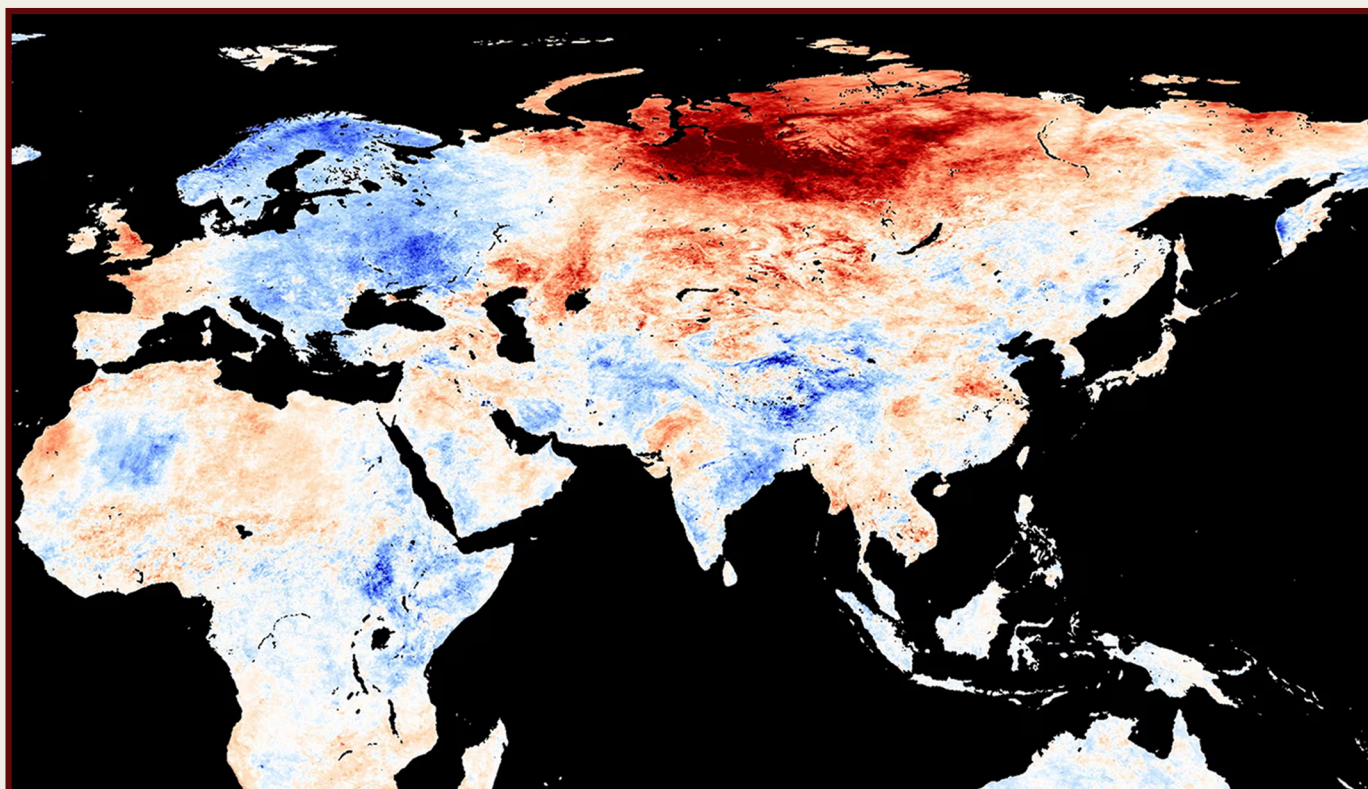


A SZIBÉRIAI KÖPENYCSÓVA KITÖRÉSÉNEK VESZÉLYÉRŐL

ÉS A PROBLÉMA MEGOLDÁSI LEHETŐSÉGEIRŐL



A SZIBÉRIAI KÖPENYCSÓVA KITÖRÉSÉNEK VESZÉLYÉRŐL ÉS A PROBLÉMA MEGOLDÁSI LEHETŐSÉGEIRŐL

TARTALOMJEGYZÉK

A Földön a jelenlegi időszakban bekövetkező éghajlatváltozás geodinamikai modelljének rövid leírása	4
A Föld magjának elmozdulása Szibéria irányába 1998-ban	16
Szibéria és a Szibériai Sarkvidék 3-4-szer gyorsabban melegszik, mint a világ többi része	21
A szibériai köpenycsóva emelkedésének közvetett jelei	25
Permafroszt olvadása	27
Az iszapvulkanizmus megnyilvánulásai	29
A talaj felmelegedése	31
A felszíni levegő hőmérséklete	32
A villámlások számának növekedése	34
Az ózonréteg csökkenése	36
A köpenycsóva szerkezete, lehetséges mérete és lokalizációja a közzétett és megfigyelési adatok alapján	38
A köpenycsóva lokalizációja	44
A szeizmikus aktivitás növekedése a tektonikus lemez destabilizálódásának jele	48
A szibériai kitörés elkerülhetetlenségének indoklása	72
1. Forgatókönyv. A szibériai köpenycsóva egylépcsős kitörése	73
Szupervulkánok és vulkáni rendszerek aktiválása	80
Savas esők	82
Vulkanikus tél	83
2. Forgatókönyv. A szibériai köpenycsóva fokozatos kitörése	85
A szibériai köpenycsóva fokozatos kitörésének következményei Oroszországra nézve	90
A szibériai köpenycsóva fokozatos kitörésének következményei az egész világra nézve	91
A szibériai köpenycsóva fokozatos kitörésének hosszú távú következményei a bolygóra nézve	92
3. Forgatókönyv. Tervezett szabályozott gázmentesítés	93
Meglévő vulkanikus geomérnöki technikák	100
Példa a szibériai köpenycsóva tervezett gázmentesítési programjára	
A szibériai modern köpenycsóva dinamikájának megfigyelésére szolgáló tudományos kutatófúrások helyszínválasztásának indoklása	102
A tervezett gázmentesítési program során a magmacsatornák fúrásának és elzárásának sajátosságai	106
A fúrások optimális időpontjának kiválasztása a tervezett gázmentesítés során	107
A szibériai köpenycsóva tervezett gázmentesítése eredményeinek forgatókönyvei	107
A szibériai köpenycsóva tervezett gázmentesítése eredményeinek forgatókönyvei	110
Következtetések	111
Melléklet 1	113
Hivatkozások listája	

A Föld éghajlatváltozása geodinamikai modelljének rövid ismertetése a jelenlegi időszakban

A Föld éghajlatváltozása geodinamikai modelljének rövid ismertetése a jelenlegi időszakban

Az elmúlt 30 évben a Földön az éghajlati változások, anomáliák és szélsőséges jelenségek soha nem látott mértékű és szinkronban történő növekedése tapasztalható a bolygó összes burkában és geofizikai paramétereiben. E változások előrehaladása exponenciálisan gyorsul. A tudományos adatok átfogó elemzése azt mutatja, hogy a Föld valamennyi burkában tapasztalható anomáliák növekedésének fő okai a teljes Naprendszerben 12 000 évente bekövetkező csillagászati ciklusok.

A külső csillagászati hatás hipotézisét megerősíti, hogy a Naprendszer más bolygóin és azok műholdjain hasonló éghajlati, geodinamikai és mágneses anomáliák figyelhetők meg, amelyek a jelenlegi időszakban a Földön bekövetkező változásokkal szinkronban jelentkeznek. Például az Uránuszon, a Jupiteren és a Vénuszon a szélsősebesség és a hurrikánok

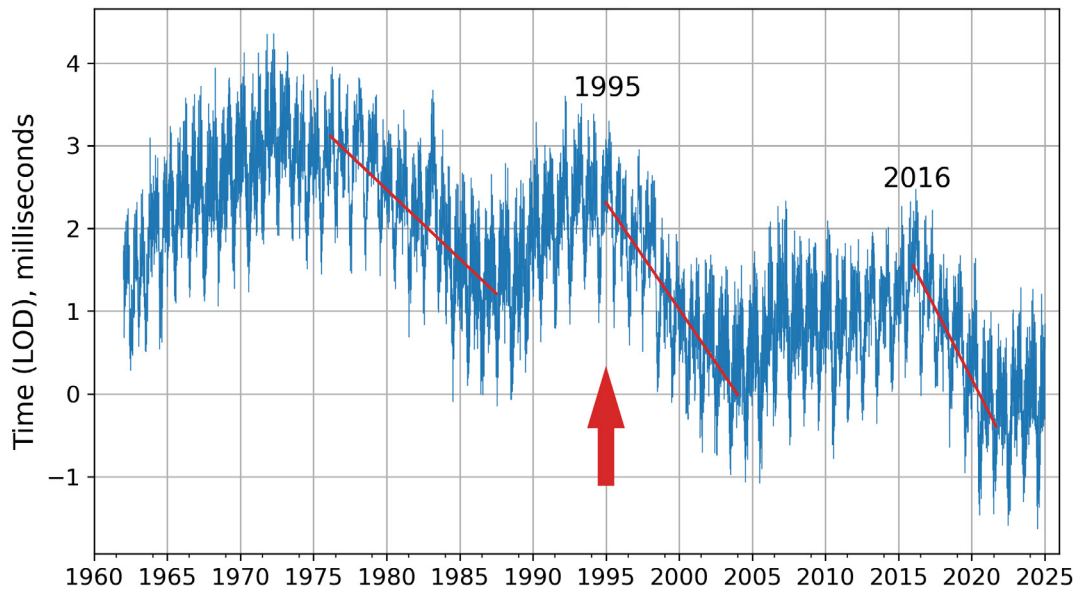
méretének növekedését regisztrálták. Ugyanakkor a Marson a sarkokon a jégsapkák olvadása figyelhető meg, a Vénuszon és a Marson pedig tovább fokozódik a vulkáni tevékenység. Emellett a szeizmikus aktivitás is növekszik a Marson, ami anomális geodinamikai aktivitás kialakulását jelzi.

A Föld rendszerében a jelenlegi 12 000 éves csillagászati ciklikusság következtében bekövetkező kritikus változások 1995-ben kezdődtek, amikor jelentős geofizikai anomáliákat regisztráltak, többek között a Föld forgásának erőteljes felgyorsulását¹ (1. ábra) és tengelyének elmozdulását (2. ábra), az északi mágneses pólus² erőteljes sodródásának kezdetét (3. ábra). Ezek a változások a Föld magjában bekövetkezett jelentős változásokra utalnak.

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) A Föld mágneses pólusai. Moszkva: ICNMO.

A nap hosszának eltérése



1. ábra.

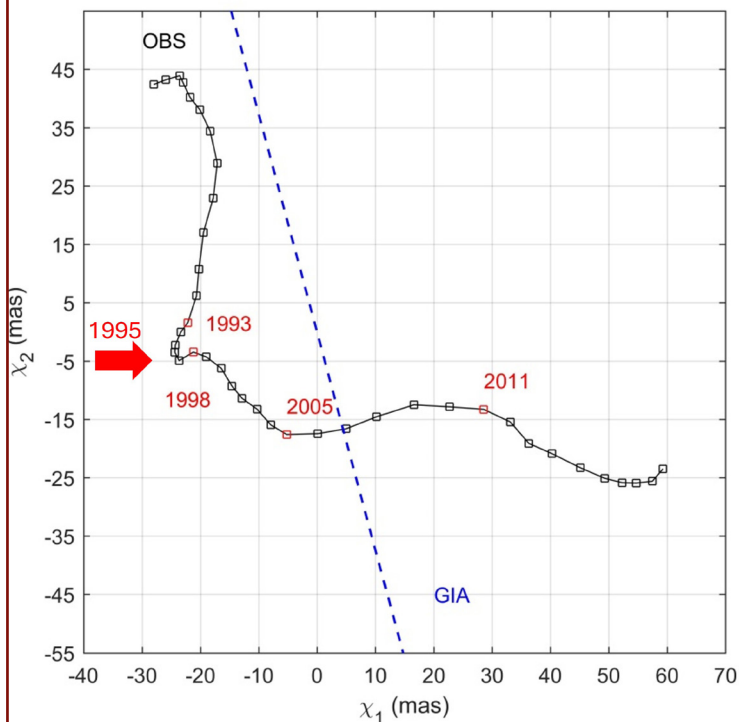
A nap hosszának eltérése milliszekundumokban az 1962 és 2023 közötti időszakra.

Adatforrás: a párizsi obszervatórium IERS Földorientációs Központja.

Naphossz - Föld orientációs paraméterek:

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

Az ábrán a piros vonalak trendvonalak, amelyek azt mutatják, hogy milyen ütemben rövidül a nap. A bal oldali vonal például szelídebb, míg a jobb oldali, a 2016-os gyorsulási vonal már majdnem függőleges, ami azt jelenti, hogy a nap sokszorosára rövidül, ami azt jelenti, hogy a bolygó gyorsabban forog.



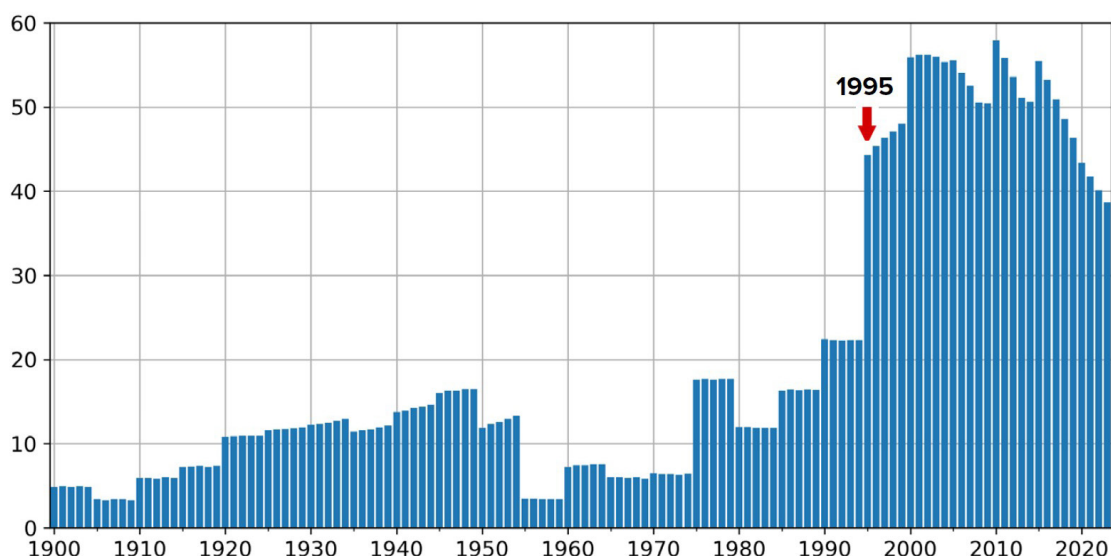
2. ábra.

A megfigyelt gerjesztés hosszú távú pályája az éves és Chandler-ciklusok mozgóátlag módszerrel történő eltávolítása után (fekete vonal négyzetekkel) és a GIA által vezérelt poláris sodródás iránya (kék szaggatott vonal).

A mozgóátlag részhalmaz méretét 84 hónapnak feltételezzük, amelynek legkisebb közös többszöröse 12 hónap (éves ciklus) és 14 hónap (Chandler-ciklus), Liu et al. (2017) szerint.

Forrás: 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>

Az északi mágneses pólus sebessége (km/év)



3. ábra.

Az északi mágneses pólus sebessége (km/év)

Forrás: NOAA északi mágneses pólus helyzetére vonatkozó adatok

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

A hipotézis szerint a Naprendszer ebben az időpontban kezdett belépni egy olyan zónába, amelyben a külső kozmikus hatás jelentős hatást kezdett gyakorolni a bolygókra, nevezetesen a magjukra. A Föld magjában 1995-ben bekövetkezett változások a külső mag felmelegedésének növekedésére utalnak, amiből arra lehet következtetni, hogy további energia kezdett áramlani a Föld magjába. A Föld magjában bekövetkező ilyen mélyreható változásokhoz négymilliárdszor több energiabevitelre van szükség, mint amennyit az emberiség a civilizáció teljes élettartama alatt termelt.

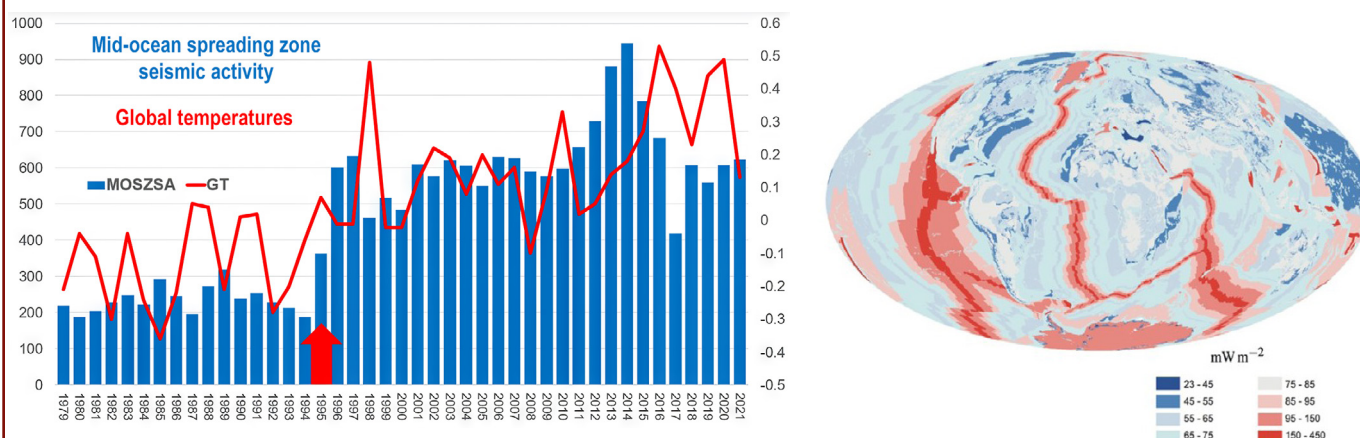
A külső hatások beáramlása a Föld magjába a földköpeny olvadásával és a magma felszínre emelkedésével kapcsolatos folyamatok felerősödéséhez vezetett, ami szeizmikus és vulkanikus tevékenység láncreakcióját okozta, valamint hozzájárult a belső térből származó fokozott felmelegedéshez és az éghajlati

kataklizmák növekedéséhez szerte a világon.

