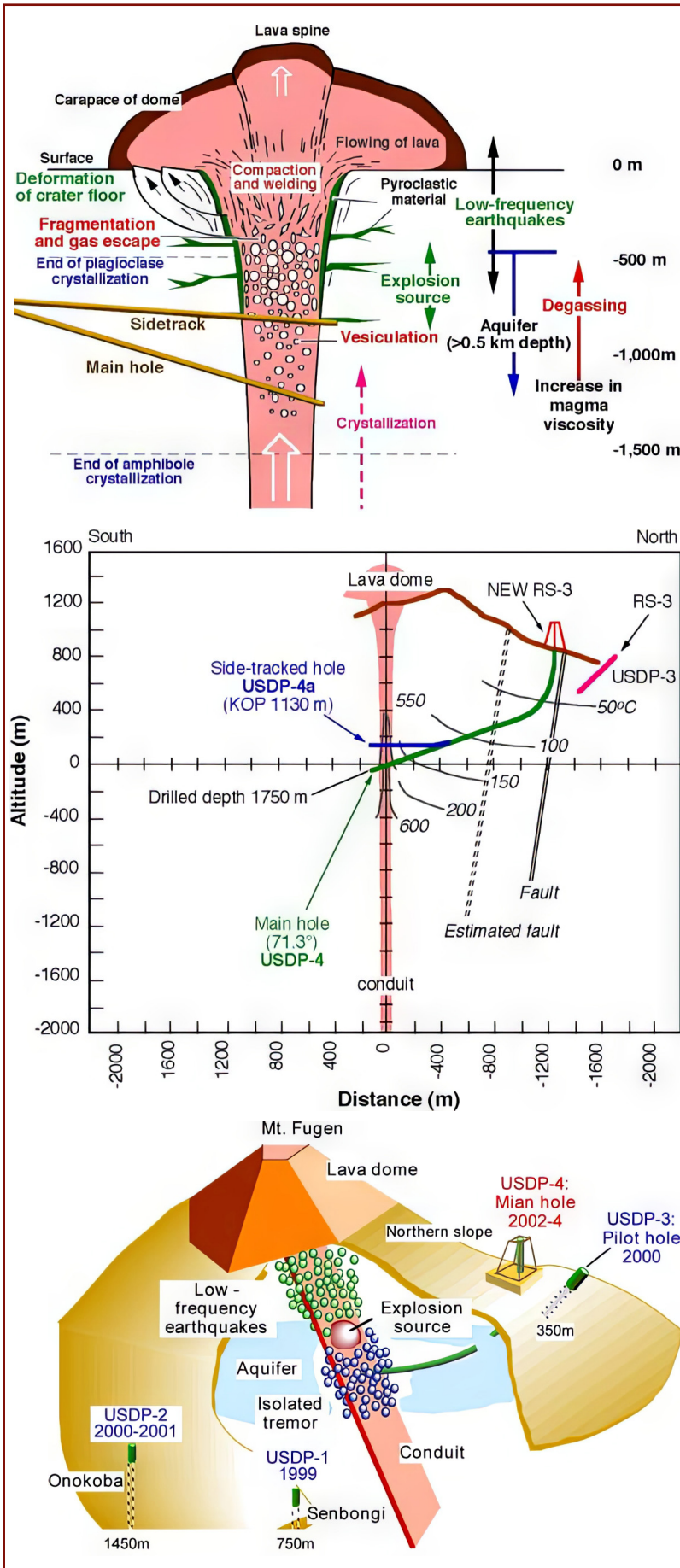
modelis. Antrajame etape daugiausia dėmesio skirta gręžimui į 1990-1995 m. išsiveržimų magmos kanalą, siekiant išanalizuoti degazacijos mechanizmą. Gręžimo strategija apėmė vertikalų gręžimą, po to palaipsniui didinant gręžinio nuolydį (92 pav.).



91 pav.
1995 m. Unzeno ugnikalnio gręžimo projekte naudota gręžimo įranga.

Šaltinis:

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



92 pav.

(A)

Unzeno lavos kupolo ir viršutinės kanalo dalies vaizdas. Efektyvus degazavimas iš putojančios magmos įvyko jos fragmentacijos ir atkaitinimo metu viršutinėje šachtos dalyje. Šachtos būklė buvo tiriama 2003 m. gręžiant pagrindinį gręžinį (USD-4), o 2004 m. gręžiant šalutinį gręžinį (USD-4a) buvo atliekami nuolatiniai kernų - pavyzdžių tyrimai.

Šaltinis: USDP projektas. (n.d.). In Žemės drebėjimų tyrimų institutas, Tokijo universitetas. Pateikta 2024 m. gruodžio 31 d. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USD%20consists%20of%20two%20phases%20>

(B)

Kanalo gręžimo trajektorijos. Naujos RS-3 ir RS-3 yra atitinkamai pagrindinio šoninio gręžinio gręžimo vietos ir bandomasis gręžinys.

Šaltinis: USDP projektas. (n.d.). Tokijo universiteto Žemės drebėjimų tyrimų institutas. Pateikta 2024 m. gruodžio 31 d. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USD%20consists%20of%20two%20phases%20>

(C)

Trimatis kanalo gręžimo vaizdas

Šaltinis: Vulkaninių skysčių tyrimų centras. (n.d.). Supratimas apie Unzeno ugnikalnio kanalų sistemą. Žemės drebėjimų tyrimų institutas, Tokijo universitetas. Pateikta 2024 m. gruodžio 31 d. <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/vrc/usdp/conduit.html>

Šiandien žmonija turi pakankamai technologinio ir inžinerinio potencialo, kad galėtų įsikišti į ugnikalnių sistemas. Tačiau kiekvienai planuojamai degazacijai reikia kruopštaus pasiruošimo, įskaitant išsamią duomenų analizę ir tikslus skaičiavimus. Tačiau net ir tada išlieka rizika.

Aprašyti metodai pirmiausia buvo išbandyti su įprastiniais ugnikalniais, kurių mastas iš esmės skiriasi nuo didžiulio Sibiro mantijos pliumo. Šis pliumas kelia grėsmę, gerokai viršijančią vieno superugnikalnio galią. Jis prilygsta tūkstančio Jeloustouno kalderos išsiveržimų energijai. Nepaisant to, šios problemos sprendimas tapo skubus būtent dėl to, kad esama galimų būdų jai sušvelninti.

Turėdama tinkamą požiūrį, žmonija yra pajėgi parengti Sibiro mantijos pliumo degazavimo programą, remdamasi sukaupta pasaulio specialistų patirtimi. Pagrindinis tokios programos tikslas būtų sumažinti pliumo kilimo pasekmes sumažinant lavos ir dujų slėgį antrinėse magminėse kamerose ir taip užkertant kelią didelio masto nekontroliuojamiems išsiveržimams.

Tokiai programai įgyvendinti reikės glaudaus tarptautinio bendradarbiavimo ir bendrų viso pasaulio mokslininkų ir inžinierių pastangų. Tik vieningas požiūris gali duoti veiksmingų sprendimų, užtikrinančių visos žmonijos saugumą.

Suplanuotos Sibiro pliumo degazacijos programos pavyzdys

Programa gali apimti lygiagretų kelių pagrindinių sričių vystymą:

1. Stebėsenos tinklo sukūrimas

1.1. Sukurti didelio jautrumo jutiklių ir palydovinių stebėjimo sistemų tinklą seisminiam ir terminiam aktyvumui regione stebėti. Tai leis laiku aptikti antrines magmines kameras.

1.2. Atlikti išsamų antrinių magminių kamerų kartografavimą taikant seisminės žvalgybos metodus. Itin svarbu bus preliminarai įvertinti slėgį ir magmos tūrį kiekvienoje antrinėje kameroje.

1.3. Anomalinėse zonose išgręžti mokslinius ir stebėjimo gręžinius ir įrengti slėgio, temperatūros ir seisminio aktyvumo jutiklius

svarbiausiems duomenims rinkti.

2. Kontroliuojamos degazacijos ir magminių kanalų blokavimo technologijų kūrimas

2.1. Reikės parengti planą, kaip saugiose zonose gręžti pasvirusius giluminius gręžinius iki 5 mylių (8 km) gylio. Siekiant užtikrinti, kad gręžiniai tiksliai pasiektų antrines magmines kameras, reikės atlikti išsamius trajektorijos skaičiavimus. Turi būti naudojamos gręžimo technologijos, atsparios aukštai temperatūrai ir slėgiui. Tai apima karščiui atsparių medžiagų naudojimą gręžinių sienelėms sutvirtinti ir stebėjimo sistemos, skirtos slėgiui ir temperatūrai gręžiniuose sekti, sukūrimą, siekiant užtikrinti saugumą ir efektyvumą.

2.2. Turi būti kruopščiai suplanuotas dujų ir lavos nukreipimo procesas, apimantis laipsnišką slėgio valdymą antrinėse magminėse kamerose per gręžinių sistemą. Tam reikia kontroliuoti degazavimo greitį, kad būtų išvengta staigių slėgio pokyčių, ir naudoti kompresorių sistemas dujų slėgiui reguliuoti. Kad į atmosferą nepatektų nuodingų medžiagų, reikės filtravimo ir aušinimo sistemų. Lavos ir dujų gavyba bus tęsiama tol, kol slėgis kiekvienoje kameroje stabilizuosis.

2.3. Tuomet turi būti parengtas tikslinio branduolinio sprogo konkrečiuose gręžiniuose planas, kad būtų užsandarinti sluoksniai virš antrinių magminių kamerų. Šiuo metodu siekiama, kad į paviršių nepatektų per didelis magmos kiekis ir būtų kuo mažiau išmetama pelenų.

Laipsniškas slėgio atpalaidavimas užtikrins Sibiro stabilumą ir apsaugos pagrindines apgyvendintas teritorijas, nors Norilskas ir aplinkinės gyvenvietės gali išlikti pavojuje.