1995 óta például jelentősen megnőtt a szeizmikus aktivitás, ami a földrengések gyakoriságának, nagyságának és energiájának növekedésében nyilvánult meg. Ez a tendencia mind a kontinenseken, mind az óceánfenéken megfigyelhető (4. ábra), és olyan régiókra is kiterjed, amelyek korábban nem voltak szeizmikusan aktívak, ami a változások globális jellegét jelzi.

Fontos megjegyezni, hogy az 5,0-es és annál erősebb erősségű földrengések számának növekedése nem a szeizmikus megfigyelési technológia fejlődésével függ össze (5. ábra), hanem a Föld geodinamikai rendszerében bekövetkező valódi változásokat tükrözi. A Nemzetközi Szeizmológiai Központ összesített adatai megerősítik, hogy a földrengések száma az elmúlt 25 évben jelentősen megnőtt és tovább növekszik (6. ábra).

Az óceánfenéki földrengések számának növekedése az óceánközépi gerincek mentén

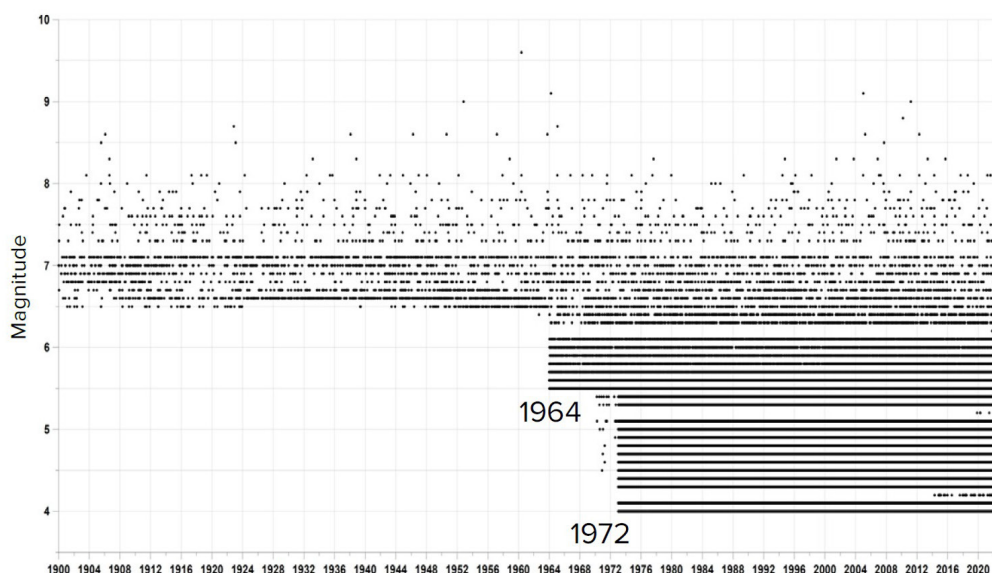


4. ábra.

Az óceánfenéki földrengések és a globális légköri hőmérséklet egyidejű növekedése (balra). Az óceánközépi gerincek geotermikus felmelegedése (jobbra), Davies & Davies, 2010.

Forrás: Viterito, A. (2022). 1995: Egy fontos fordulópontra a közelmúlt geofizikai történetében. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29 (5).
<https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Az ábra az óceánfenéki földrengések számának 1995-ös kiugrását szemlélteti az óceánközi gerincek mentén, valamint az óceánfenéki szeizmicitás és a légköri hőmérséklet szoros korrelációját, ami az óceán és a légkör felmelegedésének egy további mélységi forrására utal.

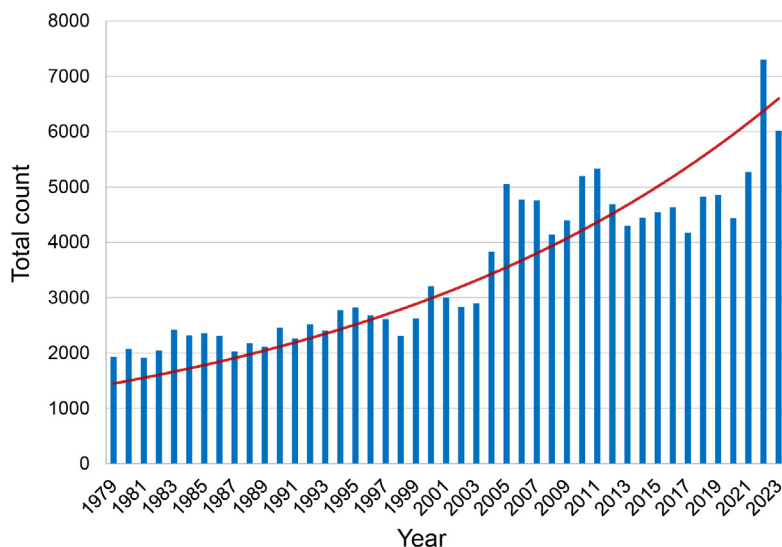


5. ábra.

A fekete pontok a grafikonon az egyes évek különböző erősségű földrengéseit mutatják.

1964 előtt csak a 6,5-es vagy annál erősebb földrengéseket regisztrálták. 1964 óta (az érzékenyebb érzékelők telepítésével) - az 5,5-ös és afeletti értékektől. 1972 óta - a 4,0-es és annál nagyobb földrengések, függetlenül a helyszíntől.

M5+ földrengések 1979-2023, ISC



6. ábra.

Az ISC-adatbázis szerint 1979 és 2023 között bekövetkezett 5,0 vagy annál nagyobb erősségű földrengések.

Az adatok mintavételezése az ISC adatbázisában szereplő maximális magnitúdóértékek algoritmus alapján történt az egyes eseményekre vonatkozóan (1. függelék).

Ezen túlmenően a szeizmikus aktivitás a vulkánok közelében és olyan szupervulkánoknál is megnövekedett, mint az amerikai Yellowstone, az olaszországi Campi Flegrei, az új-zélandi Taupo és más olyan vulkánok, amelyek az elmúlt 12 000 éves ciklusokban kitörtek. A vulkánkitörési napok száma is növekszik, amit olyan rendellenes kitörések kísérnek, amelyekben a kilövellt láva túlhevült és atipikus összetételű, ami a köpeny mélyebb rétegeiből származó magmára jellemző.^{3,4,5,6,7}

Különösen figyelemre méltó a 300 kilométernél nagyobb mélységben bekövetkező mélyfókuszú földrengések növekvő száma, amelyek esetenként akár 750 kilométerre is eléri a földfelszín alatti mélységet. Ezek a jelenségek nem a földkéregben,

hanem a földköpenyben fordulnak elő, ahol a köpeny anyaga általában simán deformálódik, nem pedig összeomlik, így az ilyen földrengések jellege szokatlan.

Mivel ezek a földrengések rendkívüli nyomás és magas hőmérséklet mellett következnek be, arra lehet következtetni, hogy ezek az erőteljes robbanások energiájukban több atombomba egyidejű felrobbanásához hasonlíthatók a földköpenyben. Ezenkívül a mélyfókuszú földrengések gyakran erős földrengéseket váltanak ki a földkéregben, felerősítve pusztító hatásukat.^{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>

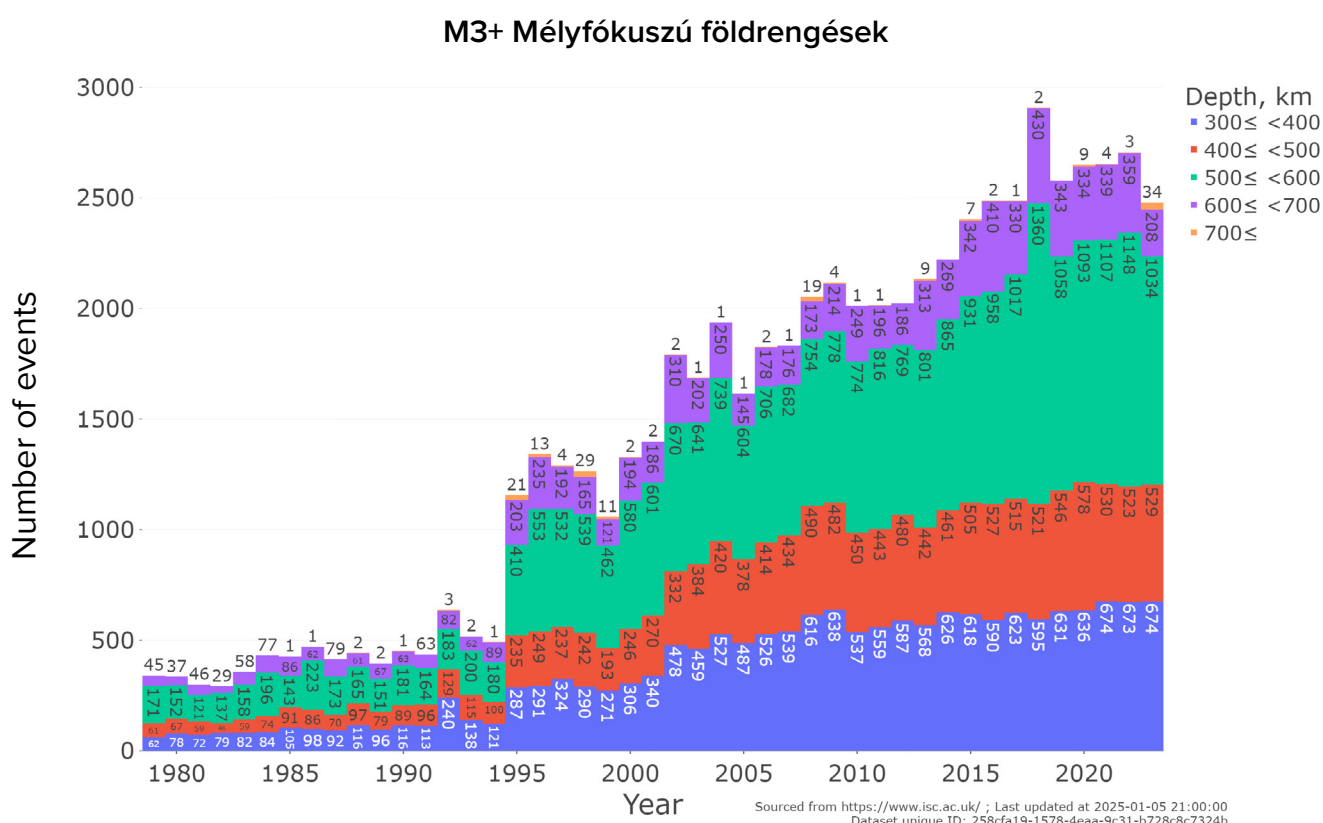
⁷D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports*, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>

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>

1995 óta az ilyen mélyfókuszú földrengések számának gyors, exponenciális növekedése figyelhető meg (7., 8. ábra), ami egybeesik más, ugyanebben az időszakban kezdődött geodinamikai anomáliákkal. Ezeknek a köpenyen

belüli robbanásoknak a növekedése a bolygó mélyén lévő energia növekedésére és a köpeny intenzív olvadására utal, ami nagyszabású vulkánkitörésekhez vezethet.



7. ábra.

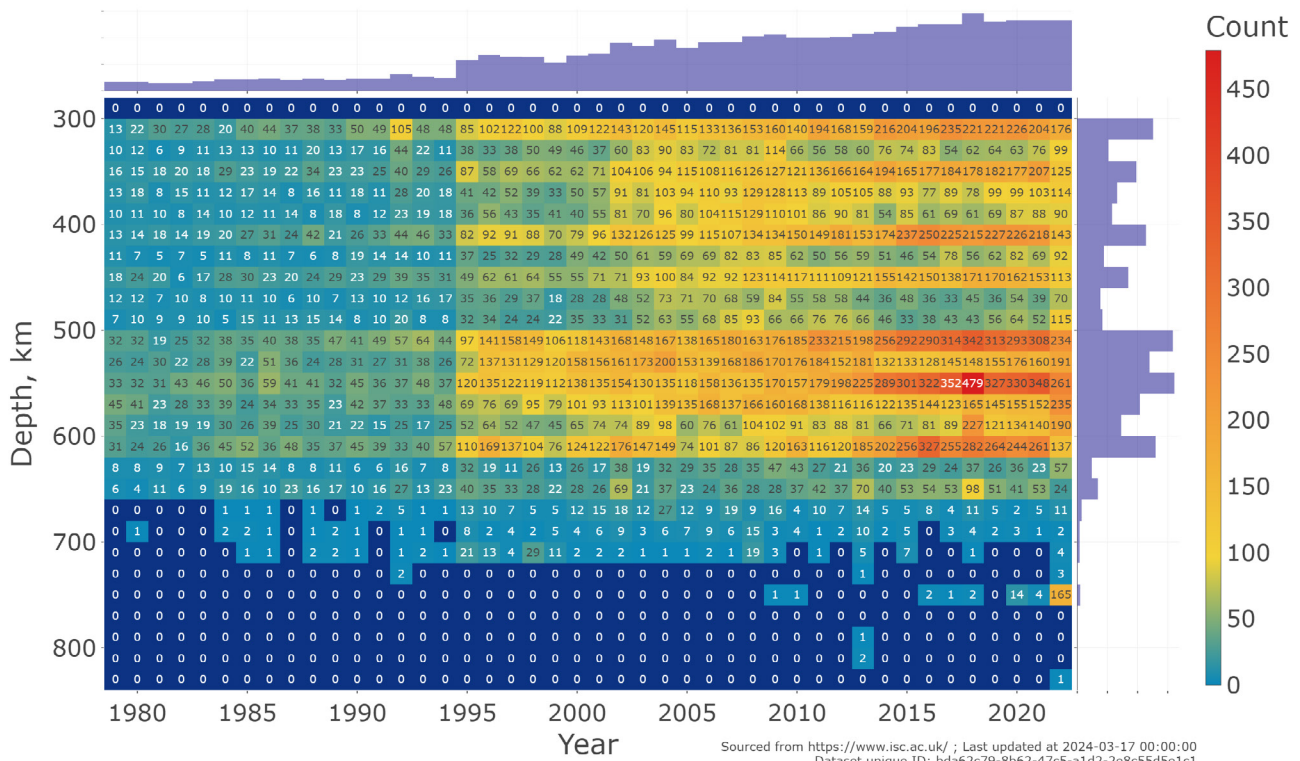
A 3,0-nál nagyobb erősségű mélyfókuszú földrengések számának exponenciális növekedése a Földön 1979 óta.

A grafikon az ISC adatbázisában szereplő, az egyes eseményekre vonatkozó medián magnitúdóértékekből (lásd az 1. függelék) egy speciális algoritmussal történő adatomintavételezés alapján készült.

Adatbázis: ISC.

A grafikon a földrengések számának növekedését mutatja a 300 km-nél nagyobb mélységben, a Föld felső köpenyében bekövetkező földrengések számának geometriai előrehaladását, ahol a közeg képlékenynek és repedésre képtelennek tekinthető. Jelentős ugrás 1995-ben figyelhető meg, akárcsak számos más geodinamikai anomália növekedési tuskéi. A mélyfókuszú földrengések számának növekedése nem függ össze az érzékelők számának növekedésével.

M3+ Mélyfókuszú földrengések



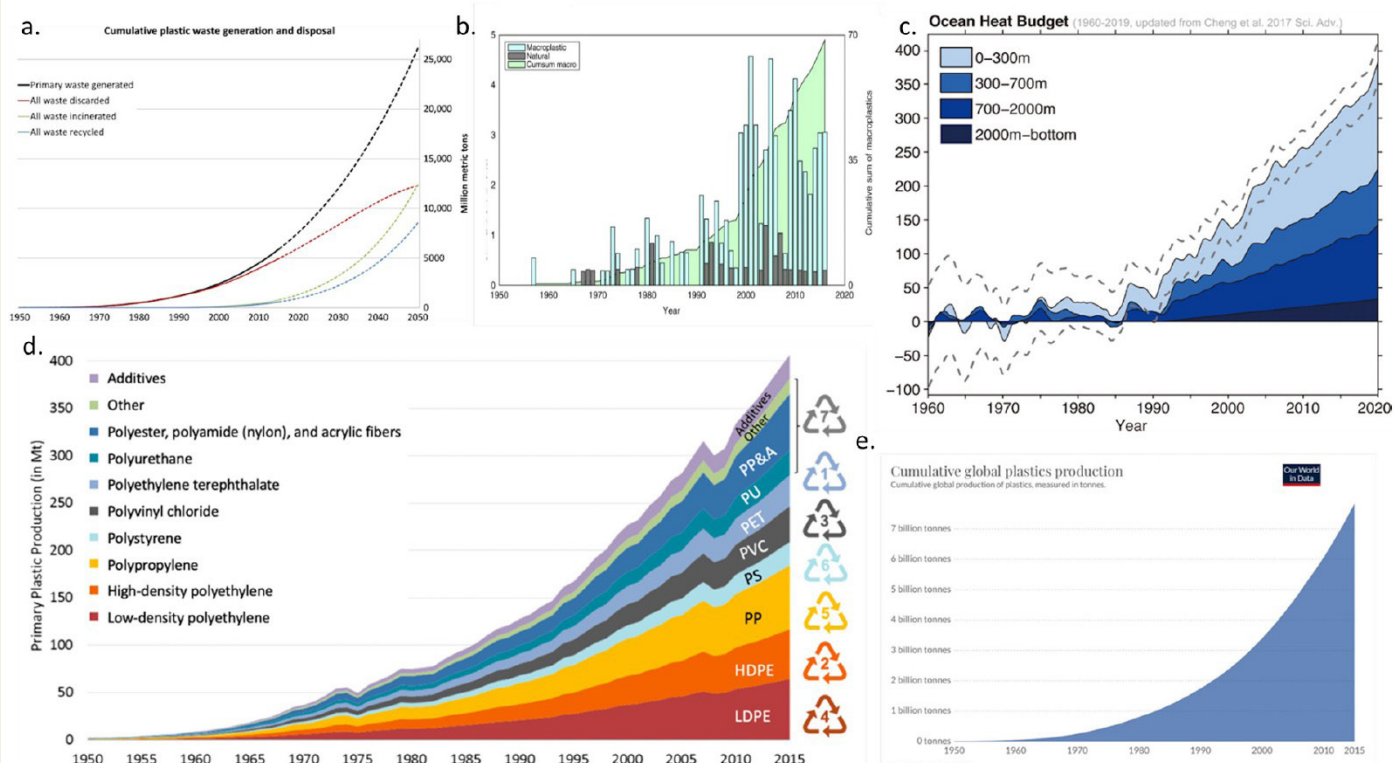
8. ábra.

A 3,0-nál nagyobb erősségű mélyfókuszú földrengések számának ábrázolása évenként és mélységenként.
Adatbázis: ISC.

A mélyfókuszú földrengések számának növekedése a magból felmelegedő köpeny olvadására utal. A köpenyben lévő olvadt magma a centrifugális erők hatására meredeken emelkedni kezd a földfelszín felé, a szokásosnál jobban erodálva és belülről melegítve a litoszférát. A magma emelkedése okozza a geotermikus áramlás növekedését a belsejéből, a Nyugat-Antarktis, Közép-Grönland gleccserei alatti köpenycsókák aktiválódását, ami felgyorsítja a gleccserek és a permafroszt alulról felfelé történő olvadását.

Az óceán most melegebb, mint valaha, ami nagymértékben felerősíti a szélsőséges természeti eseményeket: árvizeket, hurrikánokat és trópusi ciklonokat. Az óceán kulcsszerepet játszik a

bolygó hőszabályozásában, mivel képes elnyelni és újraelosztani a felesleges hőt, megelőzve ezzel a katasztrofális következményeket. Most azonban, hogy a Föld felmelegedése a csillagászati ciklusok okozta geodinamikai aktivitás következtében fokozódik, az óceán elvesztette a hőelvonó funkcióját a bolygó belsejéből. Ez az óceán antropogén eredetű szennyezése miatt történt. A műanyag hulladék mikro- és nanoplasztikává bomlik, csökkentve a víz hővezető képességét (9. ábra).



9. ábra.

Az óceánok hőmérséklete változásának grafikonja 1960-2019 között, összehasonlítva a szintetikus polimerek gyártásának növekedését, a különböző iparágakban való felhasználást és az óceánba kerülő műanyag hulladék (különböző forrásokból származó) elhelyezését bemutató grafikonokkal.

(a) A termelt és felhasznált műanyag hulladék teljes mennyisége

Forrás: Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). A valaha gyártott összes műanyag előállítása, felhasználása és sorsa. *Science Advances*, 3(7).
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

(b) Az óceánban lévő összes makroműanyag és az éves összesített mennyiségek.

Forrás: Ostle, C., Thompson, R. C., Broughton, D., Gregory, L., Wootton, M., & Johns, D. G. (2019). Az óceáni műanyagok növekedése egy 60 éves időszor alapján. *Nature Communications*, 10(1622).
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1>

(c) Az óceánok hőmérsékletének globális változása 1960-2019 között (Purkey és Johnson, 2010; frissítve Cheng és mtsai, 2017 alapján).

Forrás: 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). Rekordot döntő óceáni melegedés folytatódott 2019-ben. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 137–142.
<https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

(d) Globális elsődleges műanyagtermelés típusonként

Forrás: Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). A valaha gyártott összes műanyag előállítása, felhasználása és sorsa. *Science Advances*, 3(7).
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

(e) Az 1950 óta előállított műanyag kumulatív mennyisége

Adatforrás: Plastic Marine Pollution Global Dataset (A műanyag okozta tengerszennyezés globális adatkészlete).

A vízhőmérséklet emelkedése nemcsak a felszínen, hanem a teljes vízoszlopban és az óceánfenéken is megfigyelhető. Az óceánok felmelegedését a felszálló magma okozza, amely különösen az óceáni kérget melegíti, amely vékonyabb és sérülékenyebb, mint a kontinentális kéreg.

A geológiai és jégmag-vizsgálatokból származó történelmi bizonyítékok arra utalnak, hogy a Föld 12 000 évente átélt ilyen katasztrofális ciklusokat. És 24 000 évente¹⁰ a bolygókatasztrófák sokszor erősebbek voltak, amint azt a jégmagokban¹¹ lévő vulkánkitörések hamurétegeinek vizsgálata (10. ábra) és más geokronológiai vizsgálatok bizonyítják. Ebbe a ciklusba lépett be most a Föld. A jelenlegi ciklust azonban olyan antropogén tényezők súlyosbítják, mint az óceánok szennyezése, amely tovább rontotta az óceánnak a Föld energiaegyensúlyát szabályozó funkcióját.

Ahogy az óceán felmelegszik, a műanyag hulladék mikro- és nanoplasztikává bomlik, ami tovább csökkenti az óceán hővezető képességét. A hővezető képesség csökkenése kritikus a csillagászati ciklusok által okozott fokozott geodinamikai aktivitás időszakában.

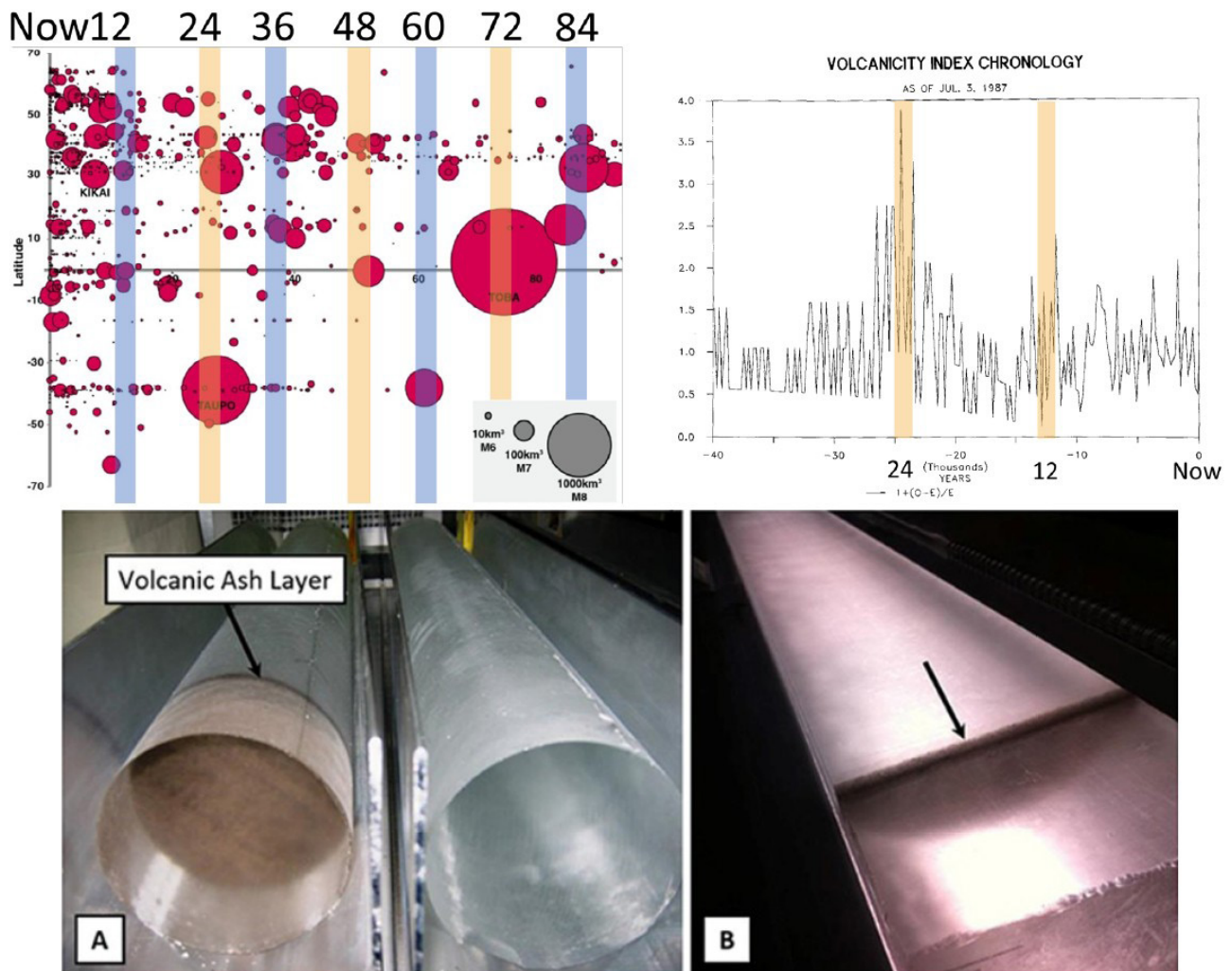
A Föld belsejében felhalmozódó többletenergia a mélyfókuszú földrengések számának növekedéséhez és új magmaközpontok gyors kialakulásához vezetett, ami tovább fokozza a bolygó instabilitását. Ez a zárt körforgás felgyorsítja a bolygó felmelegedését és destabilizálódását, közelebb hozva a Földet a közelgő pusztuláshoz.

A matematikai modellezés azt mutatja, hogy a világ gazdasági és társadalmi rendszerei a következő 4-6 évben összeomolhatnak az éghajlati katasztrófák okozta növekvő károk miatt. A katasztrófaesemények exponenciális növekedése azzal fenyeget, hogy a Föld a következő évtizedben lakhatatlanná válik (11. ábra). A korábbi ciklusokkal ellentétben a bolygó jelenlegi állapotát az ember okozta szennyezés súlyosbítja, így kevés remény marad az ökoszisztémák és maga a Föld bolygó túlélésére. **Fontos felismerni, hogy a szennyezés és az óceánok felmelegedése okozta probléma megoldása lelassíthatja a kataklizmák kialakulását, de nem fogja megállítani azokat.**

¹⁰Arushanov, M.L. (2023) Climate Dynamics. Kozmikus tényezők. Hamburg: LAMBERT Academic Publishing.

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

Katasztrofális vulkánkitörések 12 000 éves ciklusban



10. ábra.

Az elmúlt 100 000 év vulkánkitöréseiből származó hamurétegek vizsgálatának adatai antarktisi és sarkvidéki jégmagokban, különböző szerzők cikkeiből.

Forrás: Brown, S. K., Croweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N., Cottrell, E., Deligne, N., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). A negyedidőszaki kitörési rekordok jellemzése: elemzés a Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) adatbázis elemzése. *Journal of Applied Volcanology*, 3(5).

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

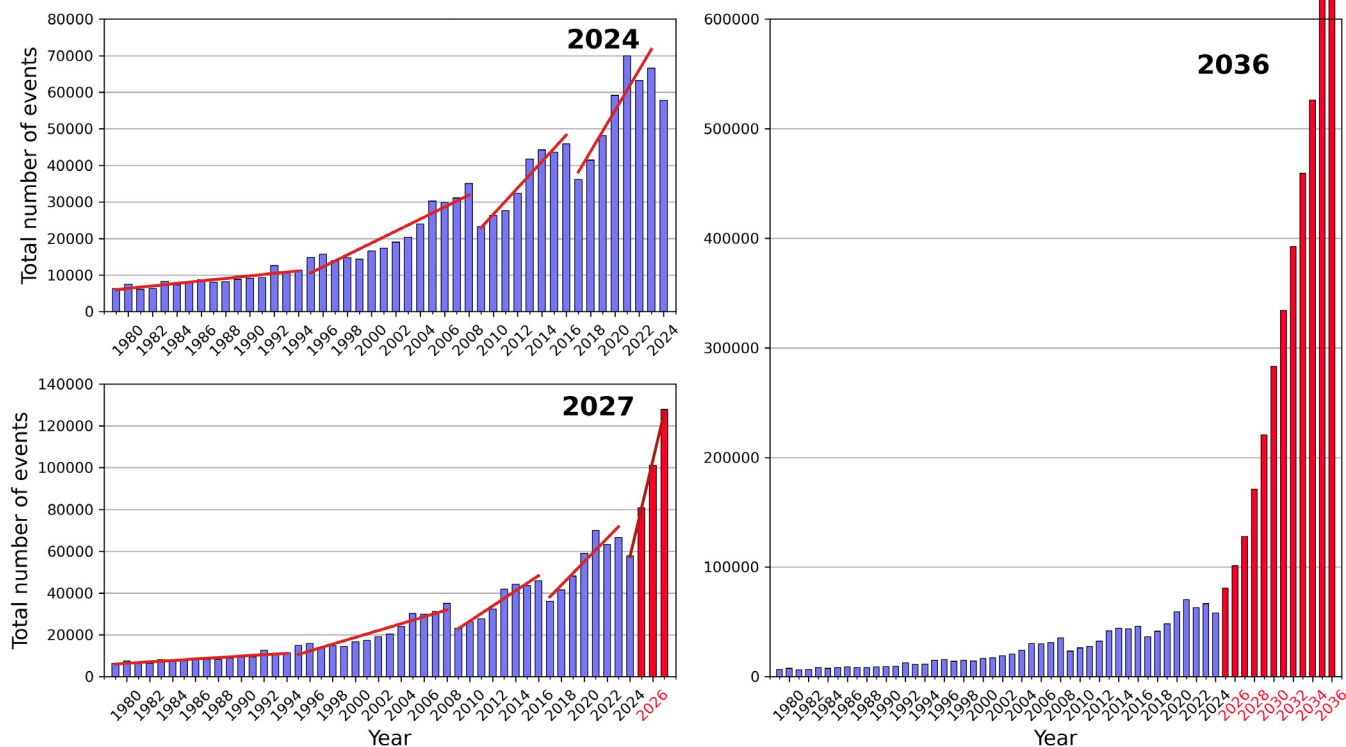
Bryson, R. A. (1989). A késő negyedidőszaki vulkáni aktivitás hatása a Milanković-féle klímakényszerre. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125. <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

A grafikonok 12 000 évenként katasztrofális vulkáni tevékenységet és 24 000 évenként még súlyosabb vulkáni tevékenységet szemléltetnek (figyelembe véve a kormeghatározások hibáját). Az ilyen katasztrofális események szélsőséges hőmérséklet-változásokat, természeti katasztrófákat, vulkanikus teleket és fajok tömeges kihalását eredményezték. Számos szupervulkán, amely a múltbeli ciklusokban tört ki, ma már rendellenes aktivitást mutat, különösen 1995 óta.

A fokozódó katasztrófák előrehaladása földrengésekkel illusztrálva

M3+ Earthquakes Globally 1979-2024

volcanodiscovery.com



11. ábra.

A természeti katasztrófák számának exponenciális növekedési modellje a földrengések példáján 2036-ig.

A grafikonok a földrengések gyakoriságának és erősségének geometriai fejlődését mutatják világszerte a jelenlegi trendek alapján. Minden egyes egymást követő szakaszban a földrengések száma

megháromszorozódik. Az előrejelzések szerint 2028-ra a Földön naponta 1000 3,0-nál erősebb földrengés fog bekövetkezni, szemben a jelenlegi napi 125 ilyen földrengéses átlaggal.

Nagyon valószínű, hogy hat éven belül a Földön naponta olyan pusztító erejű földrengések lesznek, mint a 2023. február 6-i törökországi és szíriai földrengés.

Ez a jelentés a külső energia beáramlásából eredő, a Föld magjában bekövetkező változások által jelentett további fenyegetéssel foglalkozik. 1997-1998-ban a tudósok a Föld Tömegkutató Központjának műholdas adatait felhasználva példátlan jelenséget figyeltek meg - a bolygó belső magjának hirtelen elmozdulását. Ennek eredményeként a mag észak felé vándorolt egy Nyugat-Antarktiszról Kelet-Szibériába és az Orosz Föderáció Taimyr-félszigetére vezető pályán. Ez a mageltolódás a magma ellenőrizetlen felemelkedését okozta ebben az irányban, ami egy hatalmas köpenycsóva gyors emelkedéséhez vezetett Szibéria alatt.

Jelenleg a szibériai köpenycsóva már elérte a földkéreg alját a Kelet-szibériai kráter északi régiójában, és megkezdte a lemez kiemelését. Ez azt jelzi, hogy az olvadt magma elkezdett a felszín felé égetni. A szibériai

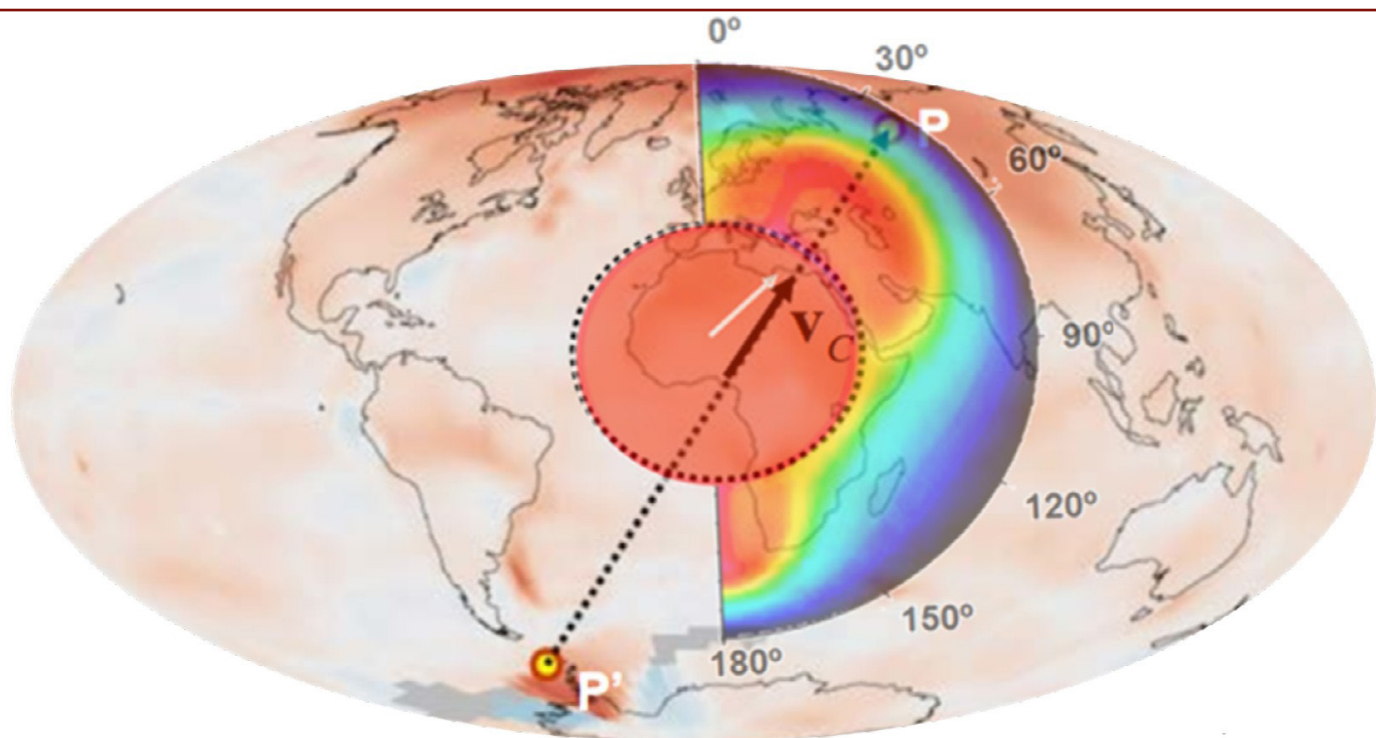
fúvóka ellenőrizetlen kitörése globális kihalást eredményezhet, és az emberiségnek esélye sem marad a túlélésre. Számítások szerint egy ilyen kitörés 1000-szer erősebb lenne, mint a Yellowstone szupervulkán legjelentősebb kitörése. A szibériai köpenycsóva hasonló kitörése 250 millió évvel ezelőtt történt, ami a Nagy Permi Kihalást okozta.