2.4. Vykstant lavos nukreipimo iš kamerų procesui, reikia stengtis kuo labiau kontroliuoti jos tekėjimą. Lava turėtų būti nukreipiama specialiai paruoštais kanalais Arkties jūrų link. Be to, turėtų būti parengta programa, pagal kurią magmą būtų galima panaudoti statyboms, pavyzdžiui, dirbtinėms saloms kurti arba pakrantėms stiprinti.

3. Gyventojų evakuacija:

Gyventojų evakuacija: turi būti įdiegta išankstinio perspėjimo sistema ir parengti evakuacijos planai nenumatytoms ekstremalioms situacijoms. Be to, reikės parengti struktūrizuotą saugios žmonių evakuacijos iš didelės rizikos zonų planą. Į šį planą turėtų būti įtrauktos evakuotų asmenų prisitaikymo ir socialinės paramos priemonės, atsižvelgiant į ilgalaikio persikėlimo galimybę.

4. Infrastruktūros išsaugojimas:

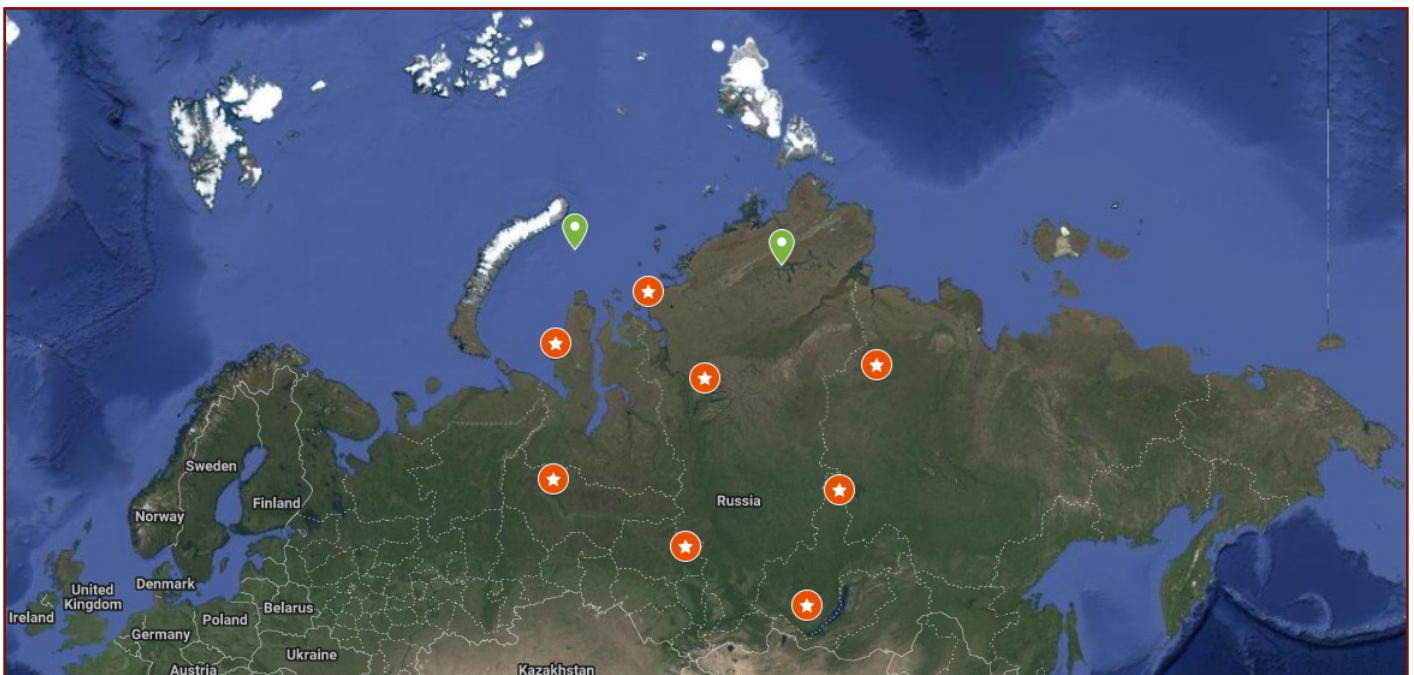
Turi būti parengti strateginių objektų apsaugos ir evakuacijos iš teritorijų, kurioms gresia lavos užliejimas, planai. Tai apima saugyklų saugiose zonose sukūrimą, kad būtų galima evakuoti svarbiausius regiono išteklius, pavyzdžiui, naftą, dujas, spalvotuosius ir tauriuosius metalus, rūdas, trąšas, maisto atsargas, vandenį ir medicinos reikmenis.

Vietų, kuriose bus įrengti tiriamieji gręžiniai šiuolaikinio Sibiro mantijos pliumo dinamikai stebėti, parinkimo pagrindimas

Norint suprasti pliumo kilimo greitį ir kryptį, jo galvos plitimą ir skverbimąsi pro Žemės plutos plyšius, pirmiausia reikia stebėti geoterminius ir geofizinius parametrus gylyje. Tam reikia gręžti naujus gręžinius ir juose reguliariai matuoti temperatūrą, slėgį, dujų sudėtį, suintensyvėjusių

magminių procesų žymenis, seisminį triukšmą ir kitus parametrus.