Ez a jelentés három lehetséges forgatókönyvet vázol fel ennek a helyzetnek a kialakulására, és lépéseket javasol az emelkedő szibériai köpenycsóva kezelésére és az ellenőrizetlen kitörés kockázatainak mérséklésére.

A Föld magjának elmozdulása Szibéria irányába 1998-ban

1997-1998-ban a tudósok a Föld tömegközéppontjának műholdas vizsgálatával páratlan jelenséget regisztráltak - a Föld belső magjának elmozdulását.^{12,13} Ennek

eredményeként a bolygó magja észak felé tolódott, a Nyugat-Antarktistól a Kelet-Szibéria északi részén található Taimyr-félszigetig húzódó vonal mentén (12. ábra).



12. ábra.

A mag elmozdulása 1997-1998-ban és a magmában a mag elmozdulása által okozott hőhullámok. (Barkin, Yu. V.)

A térkép a belső mag elmozdulási vektorát ábrázolja a Nyugat-Antarktiszról Kelet-Szibériába, a Taimyr-félsziget felé. A séma a légköri hőanomáliák térképére van ráterítve. A földmag és a földköpeny relatív elmozdulásainak és rezgéseinek geofizikai következményei.

Előadta: Yu.V. Barkin, Moszkva, IFZ, OMTS. 2014. szeptember 16.

¹² Barkin, Yu. V. (2011). A természetes bolygói folyamatok aktivitásának szinkronikus ugrása 1997-1998-ban és egységesített mechanizmusuk. In *Geology of Seas and Oceans: Proceedings of the XIX International Scientific Conference on Marine Geology* (Vol. 5, pp. 28-32). GEOS.

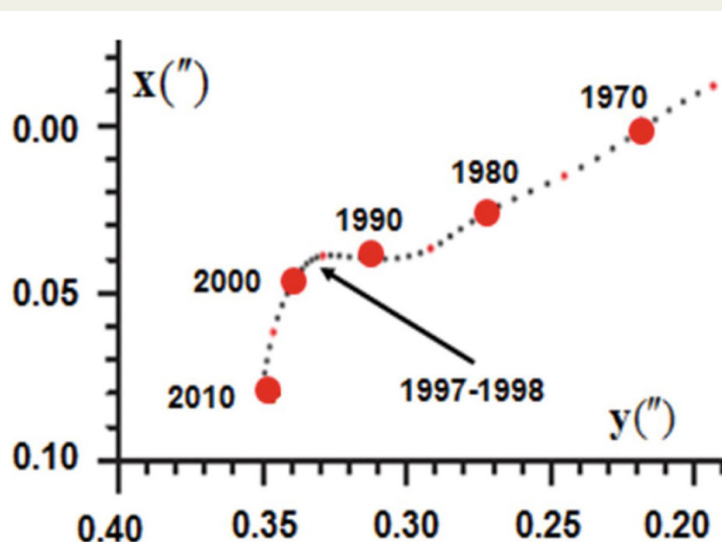
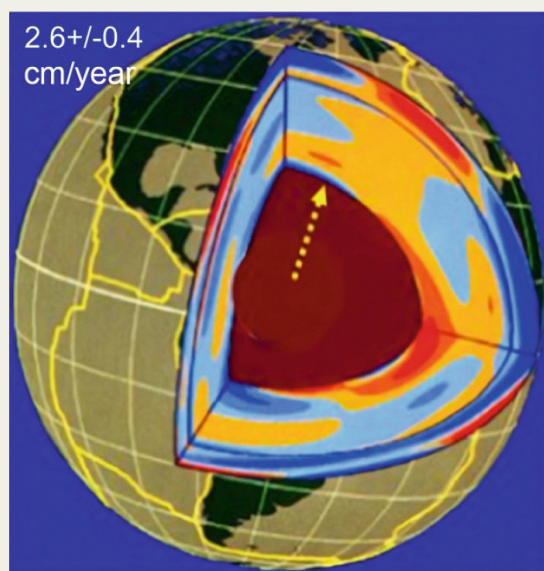
¹³ Smolkov, G. Ya. (2018). A Naprendszer és a Föld külső hatásoknak való kitettsége. *Physics & Astronomy International Journal*, 2(4), 310-321. <https://doi.org/10.15406/paij.2018.02.00104>

Ugyanekkor négy különböző tudományos csoport, egymástól függetlenül, rendellenes változásokat regisztrált a Föld különböző geofizikai paramétereiben. Műholdas adatok alapján a Lomonoszov Moszkvai Állami Egyetem és az Orosz Tudományos Akadémia Földfizikai Intézetének szerzőcsoportja 1998-ban ugrást állapított meg a Föld tömegközéppontjában¹⁴ (13. ábra).

A Föld Forgási Szolgálat (IERS) a bolygó forgásának erőteljes felgyorsulását regisztrálta. Ugyanebben az időben az olaszországi Medicina állomáson a tudósok a gravitáció hirtelen eltolódását regisztrálták.¹⁵ Ezzel egyidejűleg

a Föld alakjának éles változását¹⁶ figyelték meg, amelyet az amerikai műholdak lézeres távolságmérő rendszerével regisztráltak.

A fizikai és matematikai tudományok doktora, Jurij Barkin professzor, a műszaki tudományok doktora, Gennadi Szmolkov professzor,¹⁷ a földrajzi tudományok doktora, Mihail Arusanov professzor,¹⁸ az Orosz Tudományos Akadémia akadémikusa és a Lomonoszov Moszkvai Állami Egyetem tiszteletbeli professzora, a geológiai és ásványtani tudományok doktora, Viktor Khain,¹⁹ és sok más kutató szerint a mag elmozdulása a Föld összes kérgének változását eredményezte.



13. ábra.

A Föld belső szerkezete; a Föld tömegközéppontjának szekuláris elmozdulásának iránya és a pólus mozgásának pályája a Föld felszínén 1990–2010 között, közel 90 fokos elfordulással 1997–1998-ban a Tajmir-félsziget irányába.

Forrás: Smolkov, G.Ya. (2020). Heliogeofizikai Kutatás. 25. szám, 14–29. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569>

Adatforrás: 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) „A földi klímaváltozás okai a kozmikus hatás következtében, az antropogén globális felmelegedés mítoszána eloszlatása”, Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft, 53, pp. 4-14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979>

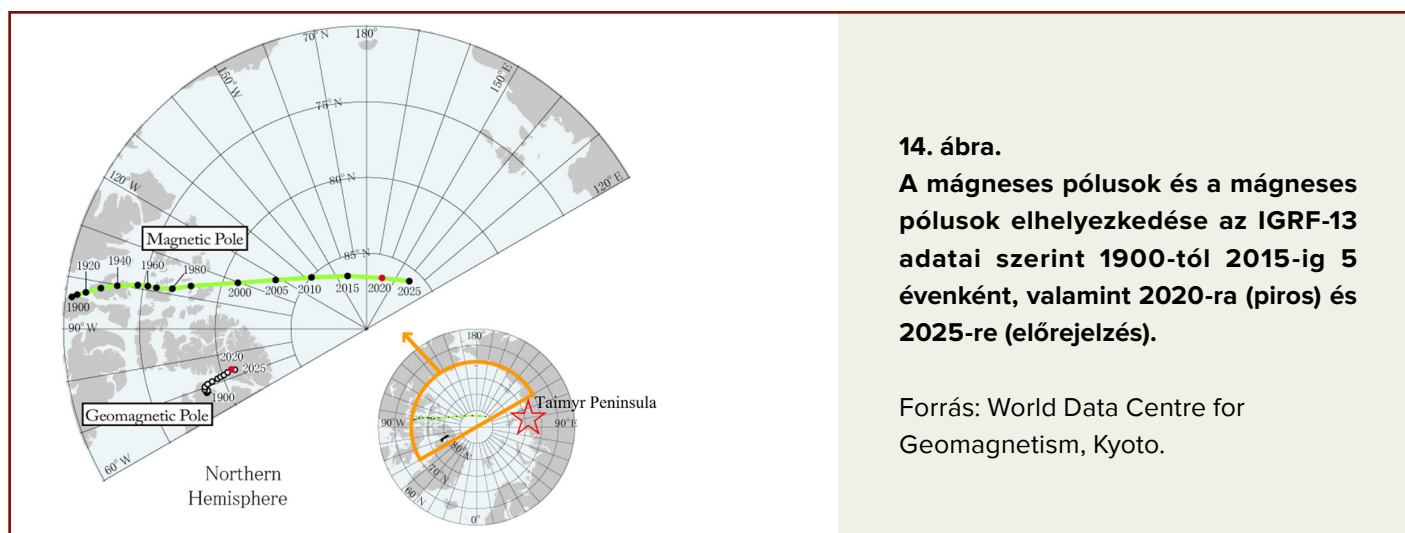
¹⁹ „Közlemény és az IC GCGE GEOCHANGE első jelentése: „Globális környezeti változások: veszély a civilizáció fejlődésére” (2010) 1. kötet. London. ISSN 2218-5798.

Fontos megjegyezni, hogy ez az irány egybeesik az északi mágneses pólus hirtelen eltolódásával, amely 1995-ben kezdődött. A múlt század eleje óta a pólus átlagosan 10 km/év (6,2 mérföld/év) sebességgel mozgott, majd hirtelen 57 km/év maximumra növelte sebességét, és megváltoztatta pályáját, Szibéria és a Taimyr-félsziget felé tartva²⁰ (3. ábra, 14. ábra).

Ez azt jelzi, hogy a Föld külső folyékony magjának cseppfolyósodása miatt már 1995-ben elkezdtek kialakulni a Taimyr-félsziget felé történő mageltolódás feltételei. 2013-ban a Leedsi Egyetem tudósai megállapították, hogy a mágneses mezőben bekövetkezett változások a Föld külső magjában lévő folyékony vas²¹ áramlásának felgyorsulása miatt kezdődtek (15. ábra), ami valószínűleg 1995-ben kezdődött.

A szakirodalom szerint összefüggést találtak a mágneses mező inverzióinak gyakorisága és

a köpeny magmatizmus intenzitása között.^{22,23,24} Ismert, hogy a mágneses mező inverziók valószínűleg a külső magban, a mag-köpeny határ közelében zajló folyamatokhoz kapcsolódnak.²⁵ A köpeny magmatizmus intenzitásának változása és a földi mágneses tér inverzióinak gyakorisága közötti összefüggés azt jelzi, hogy a földi mágneses tér perturbációi a külső magban a mag-köpeny határon elhelyezkedő fúvókák talpán zajló hőátadás intenzitásának változásai miatt keletkeznek. A köpenycsók teljes hőteljesítményének növekedése új köpenycsók magképződésének és a már aktív köpenycsók hőteljesítményének növekedésének egyaránt köszönhető. Feltételezhető, hogy a külső magban és a köpenyben geodinamikai perturbációk következnek be a köpenycsók magképződésének és felszíni kiáramlásának időszakában.²⁶



²⁰Djacsenko A.I. A Föld mágneses pólusai. // M.: MCNMO, 2003. 48 c.

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>

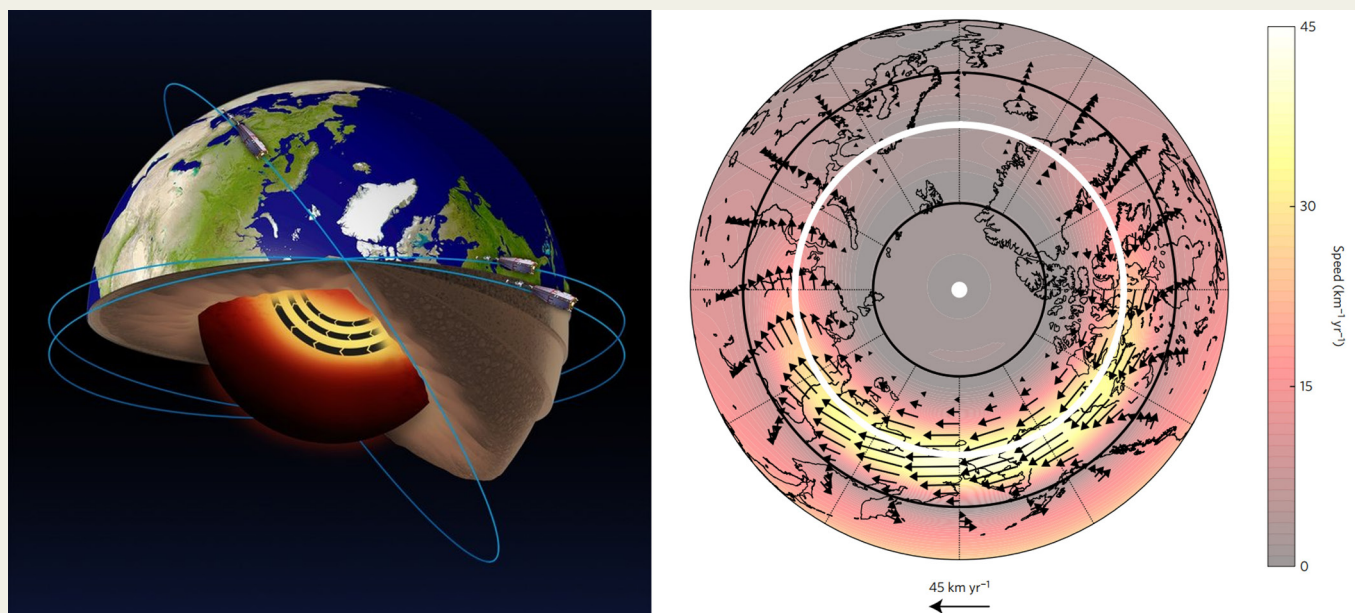
²²Alain Mazaud, Carlo Laj, The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 107, Issues 3–4, 1991, Pages 689–696, ISSN 012-821X, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90111-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T)

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. ábra.

Az ESA Swarm műhold adatainak elemzése kimutatta, hogy a Föld magjának folyékony vasból álló részében, 3000 kilométer mélyen a felszín alatt egy sugár jelen van, és hogy ez a sugár egyre gyorsul

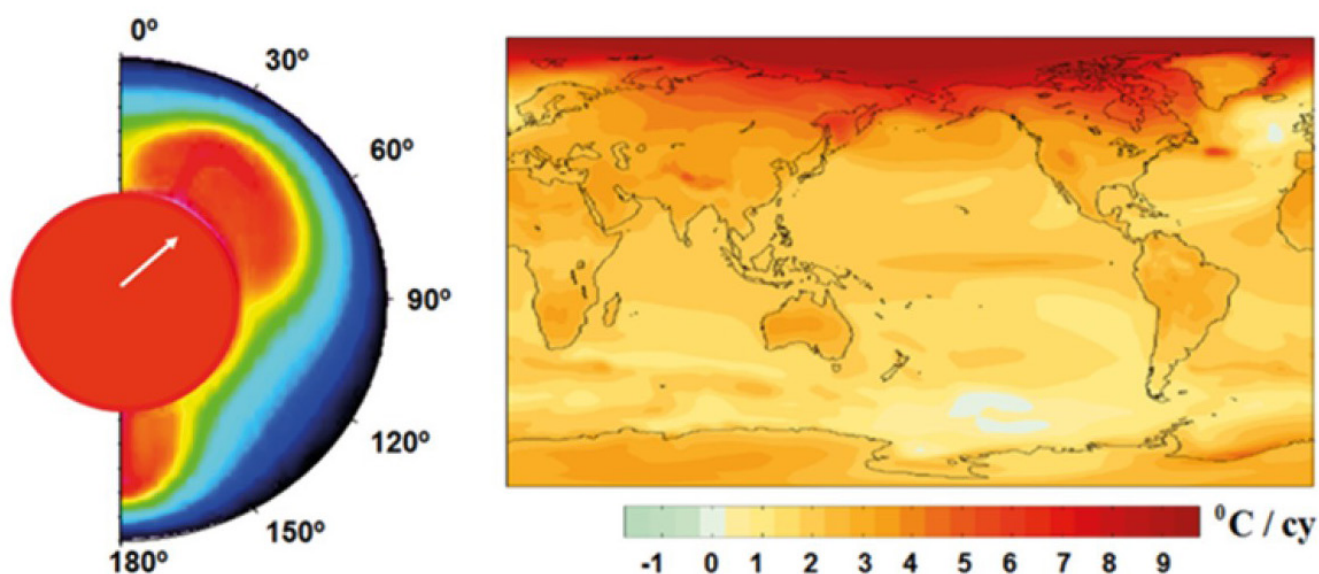
Forrás: ESA

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>

Így az északi mágneses pólusnak a Taymyr-félsziget felé történő modernkori sodródása további bizonyíték lehet, amely a Föld külső folyékony magjában bekövetkezett változásokra és a szilánkoknak a Szibéria közelében lévő mag-köpeny határról való éles felemelkedésére utal.