Tyrimų gręžiniams gręžti pasiūlyta dešimt vietų (93, 94 pav.).



93 pav.

10 preliminarinių vietų, rekomenduojamų tiriamiesiems gręžiniams gręžti, išsidėstymas

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

94 pav.

10 rekomenduojamų tiriamųjų gręžinių, skirtų Sibiro mantijos plumo progresui stebėti, lentelė. Nurodomas gręžinio pavadinimas, koordinatės, netoliese esanti gyvenvietė ar infrastruktūra ir geologinio pjūvio struktūra.

Šių gręžinių vietų atrankos kriterijai buvo grindžiami šiais principais:

1. Gręžinių vietos buvo pasirinktos atsižvelgiant į didžiausią šiluminių ir geodinaminių anomalijų, susijusių su pliumo galvos kilimu ir plitimu, sankirtą. Remiantis šiuo principu, vienas gręžinys buvo įrengtas centriniame siūlomo pliumo galvos kilimo regione, septyni gręžiniai buvo paskirti išilgai numatomos magmos tėkmės perimetro, dar vienas gręžinys buvo numatytas netoli Baikalo ežero, aktyvaus magmos judėjimo po Rytų Sibiro kratonu kryptimi, ir dar vienas gręžinys buvo planuojamas netoli Karos jūros, kad būtų galima stebėti pliumo judėjimą po Arkties šelfo vandenyno pluta.

2. Gręžinių išdėstymas buvo optimizuotas vėlesniems seismotomografiniams darbams, užtikrinant, kad apdorojus seisminių jutiklių duomenis būtų galima gauti aiškiausius 3D vaizdus. Kitaip tariant, seisminių jutiklių tinklas gręžiniuose buvo suprojektuotas taip, kad būtų optimaliai išdėstytas požeminei seismotomografijai.

3. Gręžinių vietose buvo atsižvelgta į gręžimui skirtos įrangos pristatymo galimybes ir privažiavimo kelius (transporto prieinamumą). Dėl sudėtingo reljefo, pelkėto kraštovaizdžio, kelių trūkumo ir ekstremalių klimato sąlygų šiaurinėje Vakarų ir Rytų Sibiro dalyje gręžinių vietos buvo parenkamos atsižvelgiant į tai, kad gręžinių vietos būtų arti esamos mokslinių tyrimų infrastruktūros - kelių, gyvenviečių ir veikiančių gręžimo platformų. Du taškai buvo pasirinkti dabartiniuose „Gazprom“ ir „Rosneft“ eksploatuojamuose naftos telkiniuose, kiti - šalia naftos, dujų ir kitų naudingųjų iškasenų telkinių. Reikėtų pažymėti, kad jei gręžti nurodytomis koordinatėmis pasirodys neįmanoma, gręžinių vietas galima koreguoti 10-20 km bet kuria kryptimi.

Rekomenduojami gręžinių tyrimo metodai :

Norint visapusiškai stebėti ir tirti mantijos pliumą, iš tiriamųjų gręžinių turi būti renkami šie parametrai:

- 1. Temperatūros stebėjimas:** Tai apima temperatūros matavimą įvairiuose gyliuose, kad būtų galima analizuoti šiluminės anomalijas.
- 2. Slėgis:** Slėgio lygio nustatymas sluoksniuose, siekiant įvertinti hidrodinamines sąlygas.
- 3. Dujų mėginių ėmimas:** Dujų mėginių ėmimas iš giluminių sluoksnių, siekiant ištirti jų sudėtį ir galimą magminės veiklos įtaką.
- 4. Seisminiai tyrimai:** Įrengiami standartiniai ir plataus nuotolio seisminiai jutikliai seisminiam aktyvumui fiksuoti, kad būtų sukurta išsami Žemės plutos ir mantijos seismotomografija, skirta nuolatiniam pliumo būklės stebėjimui.
- 5. Formavimo skysčio sudėtis:** Analizuojama susidarančių skysčių sudėtis, siekiant nustatyti galimą terminį ar magminį poveikį.
- 6. Geomechaniniai tyrimai:** Įtampų uolienose matavimai, siekiant išanalizuoti dėl pliumo įsiskverbimo deformuojamos litosferos įtemptą būklę
- 7. Elektromagnetiniai metodai:** Elektromagnetinių tyrimų atlikimas, siekiant užfiksuoti terpės elektrinių savybių pokyčius, susijusius su magmos įsiskverbimu.

Surinkti duomenys taps pagrindu kuriant išsamų mantijos pliumo dinamikos modelį ir vertinant jo poveikį geologiniams procesams Sibire.

Magminių kanalų gręžimo ir blokavimo charakteristikos planinės degazacijos metu

Pagrindinis gręžinių gręžimo tikslas planuojamos degazacijos metu - sumažinti slėgį pliūmo antriniuose magmos rezervuaruose, užkirsti kelią magmos sproginams ir užtikrinti kontroliuojamą dujų ir lavos išsiskyrimą.