A Föld magját 1995-ben érő külső kozmikus hatás következtében tehát megkezdődött a belső mag felmelegedése és a külső mag olvadása, aminek következtében az északi mágneses pólus sodródása erőteljesen felgyorsult. A külső mag cseppfolyósodása

volt az az állapot, amely 1997-1998-ban a mag Szibéria, a Taymyr-félsziget felé történő elmozdulását okozta. A tudományok doktora, Yu. V. Barkin professzor által felállított hipotézis szerint a mag eltolódása aszimmetrikus hőellátást okozott Szibéria irányába (16. ábra). Fontos megjegyezni, hogy a köpenyben a hőátadás elsősorban a konvektív keveredésnek köszönhető. Vagyis kijelenthetjük, hogy a magugrás először is a magma emelkedését okozta Szibéria irányába. Ezt követően Szibéria e régiójában a légkör anomális felmelegedése kezdett megfigyelhetővé válni, és ez a felmelegedés évről évre növekszik.



16. ábra.

A mag és a köpeny erőltetett relatív mozgása és a felső köpeny aszimmetrikus hőellátásának sémája (balra). A felszíni felmelegedés lineáris trendjei (°C-ban évszázadonként), az NCAR CCSM3 adataiból átlagolva egy speciális forgatókönyv szerint http://www.realclimate.org/bitz_fig3.png (jobbra).

Forrás: Barkin Yu. V. Ciklikus inverziós klímaváltozások a Föld északi és déli féltekéjén // Geology of Seas and Oceans: Proceedings of the XVIII International Scientific Conference (School) on Marine Geology. VOL.III. - MOSZKVA: GEOS. 2009. C. 4-8.

Szibéria és a Szibériai Sarkvidék 3-4-szer gyorsabban melegszik, mint a világ többi része.

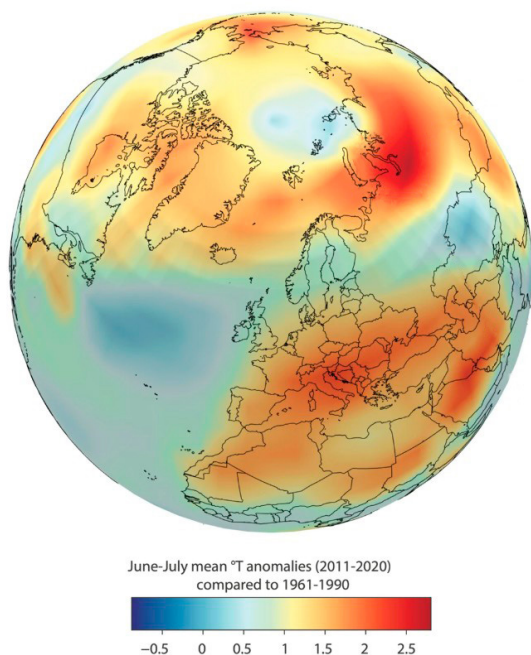
Különböző szervezetek szerint Oroszország területén, különösen az Északi-sarkvidéken rendkívüli felmelegedés tapasztalható.

A Kormányközi Éghajlat-változási Testület (IPCC) tudósainak 2021-re vonatkozó adatai szerint Oroszország 3szor gyorsabban melegszik, mint a világ többi része, sarkvidéki és szibériai régiói pedig 4-szer gyorsabban melegednek, mint a világátlag.

Igor Shumakov, a Roszhydromet vezetője a Meteorológiai Világszervezet adataira hivatkozva 2022-ben azt mondta²⁷, hogy Oroszország területe 2,5-szer gyorsabban melegszik, mint a bolygó többi része, és az ország északi sarkvidékének hőmérséklete emelkedik a leggyorsabban, különösen az

utóbbi évtizedekben. Szibéria a világon a legerősebben melegedő régiók közé tartozik (17. ábra), amire az elmúlt 7000 évben nem volt példa a fák évgyűrűinek vizsgálatából rekonstruált éghajlati viszonyok alapján.²⁸

Az amerikai székhelyű Woodwell Klímakutató Központ (WCRC)²⁹ nagyszabású tanulmányt végzett annak felmérésére, hogy az éghajlatváltozás hogyan hatott a hőmérsékletre, a talajnedvességre, a hótakaró vastagságára, a csapadékmennyiségre és más kritikus éghajlati paraméterekre az Északi-sarkvidék különböző régióiban. Ehhez a tudósok kombinálták és rendszerezték a műholdak, repülőgépek, drónok és földi meteorológiai állomások által az elmúlt 40 évben gyűjtött adatokat.



17. ábra.

Június-júliusi átlagos hőmérsékleti anomáliák az északi féltekén (Jamal-félsziget és Taimyr-félsziget) a megfigyelések utolsó évtizedében (2011-2020). A hőmérsékleteket a HadCRUT.5 adatkészlet segítségével az 1961-1990-es alapklimához viszonyított anomáliákként fejezzük ki.

Forrás: 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) „Oroszország területe 2,5-szer gyorsabban melegszik, mint a bolygó többi része” [Elektronikus forrás]. Elérhető: <https://tass.ru/obschestvo/16009287> (A hivatkozás dátuma: 2024.12.31.).

²⁸Hantemirov, R. M., Corona, C., Guillet, S., et al. (2022). A jelenlegi szibériai felmelegedés példátlan az elmúlt hét évezredben. 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>

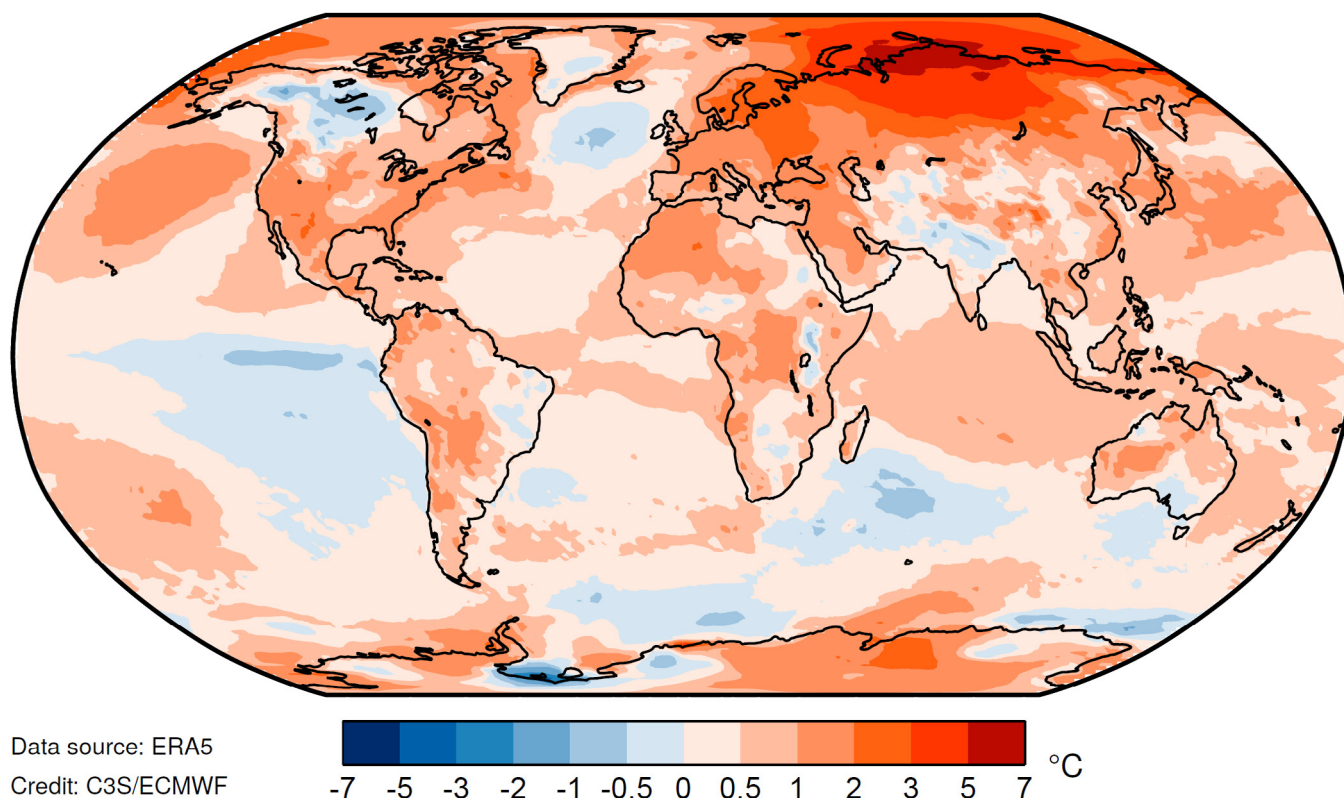
Ezen adatok utólagos elemzése lehetővé tette a kutatók számára, hogy mintegy két tucat éghajlati „forró pontot” azonosítsanak. A felmelegedés a legerősebben Kelet-Szibéria cirkumpoláris és központi régióit érintette, ahol az éves átlaghőmérséklet évtizedenként 1,1 Celsius-fokkal emelkedett, ami sokszorosa a globális felmelegedés mértékének. A Taymirben még gyorsabban emelkedett a hőmérséklet: évtizedenként 1,7 fokot. Hasonlóképpen, a szibériai tajga hőmérséklete az 1980-as évek vége óta évtizedenként 0,6 fokot emelkedett.

A szibériai hóhullámok az elmúlt években új, riasztó szintet értek el, különösen 2020-ban, amikor a hőmérséklet az egész régióban meredeken emelkedett (18. ábra).

Szibériában a hőmérséklet januártól júniusig több mint 5 °C-kal, júniusban pedig akár 10 °C-kal is az átlag felett volt (az 1981-2010-es szintekhez képest). Ez a rendkívül meleg időszak helyi melegrekordok túllépését eredményezte, többek között a verhojanszki meteorológiai állomáson, ahol június 20-án +38 °C-os abszolút rekordot mértek (19. ábra).

Az Orosz Meteorológiai Szolgálat közölte, hogy ez a mért hőmérséklet volt a valaha mért legmagasabb hőmérséklet az Északi-sarkkör felett.

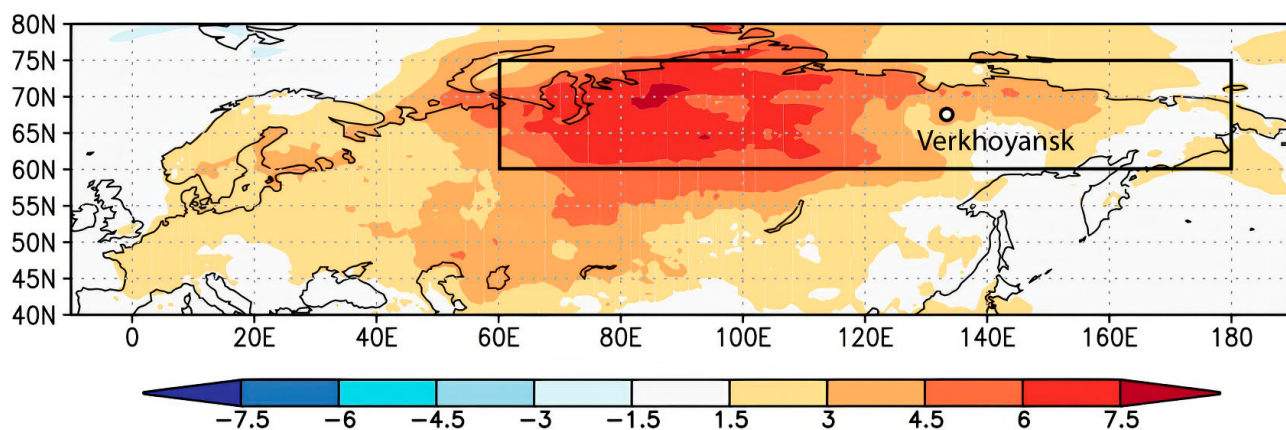
A felszíni levegő hőmérsékleti anomáliája 2020
Referencia-időszak: 1981-2010



18. ábra:

A hőmérsékleti értékek eltérése 2020-ban az 1981-2010-es átlagoktól.

Forrás: Copernicus Éghajlatváltozási Megfigyelőközpont a Középtávú Időjárás-előrejelzések Európai Központjánál (ECMWF).



19. ábra.

Elhúzódo szibériai hőhullám: a 2020. január-június átlaghőmérsékletek a normához képest (1981-2010) a szibériai régióban és Verkhoyansk városának helye, ahol júniusban az északi sarkkör fölött +38 °C-os napi rekordhőmérsékletet mértek.

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

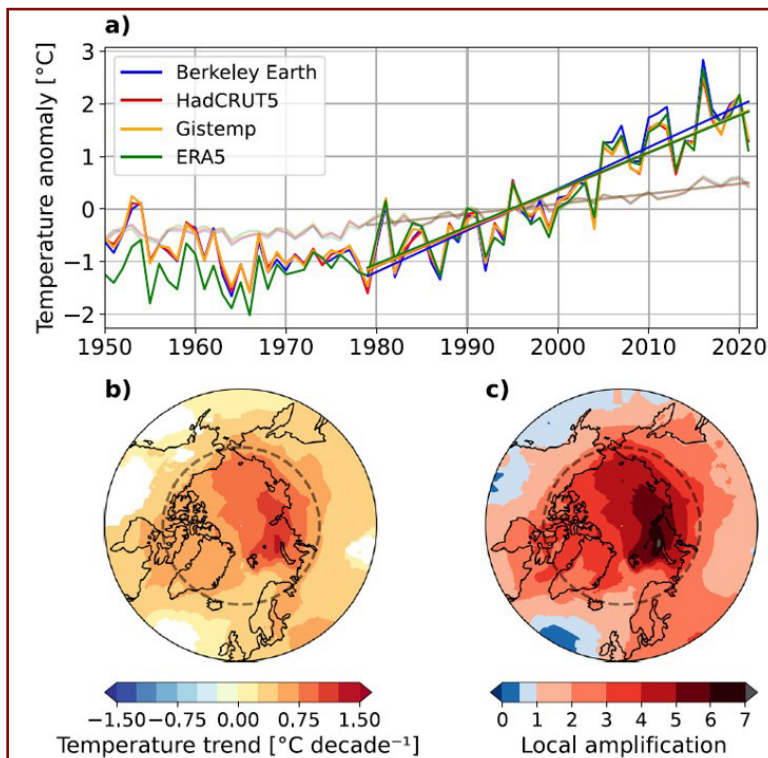
Ezek a hőhullámok nem állandóan Szibéria felett vannak, hanem pulzáló oszcillációk jellegét öltik magukra. Ez annak köszönhető, hogy az ezeket a hőhullámokat okozó magmaválások hullámzó jellegűek. A légkörben, ahol a légtömegek szabadon mozoghatnak és keveredhetnek, a hőhullámok néhány hónap után lecsenghetnek, ahogyan ez 2020-ban is történt, ellentétben a vízi körülmények között kialakuló hőhullámokkal.

A 2022-es tanulmány szerint a szibériai sarkvidék csaknem négyszer gyorsabban melegszik, mint a Földgolyó, ami nagyobb arány, mint amit korábban az éghajlati modellek figyelembe vettek, és ami a

tudósok³⁰ számára igen váratlan (20. ábra).

Fontos megjegyezni, hogy az Északi-sarkvidéknek ez a felmelegedése éppen a Taimyr-félsziget térségében következik be. Ez a szibériai vízterületen tapasztalható anomália azzal magyarázható, hogy az óceáni kéreg vékonyabb és gyorsabban vezeti a hőt, a víznek pedig nagyobb a hőkapacitása, mint a légkörnek. Ezért az óceáni víz az, amely intenzíven felhalmozza és visszatartja a hőt a felemelkedő köpenycsóból, annak ellenére, hogy a köpenycsóva a kontinentális kéreg alatt, a parttól relatív távolságban emelkedik.

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. ábra.

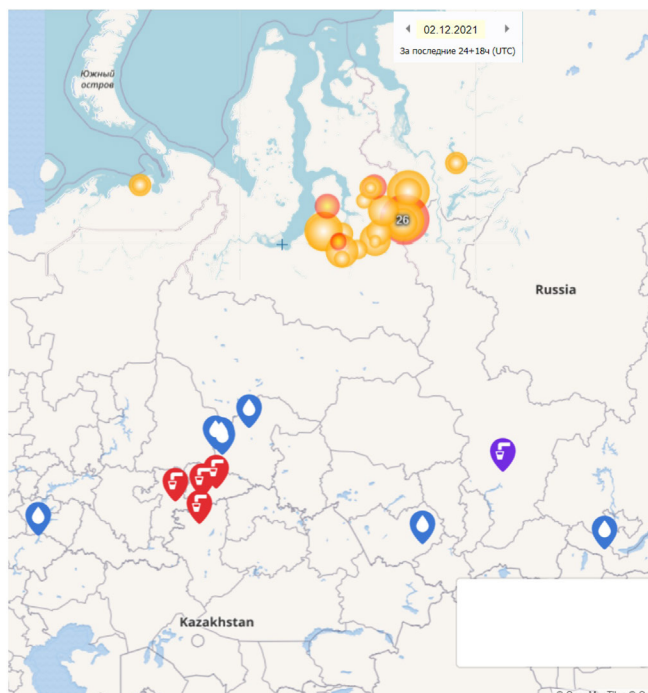
Az évi középhőmérséklet dinamikája az Északi-sarkvidéken. a) Az évi középhőmérséklet anomáliái az Északi-sarkvidéken (66,5°-90°N) (sötét színek) és globálisan (világos színek) az 1950-2021 közötti időszakra, különböző megfigyelési adatsorokból származtatva. A hőmérsékleti anomáliákat a 30 éves időszak (1981-2010) átlagértékeihez viszonyítva számították ki. A b) és c) pontozott vonal a sarkkört (66,5° ÉSZ) jelöli.