Pradiniame etape gręžimo darbus atliks žmonės, nes nedideliame gylyje gręžimo procesas apima standartines technologines užduotis, kurios kelia minimalią riziką personalui. Procesui kontroliuoti ir operatyviai reaguoti į nukrypimus nuo normos bus naudojamos tradicinės gręžimo platformos su temperatūros ir slėgio stebėjimo sistemomis.

Kai gręžiant artėjama prie kritinio gylio ir prie aktyvių magminės sistemos zonų, labai padidėja rizika personalui. Šiame etape operacijos turi būti visiškai automatizuotos. Bus naudojamos specializuotos gręžimo platformos su automatizuotomis valdymo sistemomis. Gręžimo procesas bus valdomas nuotoliniu būdu naudojant programinę įrangą, kuri analizuos realaus laiko duomenis ir atitinkamai koreguos įrangos veiksmus.

Siekdami padidinti stebėsenos tikslumą, operatoriai naudos virtualios realybės technologijas, leidžiančias detaliai valdyti įrangą fiziškai nebūnant pavojingose zonose. Toks metodas sumažina nelaimingų atsitikimų, kuriuos gali sukelti aukšto slėgio dujų išmetimai arba įrangos gedimai dėl smūginių bangų, tikimybę.

Dronai ir robotai stebės gręžimo kompleksą ir aplinkinę teritoriją. Dronai su kameromis, termovizoriais ir jutikliais aptiks dujų nuotėkius, šilumines anomalijas ir seisminį aktyvumą. Tiesiogiai gręžimo zonoje veikiantys robotai

rinks duomenis apie temperatūrą, slėgį ir cheminę aplinkos sudėtį, perduodami šią informaciją automatiniams valdymo centrams. Šios technologijos sumažina žmonių buvimą didelės rizikos zonose ir užtikrina didelį tikslumą bei saugumą.

Baigus gręžimą, kitas etapas - kontroliuojamas degazacijos procesas, kurio metu palaipsniui atpalaiduojamas slėgis ir pašalinami dideli lavos kiekiai. Paskutiniame etape, gerokai sumažėjus magmos ir dujų kiekiui, gali prireikti kontroliuojamo sproginimo, kad būtų uždaryti magmos kilimo keliai. Vienas iš siūlomų metodų - kryptingas branduolinis sproginimas išgręžtame gręžinyje. Šio metodo tikslas - sumažinti tektoninę įtampą ir sukurti stabilius struktūrinius barjerus, blokuojančius magmos kanalus.

Taikant šį metodą uolienos suardomos didelės įtampos zonose, po to jos susilieja ir atvėsta veikiamos šiluminės energijos. Šis procesas skatina monolitinio barjero, galinčio visiškai arba iš dalies užkirsti kelią magmai patekti į paviršių, susidarymą. Termodinaminis poveikis taip pat gali sumažinti tektoninę įtampą ir sumažinti būsimų išsiveržimų tikimybę.

Branduolinių sproginimų įgyvendinimui reikalingi tikslūs skaičiavimai, įskaitant litostatinio slėgio, uolienų kietumo ir tankio bei magmos lydinio savybių įvertinimą. Šie veiksniai turi būti kruopščiai apsvarstyti, kad metodas būtų maksimaliai veiksmingas ir sumažėtų galima rizika.

Optimalaus gręžinių gręžimo laiko parinkimas planuojamos degazacijos metu

Šiuo metu mūsų specialistai daugiausia dėmesio skiria optimalaus gręžimo operacijų, kurios yra planuojamos degazacijos dalis, atlikimo terminų tyrimui. Nors dar per anksti daryti galutines išvadas, preliminarūs skaičiavimai jau rodo, kad galima tiksliai pasirinkti palankiausią degazacijos pradžios laiką. Išvados rodo, kad, teisingai nustačius laiką, galima kelis kartus sumažinti komplikacijų riziką.

Gręžimo procese reikia atsižvelgti ne tik į fizines ir mechanines uolienų savybes, pavyzdžiui, jų stiprumą ir trūkinėjimą, bet ir į laiko parametrus, susijusius su kosmine mechanika. Skaičiavimai turėtų būti grindžiami Žemės padėties ekliptikoje, Mėnulio fazės, pagrindinių

planetų, pavyzdžiui, Jupiterio, išsidėstymo ir dabartinio Saulės aktyvumo lygio analize. Be to, labai svarbu stebėti giluminius žemės drebėjimus gręžimo regione, nes tokie įvykiai gali gerokai padidinti vietos seisminį aktyvumą.

Šiuo metu jau turime bendrą supratimą apie šio proceso mechanizmą ir pagrindinius dėsningumus, tačiau šias išvadas reikia išsamiai patvirtinti. Mūsų mokslininkų grupė turi dar kartą kruopščiai išnagrinėti rezultatus ir nepriklausomai patvirtinti juos atliekant tyrimus ir taikant kitų specialistų sukurtus modelius.

Planuojamos Sibiro pliumo degazacijos rezultatų scenarijai

Vykdam planuojamą Sibiro pliumo degazaciją, gali susiklostyti trys pagrindiniai scenarijai, apskaičiuoti dviem projekto etapais: ankstyvuojų ir vėlesniuojų. Toliau pateikiamas išsamus kiekvieno scenarijaus aptarimas.

1. Minimali žala Rusijos teritorijai.

Jei degazacijos ir perteklinės lavos išleidimo iš antrinių magmos kamerų procesą kruopščiai modeliuoja tarptautinė ekspertų komanda, o skaičiavimai kruopščiai atliekami atsižvelgiant

į visas geologines ypatybes, abu degazacijos etapai gali vykti be nelaimingų atsitikimų ir komplikacijų. Pagal šį scenarijų žala Rusijos teritorijai būtų minimali, nuostoliai siektų 5-7 % šalies teritorijos arba daugiausiai iki 10 % (paveiktas maždaug 500-600 km spindulys). Didžiausi Krasnojarsko krašto miestai galėtų būti apsaugoti ir būtų išvengta žmonių aukų. Be to, dėl palankios raidos lava gali būti nukreipta į Arkties jūras, o tai gali išplėsti Rusijos teritoriją, nes atsirastų naujų pakrančių žemių.

2. Vidutinė žala Rusijos teritorijai.

Pagal šį scenarijų daroma prielaida, kad ankstyvasis degazacijos etapas bus sėkmingai užbaigtas. Vis dėlto jame prognozuojamos nenumatytos komplikacijos vėlesniuose etapuose, pavyzdžiui, staigus dujų sproginimas arba lavos išsiveržimas. Iki to laiko dalis dujų ir lavos jau būtų išsiskyrusios, todėl bendras poveikis sumažėtų. Galimi padariniai galėtų būti skystos bazaltinės lavos srautai, panašūs į stebėtus Islandijoje ar Havajų salose, arba vidutinio sprogstamumo išsiveržimas. Tokiu atveju galimi teritorijos nuostoliai galėtų padidėti iki 25-30 % (maždaug 4-5 mln. kv. km). Tai paveiktų miestus, esančius 1000 km spinduliu nuo aktyviosios zonos. Tačiau šis scenarijus nesukeltų pasaulinės civilizacijos katastrofos ar negrįžtamo sunaikinimo visoje Rusijos teritorijoje. Žmonija būtų pajėgi susidoroti su kilusiais klimato ir ekologiniais iššūkiais.

3. Didžiausia žala Rusijai ir pasauliui.

Šis scenarijus numato, kad vėlyva iniciatyva arba nepakankama specialistų kompetencija galėtų sukelti rimtų komplikacijų. Tyrimų stoka, skaičiavimo klaidos ar grėžimas per minkštą ar suskeldėjusią uolieną gali sutrikdyti operacijas. Jei komplikacijos kiltų ankstyvojo degazavimo etape, kai magmos kameroje slėgis yra didžiausias, galėtų įvykti viena iš dviejų katastrofiškų pasekmių: momentinis visos Sibiro pliumo sistemos sproginimas, arba lėtas, bet plataus masto lavos išsiliejimas, panašus į Sibiro trapų susiformavimą.

Nepaisant galimų pavojų, tokio scenarijaus tikimybė yra itin maža, nes sunku įsivaizduoti tokio sudėtingo projekto įgyvendinimą be tinkamo tarptautinio pasirengimo.

Optimistinis ir labiausiai tikėtinas rezultatas yra tas, kad bus prarasta tik 5-7 proc. Rusijos teritorijos, o žala bus minimali. Net

jei vėlesniuose etapuose kiltų komplikacijų, nuostoliai gali išaugti iki 25-30 %, o tai išlieka gerokai palankiau nei neveikimo pasekmės. Didesnių sugriovimų rizika per planuojamą degazaciją Rusijai ar pasauliui yra menka.

Įgyvendinus planuojamą degazaciją, Rusija turės unikalią galimybę pirmauti pasaulinės geodinaminės rizikos valdymo srityje ir sustiprinti savo, kaip tarptautinės mokslo ir technologijų lyderės, pozicijas. Sėkmingai įgyvendinus projektą bus pademonstruoti šalies gebėjimai spręsti planetos masto iššūkius, skatinant pasaulinį bendradarbiavimą siekiant užkirsti kelią stichinėms nelaimėms. Ši iniciatyva ne tik stabilizuos Rusijos vidaus politinę ir socialinę aplinką, bet ir sustiprins tarptautinį bendradarbiavimą sprendžiant globalias problemas.