Forrás: Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). Az Északi-sarkvidék 1979 óta közel négyszer gyorsabban melegedett, mint a Föld. *Communications Earth & Environment*, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

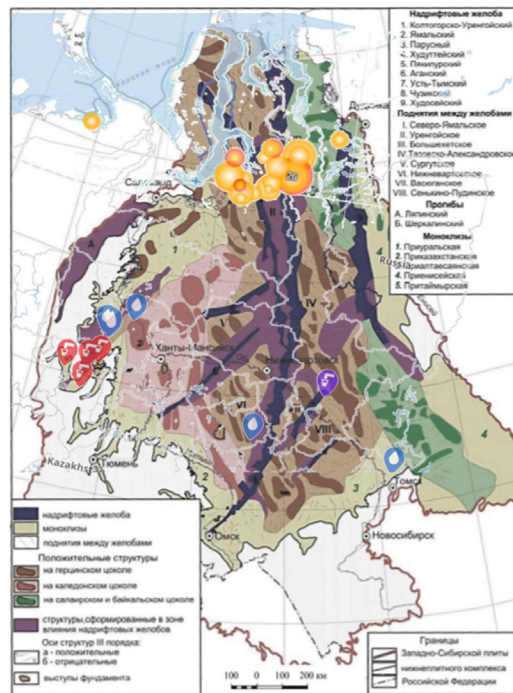
Közvetett bizonyítékok a szibériai köpenycsóva emelkedésére

A magmás központnak a Szibéria alatti földkéregbe való behatolása következtében nemcsak a légkör melegszik fel, hanem egy sor más anomália is bekövetkezik: a permafroszt alulról felfelé olvad, a térségben megnövekedett szeizmikus aktivitás, a felszínre emelkedő forró víz, amely kutak felforrását okozza, és példátlan erdőtüzek Szibéria-szerte, beleértve a hó alatt

is. A hó alatti tüzek maximális lokalizációja az elmúlt években a sarkvidéki Taimyr, Jamal és Gydan félszigetek déli részén vált nyilvánvalóvá. Fontos tényező, hogy a hó alatti tüzek („zombitüzek”) megnyilvánulásai - a víz forrása a kutakban - a mély törések zónái felett figyelhetők meg (21. ábra).



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. ábra.

Térkép a 2021-es téli hó alatti tüzek lokalizációjáról az északi sarkkör felett.



Fotók a hó alatti tüzekről a szverdlovski régióban.

Az északi szélességeken növekszik a felszín alatti metán- és hidrogénkibocsátás, nő a földgázrobbanásokból származó víznyelők száma, és az északi sarkvidéki talapzaton fokozódik az iszapvulkanizmus. Az alulról jövő felmelegedés a permafroszt lebomlását és a gázhidrátok pusztulását okozza, ami

gázkibocsátást, robbanáskrátereket és fokozott iszapvulkanizmust eredményez. A felszín alól felszabaduló gáz befolyásolja a légkör állapotát, további termikus, geokémiai és elektromágneses anomáliákat okozva. Tekintsük át ezeket a folyamatokat részletesebben.

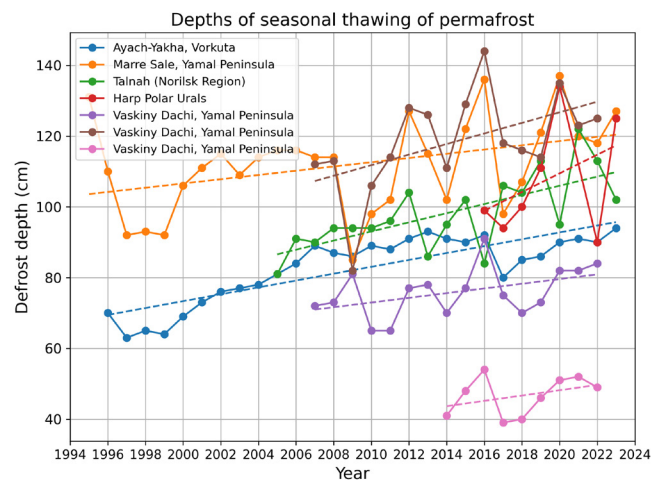
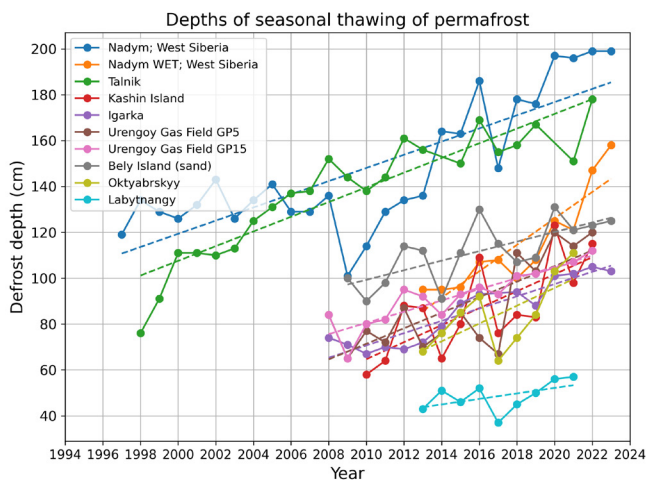
A permafroszt olvadása

A köpenyből érkező további geotermikus hő másik jelzője a permafroszt állapota. A jelentés szerzői elemezték a permafroszt szezonális oladási mélységére vonatkozó adatokat Oroszországban 1994 és 2023 között. Az adatbázist a cirkumpoláris aktív réteg és a felszínközeli permafroszt megfigyelésére irányuló nemzetközi program (CALM) keretében végzett mérések alapján állították össze, és a permafrost.su oldalon érhető el.

Oroszországban jelenleg 58 helyszínen végeznek szabványosított módszerekkel permafroszt-megfigyeléseket, és ezek közül 46 helyszínen több mint 10 éve folynak mérések,

ami lehetővé teszi a hosszú távú tendenciák meghatározását. Az adatsor elemzése lehetővé tette számunkra, hogy azonosítsuk azokat a helyszíneket, amelyeken az oladás mélysége folyamatosan növekszik, ami az övezet további felmelegedésére utal.

Az adatok két csoportját azonosítottuk: a 40 cm és 200 cm közötti mélységben az oladási mélység növekedésének egyértelműbb tendenciáját mutató helyszíneket (22. ábra, a) és a 40 cm és 140 cm közötti mélységben a permafroszt oladásának kevésbé intenzív ütemét mutató helyszíneket (22. ábra, b).



22. ábra.

A permafroszt szezonális oladási mélységének dinamikája különböző intenzitású régiókban: a) erőteljesebb oladási mélységnövekedéssel; b) kevésbé erőteljes oladási mélységnövekedéssel.

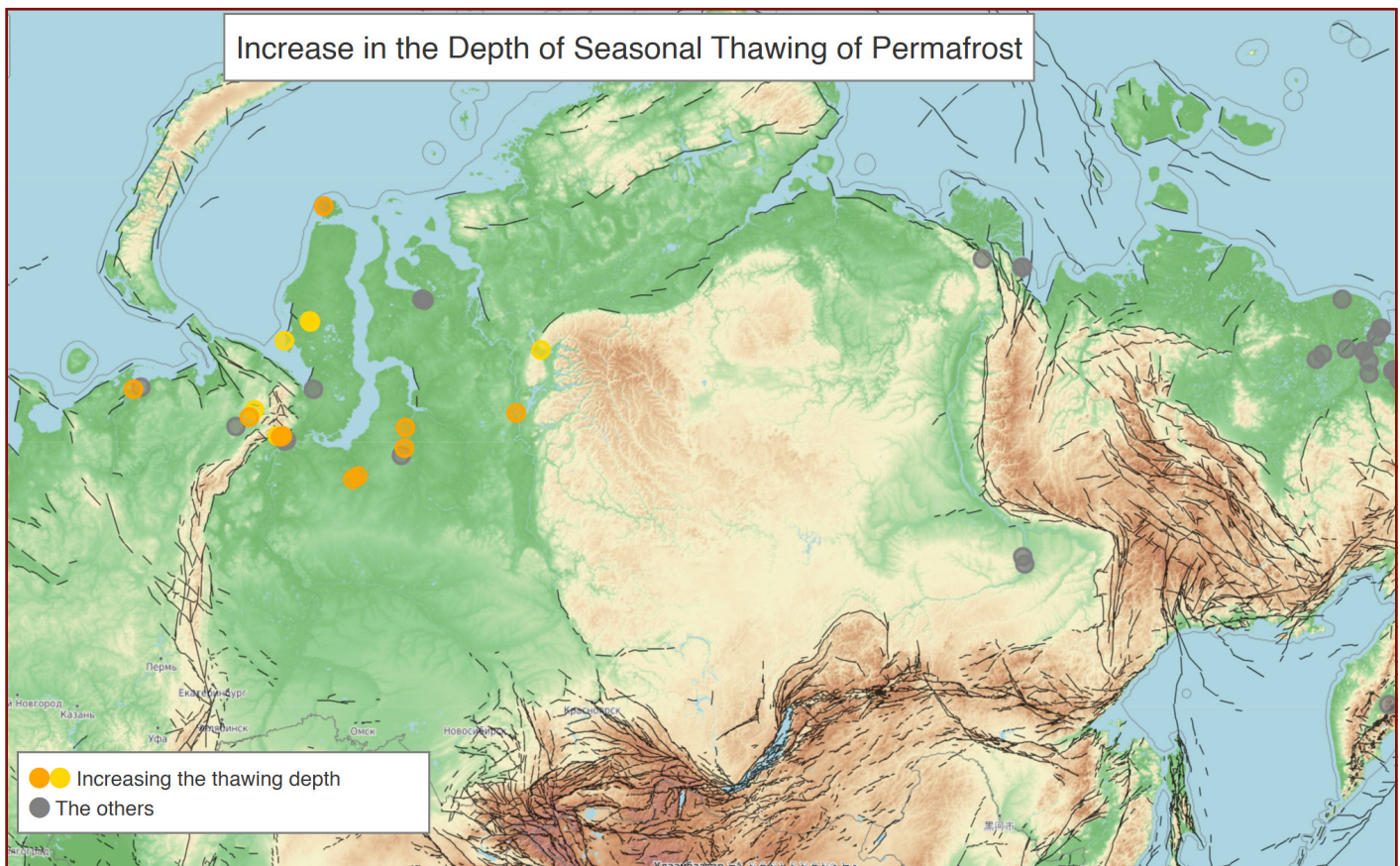
Adatforrás: <https://permafrost.su>

A méréseket a nemzetközi cirkumpoláris megfigyelési program (CALM) keretében végzik:

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

Az egyértelműség érdekében az összes felmért pontot narancssárga, illetve sárga színnel jelöltük (23. ábra). Fontos megjegyezni, hogy ezek a pontok főként egy bizonyos területen koncentrálnak: Nyugat-Szibéria északi részén, a Jamal-félszigeten, valamint a Gydan- és a Taimyr-félszigettől délre.

A maximális permafroszt-olvadás területeinek lokalizálása megfelel a köpenyben a szeizmikus hullámsebesség csökkenésének, a magmás köpenycsóvafej feltételezett terjedési zónájában. Ez viszont a talajhőmérséklet emelkedésének az oka, beleértve a fagyott rétegen belül is.



23. ábra.

A permafrosztréteg szezonális olvadási mélységének növekedési helyei. A pontok a mérési helyszíneket jelölik: szürke - olyan helyek, ahol a szezonális olvadás nem növekszik észrevehetően; sárga - olyan helyek, ahol az olvadás mélysége növekszik.

Adatforrás: <https://permafrost.su>

A méréseket a nemzetközi cirkumpoláris megfigyelési program (CALM) keretében végzik.

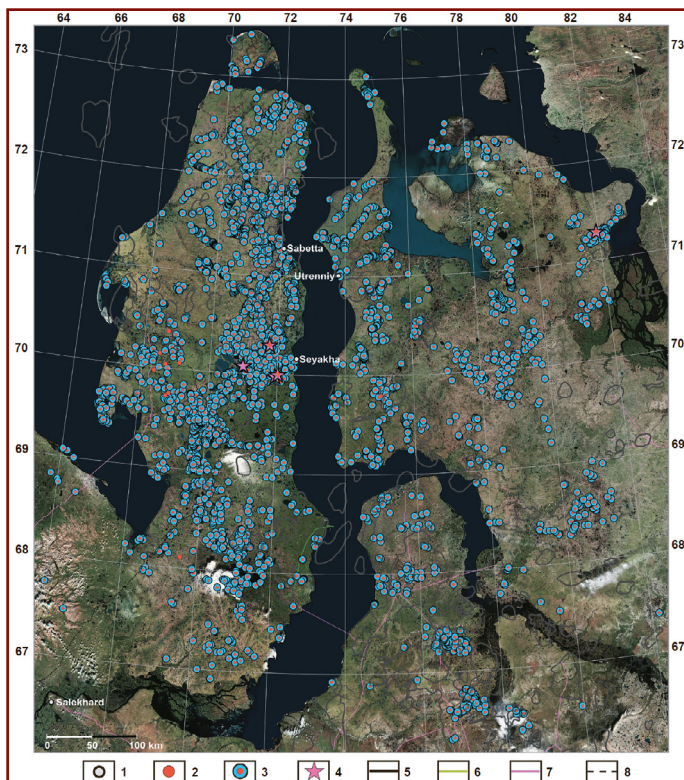
<https://www2.gwu.edu/~calm>

Az iszapvulkanizmus megnyilvánulásai

A felemelkedő magma további felmelegedése a permafrosztos kőzetek lebomlásához vezet, és hatással van az ezekben a talajokban megőrződött gázhidrátokra, nagy mennyiségű gáz szabadul fel belőlük. Ezenkívül gázvándorlás történik a gázlelőhelyekről és az erősen gázzal telített formációs vízből, ami csökkenti a talajok rugalmas tulajdonságait és kedvez az agyag cseppfolyósodásának, ami az iszapvulkanizmus lehetséges folyamataihoz vezet. Az iszapvulkanizmus a földkéreg repedésein keresztül, belső geostatikus nyomás hatására kitörő gáz, víz és klasztikus anyag keverékének

geológiai folyamata.

Az Orosz Tudományos Akadémia (RAS) tudósai éppen ilyen folyamatokat fedeztek fel a Jamal sarkvidéki félszigeten.³¹ A földi távérzékelési adatok felhasználásával végzett geológiai és geofizikai vizsgálatok eredményeként 2014 és 2022 között több mint 3000 erőteljes gázkibocsátású zónát azonosítottak, amelyekben kráterek keletkeztek a termokarszt tavak, folyók és a Kara-tenger part menti részének alján (24. ábra).



24.ábra.

Az erős gázkibocsátású zónák eloszlása Nyugat-Szibéria északi részén. Jelölések: 1 - települések, 2 - elszigetelt gázkibocsátási kráterek, 3 - gázkibocsátási kráterek víztestek alján, 4 - iszapvulkáni megnyilvánulások, 5 - olaj- és gázmezők körvonalai, 6 - olajvezetékek, 7 - gázvezetékek, 8 - vasút. A térkép alapja ESRI műholdképek mozaikja.

Forrás: Bogoyavlensky V. I., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V. Új adatok a sarkvidéki intenzív szárazföldi gázmentesítésről Nyugat-Szibéria északi részén: termokarszt tavak gázkibocsátási kráterekkel és iszapvulkánokkal.

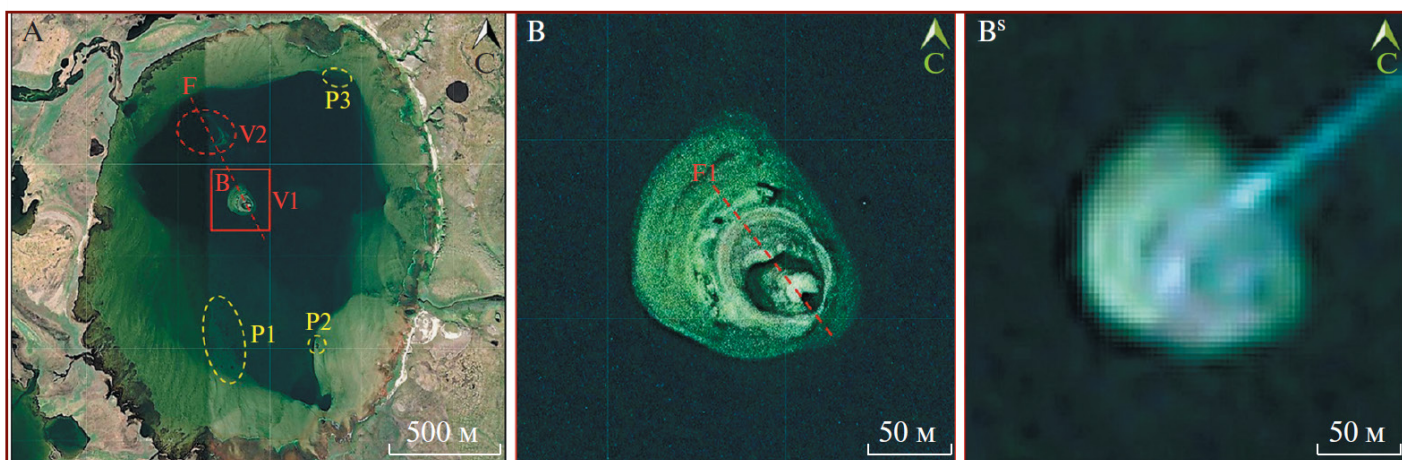
Sarkvidék: Ökológia és gazdaság 13, 353-368 (2023).
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

³¹ Bogoyavlensky, V.I., Nikonov, R.A. és Bogoyavlensky, I.V. (2023) „New data on intense land degassing in the Arctic in northern Western Siberia: thermokarst lakes with gas emission craters and mud volcanoes”, Arctic: Ecology and Economics, 13, pp. 353-368. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

2022-2023-ban a földi távérzékelési adatok először mutattak ki nagyméretű iszapvulkáni struktúrákat a Labvarto és Yambuto termokarszttavak alján, amelyek időszakosan aktív iszapvulkanizmust³² mutatnak (25. ábra). A termokarszt-tó olyan víztömeg, amely a permafroszt felolvadásának eredményeként alakul ki. Így nemcsak a tó felolvadása, hanem a mélyen a tó alatt lévő agyag cseppfolyósodása

is a felmelegedés mélyen fekvő forrására utal.