Kontroliuojamas Sibiro pliumo degazacijos procesas gali turėti įtakos ne tik vietos regionui, bet ir kitoms vulkaninėms sistemoms, pavyzdžiui, Jeloustounui ir stratovulkanams visame pasaulyje. Magminiai telkiniai ir jų dinamika sudaro vieną tarpusavyje susijusį pasaulinį tinklą, veikiantį kaip vieninga geomechaninė sistema. Kontroluojamas slėgio sumažinimas viename segmente gali sumažinti įtampą visuose magminiuose rezervuaruose, užkirsdamas kelią grandininėms reakcijoms ir išsiveržimams. Tai galima palyginti su automobilio padangos išleidimu: sumažinus slėgį vienoje vietoje, perskirstoma apkrova ir užkertamas kelias plyšimui kritiškai įtemptuose taškuose. Panašus degazacijos metodas galėtų stabilizuoti magmines sistemas pasauliniu mastu.

Todėl planinė ir kontroliuojama degazacijos operacija yra vienintelė reali galimybė žmonijai išvengti katastrofos tiek Rusijai, tiek visam pasauliui. Šis scenarijus suteikia galimybę išvengti pasaulinės katastrofos ir kartu laimėti laiko, kad žmonija galėtų sukurti kitus sprendimus.

Tačiau, nepaisant didžiulių vilčių, sėkmingas net ir optimistiškiausio scenarijaus įgyvendinimas

yra didžiulis iššūkis. Būtina imtis skubių veiksmų, nes delsimas didina katastrofiškų įvykių tikimybę. Keista, kad toks projektas gali susidurti su Rusijos pasipriešinimu dėl galimos rizikos, pavyzdžiui, žalos infrastruktūrai ir sumažėjusios strateginių išteklių kontrolės.



Išvados

Sibiro pliumas kelia pasaulinę geodinaminę grėsmę, savo mastu prilygstančią tūkstančiui katastrofiškų didžiausių superugnikalnių išsiveržimų. Nekontroliuojamas išsiveržimas gali sukelti planetos masto pasekmes, įskaitant ledynmečio pradžia, ekosistemų sunaikinimą, infrastruktūros žlugimą ir žmonijos išnykimą. Dėl šių pavojų būtina įgyvendinti prevencines priemones, pavyzdžiui, planuojamą Sibiro pliumo magminės sistemos degazaciją.

Dėl neveiklumo kyla savaiminių, nekontroliuojamų išsiveržimų grėsmė, kurių pasekmės būtų katastrofiškos ne tik Rusijai, bet ir visai planetai. Kontroliuojamas slėgio mažinimas magmos kamerose gali padėti išvengti blogiausio scenarijaus ir suteikti žmonijai kritiškai reikalingo laiko ilgalaikiams sprendimams sukurti.

Be to, atmosferos vandens generatorių technologijos integravimas į kasdienį naudojimą kartu su Sibiro pliumo degazavimu galėtų atverti naujas galimybes atkurti ekologinę pusiausvyrą. Tai leistų išvalyti vandenynus nuo plastiko, sustiprinti vandens ciklą ir atkurti planetos šiluminę pusiausvyrą. Visapusiškas tokių priemonių taikymas galėtų stabilizuoti klimatą ir užtikrinti žmonijos ateitį, laimint laiko, kad

būtų galima spręsti išorinės kosminės įtakos, atsakingos už katastrofiškus įvykius per 12 000 metų ciklą, problemas.

Šiems tikslams pasiekti reikalingas skubus tarptautinis įvairių sričių mokslininkų, įskaitant kvantinės fizikos specialistus, bendradarbiavimas, kad būtų sukurti ir įgyvendinti išsamūs sprendimai. Tačiau tokiam bendradarbiavimui trukdo geopolitiniai ir kariniai konfliktai. Todėl būtina paskelbti pasaulinį karo veiksmų moratoriumą ir karinius išteklius nukreipti į nelaimių padarinių švelninimą ir humanitarines pastangas. Žmonija turi tik 4-6 metus santykinai stabilų sąlygų imtis būtinų veiksmų.

Jei bus sudarytos sąlygos atviram bendradarbiavimui, mokslininkams nereikės pradėti nuo nulio, nes šioje srityje jau yra atliktų mokslinių tyrimų ir supratimo apie priežastinius ryšius pagrindas. Žmonijos nesugebėjimas teikti pirmenybę visuotinei vienybei ir moksliniam bendradarbiavimui turės negrįžtamų pasekmių gyvybei Žemėje.

1 priedas

Seisminio aktyvumo analizės metodika apima duomenų atsisiuntimą ir apdorojimą iš Tarptautinio seismologijos centro (ISC). Kadangi į duomenų rinkinį įtraukti įvairių šalių ir mokslinių tyrimų institucijų įnašai, taip pat skirtingų tipų magnitudžių skalės (Mw, Ms, Mb, ML, MD ir t. t.), buvo taikomas specialus duomenų apdorojimo algoritmas, kad iš kelių šaltinių būtų atrinktas tinkamiausias magnitudžių tipas. Buvo taikomi du skirtingi metodai:

1. Tekste vadinamas **specialiosios medianos dydžio algoritmu**. Šį metodą sudaro pageidaujamo dydžio įverčio pasirinkimas ir įvykio įtraukimas į imtį, jei pageidaujamas įvertis patenka į pageidaujamą dydžio intervalą. Pasirenkame pageidaujamo didumo įvertį, ieškodami šių tipų įverčių (eilės tvarka): Mw, ML, MS, Mb, MD, MV.