A tanulmány szerzői szerint ilyen nyilvánvaló iszapvulkanikus struktúrák a termokarszttavak alján korábban nem voltak ismertek az egész cirkumarktikus régióban.



25.ábra.

WorldView-2 műholdkép a Labvarto termokarszt-tóról (A) és annak kinagyított részlete (B), kiegészítve a Sentinel-2 műholdkép részleteivel (VS). Jelölések: P1, P2 és P3 - pockmarkok; V1 és V2 - iszapvulkánok; F és F1 - előre jelzett törések.

Forrás: Bogoyavlensky V.I. Új adatok a Jamal-félsziget sarkvidéki iszapvulkanizmusáról. Az Orosz Tudományos Akadémia jelentései. Földtudományok 512, 92-99 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

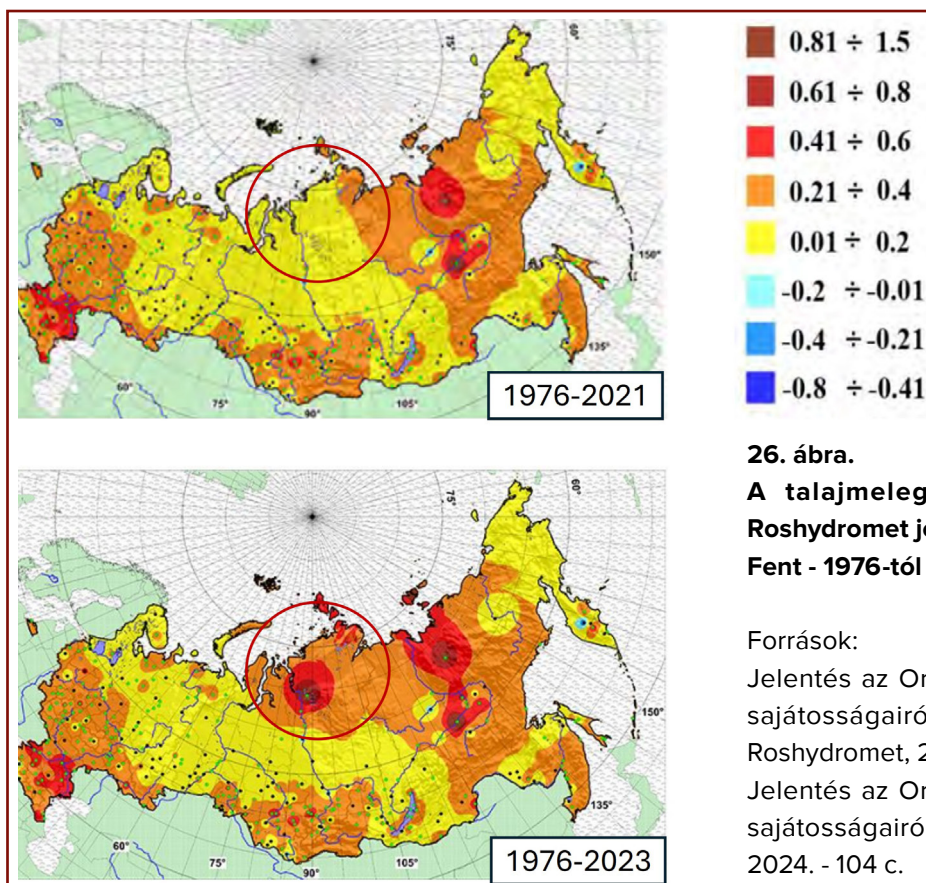
³² Bogoyavlensky, V.I. (2023) „Új adatok a Jamal-félsziget sarkvidéki iszapvulkanizmusáról”, Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences, 512, pp. 92-99. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

A talaj felmelegedése

A Roshydromet 2021-2023-as adatai alapján elemezték a talajhőmérsékleti térképeket 80, 160 és 320 cm mélységben. Az 1976-2021 és az 1976-2023 közötti időszakok hőmérsékleti trendjeinek összehasonlítása volt a leginformatívabb (26. ábra). A 2021 és 2023 közötti időszakban a trendtérkép egyértelmű anomáliát mutatott a Gydan- és Taymyr-félszigettől délre, amely területileg egybeesik a szibériai régió litoszférája alatt a szeizmikus tomográfiai

módszerekkel azonosított, a köpenyben csökkent szeizmikus hullámsebességű területtel.

Figyelembe véve a mérések jelentős mélységét (320 cm) és a megfigyelések széles lefedettségét (466 meteorológiai állomás Oroszországban), feltételezhető, hogy az észlelt hőmérsékleti anomália a geotermikus hő növekedéséhez kapcsolódik, amely a köpenycsőva emelkedésének köszönhető.



26. ábra.

A talajmelegedés tendenciáinak térképei a Roshydromet jelentései szerint.

Fent - 1976-tól 2021-ig, lent - 1976-2023 között.

Források:

Jelentés az Orosz Föderáció területének éghajlati sajátosságairól 2021-re vonatkozóan. - Moszkva: Roshydromet, 2022. - 110 c.

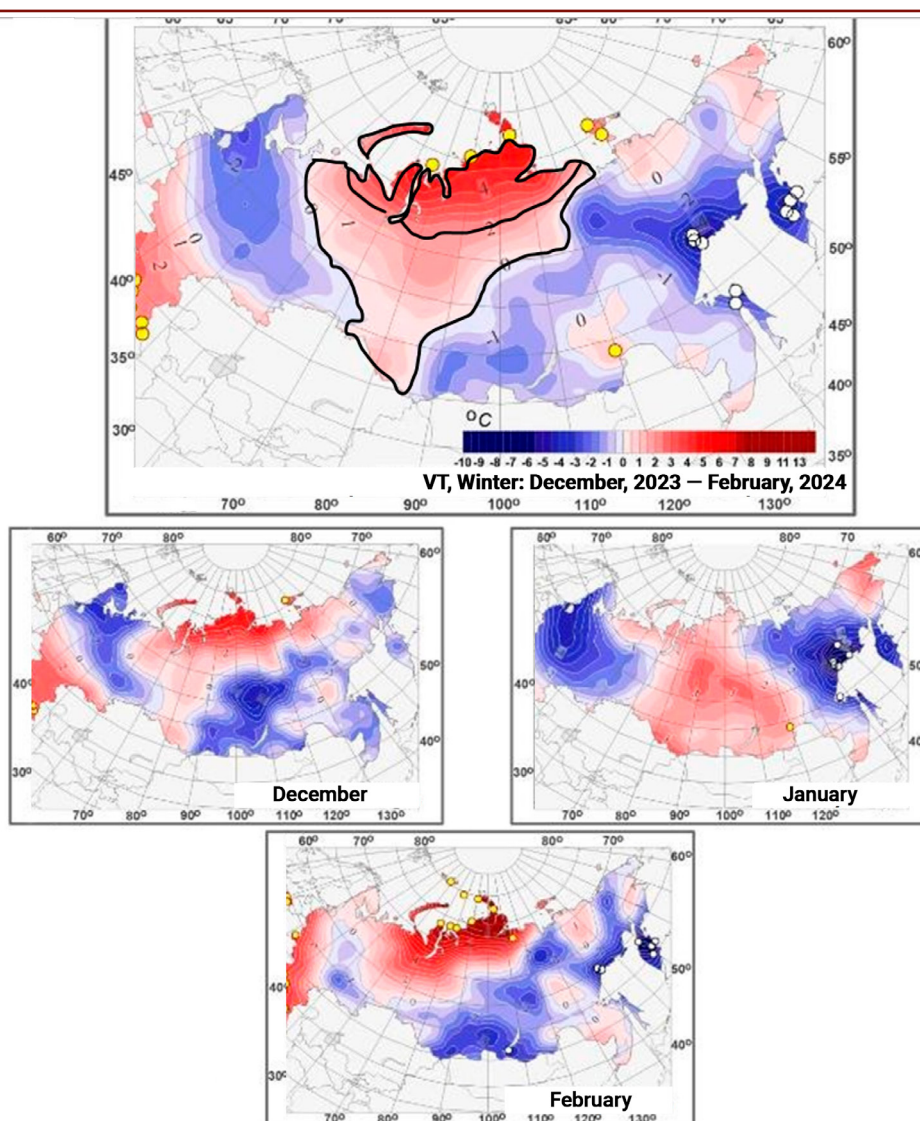
Jelentés az Orosz Föderáció területének éghajlati sajátosságairól 2023-ra. - Moszkva: Roshydromet, 2024. - 104 c.

A felszíni levegő hőmérséklete

A 2023-2024-es téli időszakra vonatkozó hőmérsékleti megfigyelések adatai szintén a felszíni levegő hőmérsékletének anomális jellegét tükrözik (27. ábra). A 2023 decemberétől 2024 februárjáig tartó időszakra vonatkozó átlaghőmérséklet-anomáliák térképe a Gydan és a Taimyr-félsziget területén a normához képest

2,0-4,5 °C-os hőmérséklet-emelkedést mutat.

Figyelembe véve e terület északi fekvését, egy ilyen jelentős téli hőmérséklet-emelkedés a köpenycsóva termikus hatásával hozható összefüggésbe.



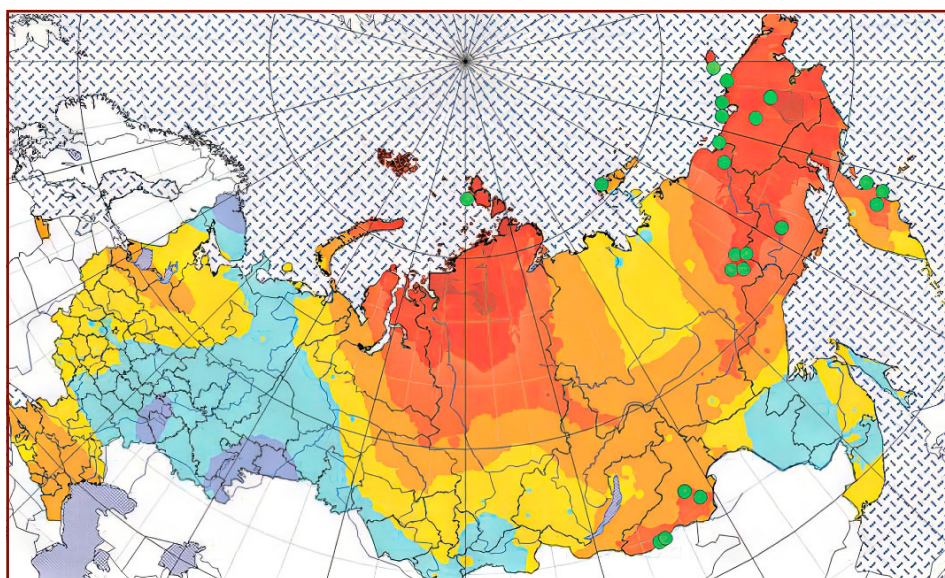
27. ábra.

A felszíni léghőmérséklet átlagos szezonális és átlagos havi anomáliáinak mezői (°C) Oroszország területén 2023-2024 telén.

Forrás: Jelentés az Orosz Föderáció területének éghajlati sajátosságairól 2023-ra vonatkozóan. - Moszkva: Roshydromet, 2024.

Megjegyzendő, hogy a 2001-2022 közötti időszakban a januári és júliusi havi középhőmérséklet³³ térképek elemzése stabil hőmérsékleti anomáliát mutat a vizsgált régióban (28. és 29. ábra). Így megállapítható, hogy ez az anomália nem csak az utóbbi

2 évben figyelhető meg, hanem a teljes 23 éves megfigyelési időszak alatt stabil, ami megerősíti a köpenycsónák felszíni hőmérsékletekre gyakorolt hatására vonatkozó következtetéseket.

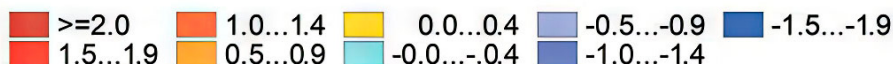


28. ábra.

A havi átlagos léghőmérséklet lineáris trendkoefficiensei (°C/10 év) 2001-2022 között (Oroszország határain belül 2022 februárjáig) - január.

Forrás: Sherstyukov B. G. A globális felmelegedés és annak lehetséges okai // Hidrometeorológia és ökológia. 2023. N° 70. C. 7-37.

<https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

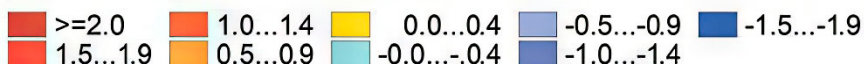
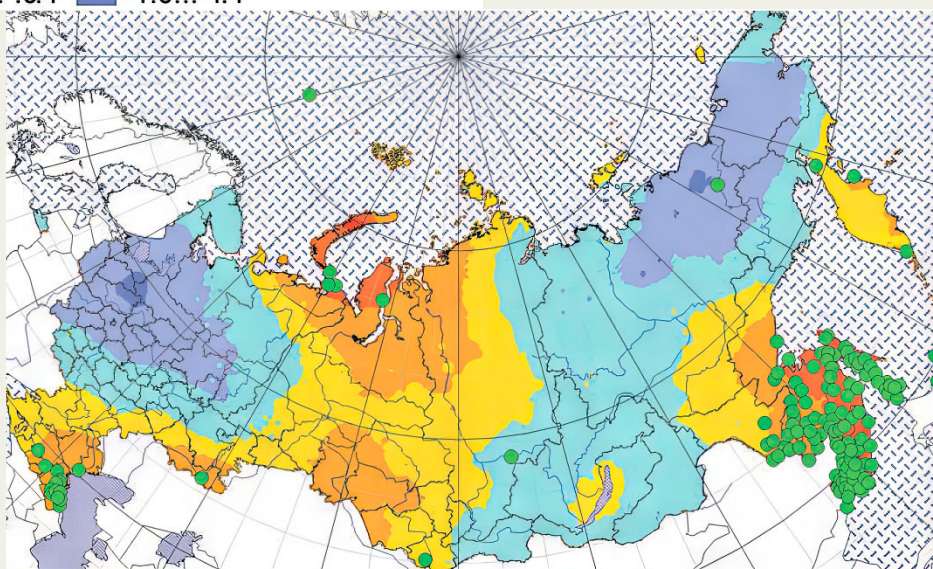


29. ábra.

A havi átlagos moszkvai léghőmérséklet lineáris trendkoefficiensei (°C/10 év) 2001-2022 között (Oroszország határain belül 2022 februárjáig) - július.

Forrás: Sherstyukov B. G. A globális felmelegedés és annak lehetséges okai // Hidrometeorológia és ökológia. 2023. N° 70. C. 7-37.

<https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

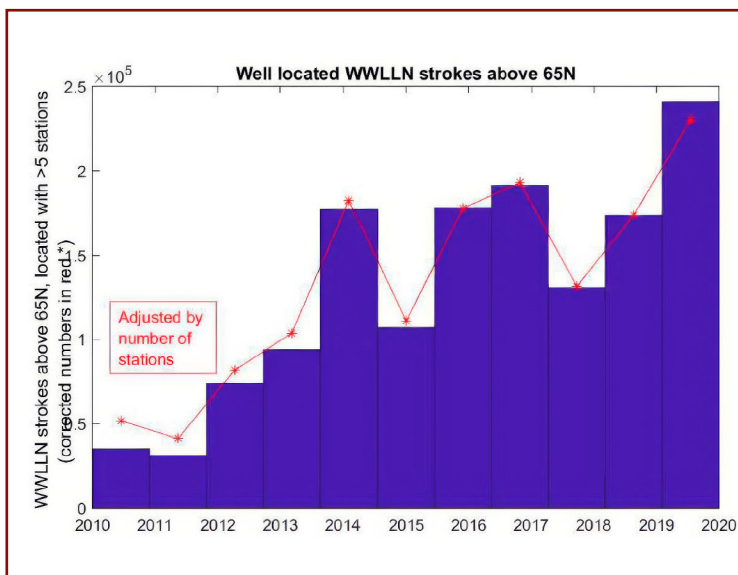


³³ Sherstyukov, B. G. (2023). A globális felmelegedés és annak lehetséges okai. Journal of Hydrometeorology and Ecology, 70, 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

A villámlások számának növekedése

A tudományos közösséget aggasztja a sarkvidéki zivatarok és villámcsapások növekvő száma. Az Északi-sarkvidéken az Északi szélesség 65° felett a villámcsapások száma 2010 és 2020³⁴ között megháromszorozódott (30. ábra). Különlegesség, hogy e villámcsapások többsége Észak-Szibéria térségére koncentrálódik, és szinte egyáltalán nem fordul elő Észak-Kanada és Grönland térségében (31., 32. ábra).

A villámok az Északi-sark felé mozognak, mivel 2019 augusztusában széles körben jelentették, hogy az Északi-sarktól mindössze néhány száz kilométerre több villámcsapást észleltek.³⁵ A legtöbb villámlást a sarkvidékeken (az ÉSZ 80°-tól északra) minden nyáron mindössze néhány intenzív zivataros nap okozza. Ezek a zivatarok azonban újdonságnak számítottak a régióban, mivel a korábbi években nagyon kevés zivatar volt itt.

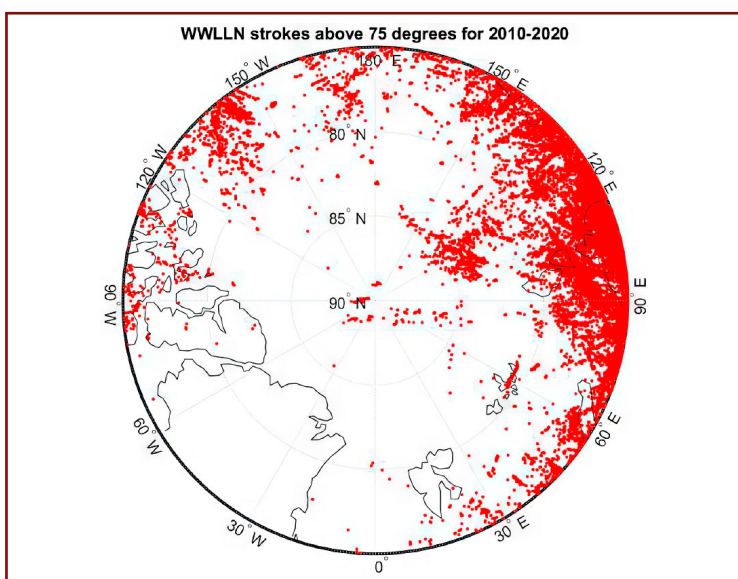


30. ábra.