Jei pasirinktos rūšies dydžių imtis yra vieno įvykio dydžių imtis, apskaičiuojant medianą imami visi pasirinktos rūšies to įvykio dydžių įverčiai. Tada jiems randama mediana.

Jei konkretaus įvykio atveju nėra nė vieno iš pirmiau minėtų pageidaujamų tipų įverčių (tai pasitaiko retai, tik keli procentai įvykių visoje duomenų bazėje), tada pasirenkamas bet kuris magnitudės įvertis, kurio vertė atitinka iš visų to įvykio magnitudžių tipų apskaičiuotą medianą.

2. Šis metodas, tekste vadinamas **didžiausių magnitudės reikšmių algoritmu**. Iš visų įvykio dydžio įverčių pasirenkamas didžiausią vertę turintis įvertis.

Pirmasis algoritmas vidutiniškai lemia nedidelį dydžio sumažėjimą, palyginti su didžiausia perduota verte, tačiau, kaip parodė patirtis, medianinis algoritmas užtikrina tinkamą Gutenbergo-Richterio dėsnio ir kitų dėsningumų veikimą ir gana gerai sutampa su kitų seismologinių bazių, tokių kaip USGS ir Integruotų seismologijos tyrimų institutų (IRIS), duomenimis.

Antrasis algoritmas leidžia įvertinti bet kurios mokslinių tyrimų institucijos užregistruotų žemės drebėjimų, kurių stiprumas viršija pasirinktą ribą, skaičių. Šis metodas padeda nustatyti žemės drebėjimų dažnumo tendencijas tam tikrame magnitudės intervale.

Visi grafikai, pateikti skyriuje „Seisminio aktyvumo augimas kaip plokščių destabilizacijos požymis dėl Sibiro magminio pliumo aktyvumo“ buvo nubraižyti naudojant pirmąjį algoritmą - specialų medianinių magnitudžių reikšmių algoritmą (44-75 pav.).

Pasirinkus dydį, duomenys buvo filtruojami pagal ISC duomenų bazės įvykių tipą, kad būtų pašalinti įvykiai, kuriuos sukėlė žmogaus veikla, susijusi su kasybos darbais, pavyzdžiui, sproginiai, įtariamieji sproginiai ir uolienų sproginiai. Nebuvo įtraukti šie įvykių tipai:

km = žinomas minosvaidžio sproginas

sm = įtariamasis minos sproginas

kh = žinomas cheminis sproginas (ne standartinė IMS)

sh = įtariamasis cheminis sproginas (ne standartinė IMS)

kx = žinomas eksperimentinis sproginas

sx = įtariamasis eksperimentinis sproginas

kn = žinomas branduolinis sproginas

sn = įtariamasis branduolinis sproginas

Be to, kadangi Rusijoje vykdoma daug kasybos darbų, ISC duomenų bazė buvo sugretinta su Rusijos mokslų akademijos Vieningosios geofizikos tarnybos 2025 m. sausio mėn. duomenimis. Į šį duomenų rinkinį įtraukti visi žinomi sproginiai ir uolienų sproginiai Rusijos teritorijoje. Siekiant užtikrinti, kad galutiniame duomenų rinkinyje neliktų su sprogimais susijusių įvykių, šie įvykiai taip pat buvo pašalinti.

Nuorodų sąrašas

- 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://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001>
- Black, B., Mittal, T., Lingo, F., Walowski, K., & Hernandez, A. (2021). Assessing the Environmental Consequences of the Generation and Alteration of Mafic Volcaniclastic Deposits During Large Igneous Province Emplacement. In R. E. Ernst, A. J. Dickson, & A. Bekker (Eds.), *Geophysical Monograph Series* (pp. 117-131). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch5>
- Bogoyavlensky, V.I., Nikonov, R.A. & Bogoyavlensky, I.V., 2023. New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: thermokarst lakes with gas blowout craters and mud volcanoes. *AEE*, 13, pp.353–368. Available at: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>
- Bogoyavlensky, V.I., 2023. New data on mud volcanism in the Arctic on the Yamal Peninsula. *Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk. Nauki o Zemle*, 512, pp.92–99. Available at: <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>
- Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., ... & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3(5). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Bryson, R. A. (1989). Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115-125. <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

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

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

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Larson, R.L. & Olson, P., 1991. Mantle plumes control magnetic reversal frequency. *Earth and Planetary Science Letters*, 107(3–4), pp.437–447. Available at: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90091-U](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90091-U)

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

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

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

- Mazaud, A. & Laj, C., 1991. The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test. *Earth and Planetary Science Letters*, 107(3–4), pp.689–696. Available at: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90111-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T)
- Mikhailova, R. S. (2014). Strong earthquakes in the mantle and their influence in the near and far zone. *Geophysical Survey RAS*. <http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mihaylova.pdf>
- Mikhailova, R. S., Ulubieva, T. R., & Petrova, N. V. (2021). The Hindu Kush earthquake of October 26, 2015 with $M_w=7.5$, 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.