A helyesen rögzített WWLLN villámkiülések az ÉSZ 65° felett (kékkel jelölve), a grafikon piros vonala pedig a WWLLN-állomások teljes száma alapján elvégzett korrekciót mutatja. A WWLLN a World Wide Lightning Location Network rövidítése.

Forrás: Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). Villámlás az Északi-sarkvidéken. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091366.

<https://doi.org/10.1029/2020GL091366>



31. ábra.

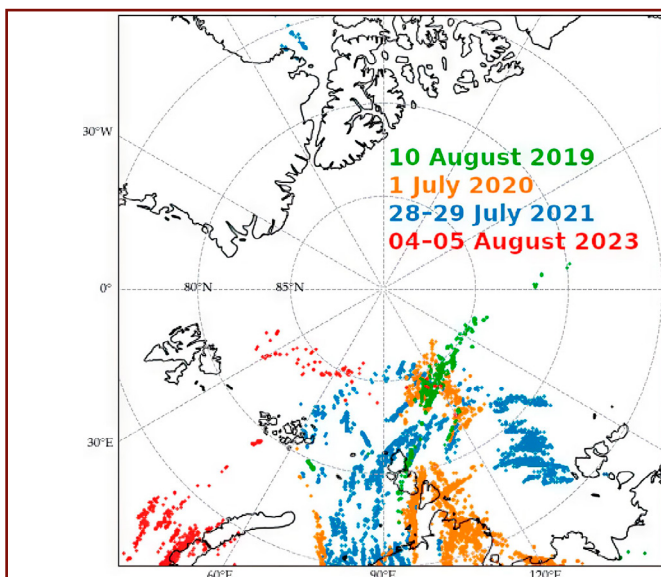
A WWLLN villámcsapások globális eloszlása 2010-2020 júniusában, júliusában és augusztusában az ÉSZ 75° felett. WWLLN - World Wide Lightning Location Network.

Forrás: Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). Villámlás az Északi-sarkvidéken. *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, augusztus 12.). Szombaton 48 villám csapott le az Északi-sark közelében, miközben folytatódik a gyors sarkvidéki felmelegedés. *The Washington Post*. <https://www.washingtonpost.com/weather/2019/08/12/lightning-struck-within-miles-north-pole-saturday-rapid-arctic-warming-continues/>



32. ábra.

A WWLLN által a 2019-2023 közötti zivatarok során észlelt villámok helyei. Zöld - 2019, narancssárga - 2020, kék - 2021, piros - 2023.

Forrás: Popykina, Alena, Nikolay Ilin, Maria Shatalina, Colin Price, Fedor Sarafanov, Andrey Terentev és Andrey Kurkin. 2024. „Zivatarok az Északi-sark közelében” Atmosphere 15, no. 3: 310.

<https://doi.org/10.3390/atmos15030310>

Az elmúlt évek során kialakult helyhez kötöttség oka az Észak-Szibériában tapasztalt szélsőséges nyári hőség, amelynek következtében a hőmérséklet a nyári hónapokban elérte a 35 °C-ot. De azt is feltételezik, hogy a légkör általános ionizációjának növekedése ebben a régióban a magmás füstfelhő bevezetése miatt szintén fontos tényező a villámok számának növekedése szempontjából. Ez a hőenergiának a Yutkin-effektus által elektromos energiává történő átalakulása miatt következik be a köpenyen belüli robbanások során, amelyek akkor következnek be, amikor különböző hőmérsékletű magmaáramlatok érintkeznek egymással. Ennek eredményeképpen hatalmas mennyiségű energia szabadul fel a felszín alatt, ami a felszínen a statikus feszültség növekedéséhez vezet.

A kéreg repedésein keresztül is jelentős mennyiségű gázok szabadulnak fel. Ez befolyásolhatja a felhőképződést, valamint a helyi időjárási mintákat. A magma behatolása kulcsfontosságú tényező a felszíni felmelegedésben, a megnövekedett páratartalomban és a zivatarfelhőkhöz és villámláshoz vezető hőanomáliákban.

Mivel a zivatarokhoz és a villámláshoz hideg levegő, meleg levegő és konvektív instabilitás kombinációjára van szükség, a szibériai köpenytőlcsér elhelyezkedése optimális feltételeket teremt a kialakulásukhoz.

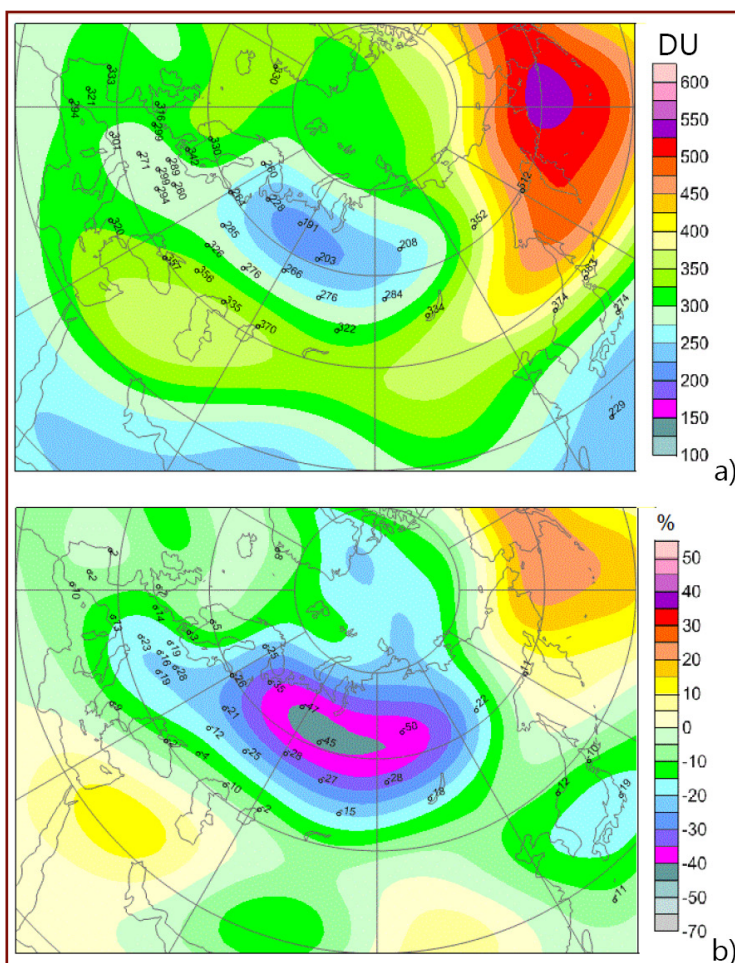
Az ózonréteg csökkenése

A felszín alatti magmás tevékenységet jelentős mennyiségű vulkáni gáz, köztük hidrogén, metán és szén-dioxid felszabadulása kíséri. A hidrogénkibocsátás V. L. Szyvorotkin³⁶ munkái szerint az ózonréteg pusztulását okozza. Mivel a magma felemelkedése pulzáló jellegű, a gázmentesítés és az azt követő ózonréteg pusztulása is szórványos, azaz epizodikus jellegű lesz.

Észak-Szibéria felett 1997-1998 óta, azaz a Föld magjának a Taymyr-félsziget felé történő eltolódása után ózonréteg-anomáliákat figyelnek meg. Az ózonréteg csökkenésének epizódjait

2011-ben, 2016-ban és 2020-ban³⁷ figyelték meg. Az ózontartalom maximális hiányát 2016-ban³⁸ regisztrálták. 2016. január végén (a megfigyelések 1973-as kezdete óta először) az északi Ural és Szibéria felett ózonanomáliát regisztráltak, amelynek teljes ózontartalma 190-200 e.d. volt, ami 40-45 %-kal kevesebb a sokéves átlagértékeknél, és a jelenség időtartama legfeljebb 1 hétig tartott (33. ábra).

Az AURA műholdra (USA) telepített OMI műszerrel is jelentős csökkenést regisztráltak az összes ózontartalomban (34. ábra).



33. ábra.

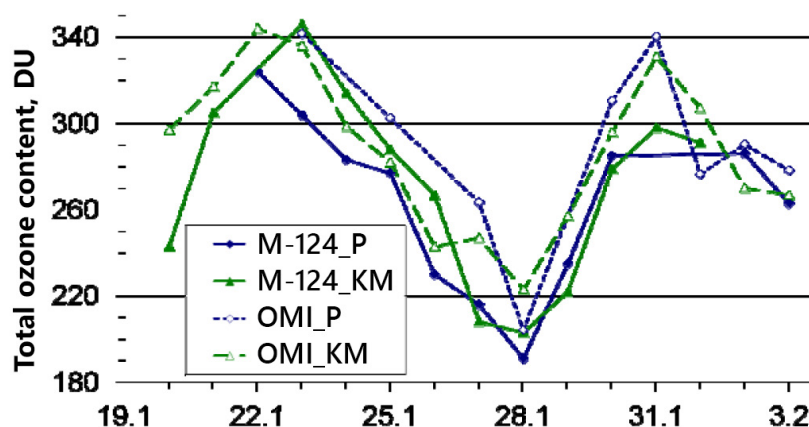
A teljes ózontartalom (a) és annak eltérései a sokéves átlagtól (b) 2016. január 28-án a WOUDC [<http://woudc.org/>] műholdas adataiból, a térképen szereplő számok a teljes ózontartalom mérései az ózonmérő hálózat állomásain.

Forrás: Nikiforova M.P., Vargin P.N., Zvyagintsev A. M. M., Ivanova N. S., Kuznetsova I. N., Lukyanov A. N. (2016). Ózon mini-lyuk az Észak-Ural és Szibéria felett. Proceedings of the Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation, No. 360, pp. 168-180. In Proceedings of the Hydrometeorological Conference, 9-10 February, Vol. 4, pp. 91-96. Voronyezs: Kutatási kiadványok.

³⁶Szyvorotkin, 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. ábra.

A teljes ózontartalom a földi M-124-es ozonmérővel és az AURA műhold (USA) OMI műszerével végzett mérések alapján a Pecsora (P) és Hanti-Manszijszk (KM) állomásokon 2016. január 20. és február 3. közötti időszakban.

Forrás: Nikiforova M. P., Vargin P. N., Zvyagintsev A. M. M., Ivanova N. S., Kuznetsova I. N., Lukyanov A. N. (2016). Ózon mini-lyuk az Észak-Ural és Szibéria felett. Proceedings of the Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation, No. 360, pp. 168-180. In Proceedings of the Hydrometeorological Conference, 9-10 February, Vol. 4, pp. 91-96. Voronyezs: Kutatási kiadványok.

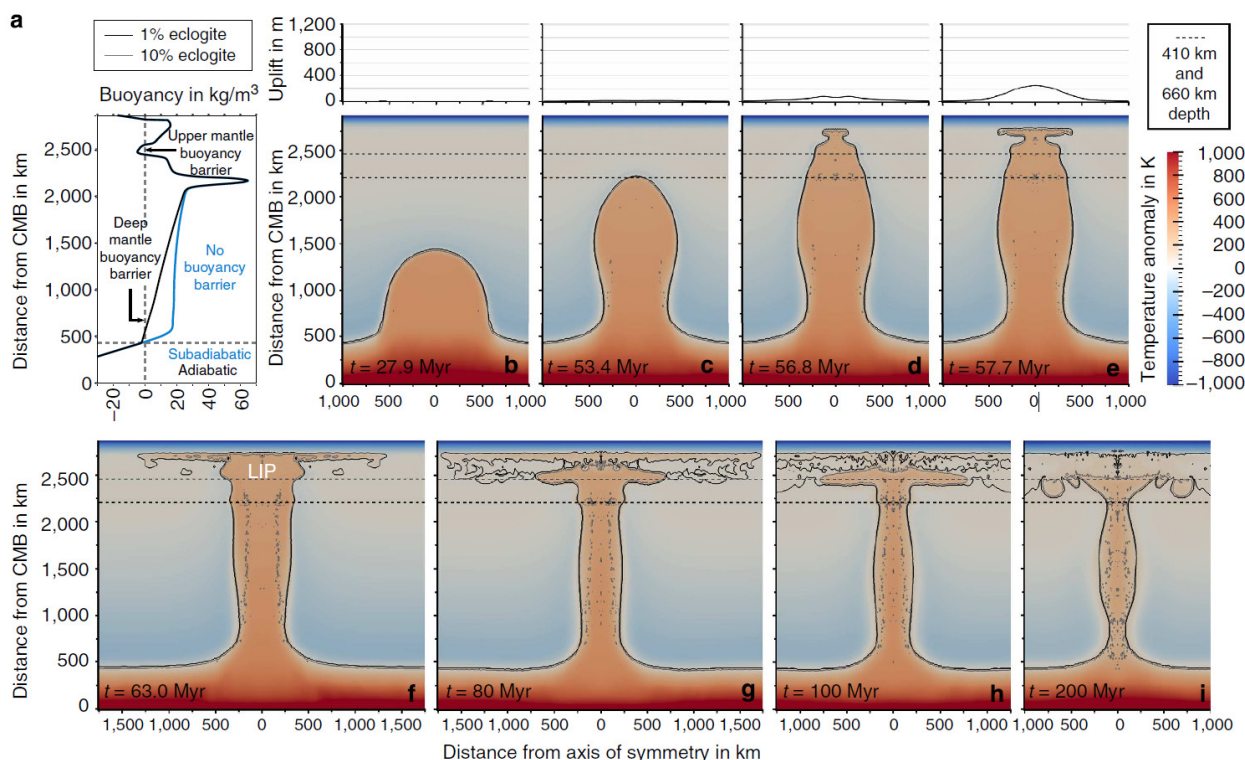
Fontos megjegyezni, hogy az északi félteke extratrópusi szélességein az összes ózontartalom többéves átlagos szezonális lefolyása szeptemberben minimumot és március-áprilisban maximumot mutat. 2016-ban azonban az ózonromlás atipikusan korán, 2016 januárjában alakult ki, és az összes ózontartalom ebben a hónapban a műszeres megfigyelések teljes történetében a minimum volt.

Így az ózonréteg degradációja a szibériai régió felett a magmás fojamok felszínre való előrenyomulása következtében a törések mentén történő gázszökés további mutatója lehet.

A köpenycsóva szerkezete, lehetséges mérete és lokalizációja a közzétett és megfigyelési adatok alapján

A köpenycsóva szerkezete hagyományosan egy gombához hasonlítható. Van egy úgynevezett farka, amely a felhevült anyagot a mag-köpeny határról kiemeli. A köpenycsóva felső része, amely az emelési folyamat során beágyazódik,

a köpenycsóva feje. Amikor a köpenycsóva eléri a litoszféra határát (alját), a megszilárdult kőzet tűzálló rétegének támaszkodva, a köpenycsóva feje gombafejként kezd szétterülni a litoszféra alatt (35. ábra).



35. ábra.

Az ábra egy olyan köpenycsóva fejlődésének modelljét mutatja, mint amilyen a szibériai csapdákat 250 millió évvel ezelőtt kialakította.

A bal oldali grafikon (a) azt mutatja, hogyan emelkedik a magma a földköpeny különböző rétegeiben. A kép fő része (b-i) egyfajta „időszalag”, amely köpenycsóva fejlődésének szakaszait mutatja. Először egy forró magma „oszlop” alakul ki, amely a köpeny aljából emelkedik fel. Ez az oszlop fokozatosan eléri a köpeny felső rétegeit. A tetején

kitágul, és egy „gombafejet” alkot. Idővel a köpenycsóva elvékonyodik és különálló részekre kezd szétesni. Az ábrán a színek a hőmérsékletet mutatják:

A piros és narancssárga területek a legforróbbak, a kék területek a hűvösebbek.

Forrás: Dannberg, J., Sobolev, S. Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept. Nat Commun 6, 6960 (2015).

<https://doi.org/10.1038/ncomms7960>

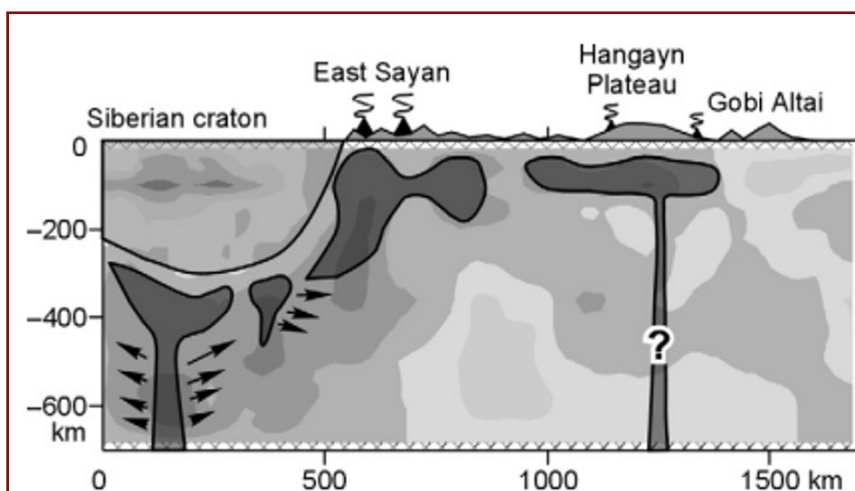
A szakirodalmi adatok szerint, ahogy a fúvóka közeledik a litoszféra felé, a terjedés során a fúvóka sugara megduplázódik, és a sebessége drámaian csökken.³⁹ A „farkából” érkező forró anyag nyomja és égeti a litoszférát, repedéseket képez, majd ahol vannak meggyengült helyek, ott másodlagos fúvókák - már a földkéreg belsejében lévő felső magmakamrák - alakulnak ki. Például a Yellowstone, a Campi Flegrei és más szupervulkánok rendelkeznek ilyen kamrákkal. Éppen ezeken a helyeken következhet be kéregszakadás és hatalmas magmakitörés a felszínre.

Fontos megjegyezni, hogy az eddigi elképzelések szerint egy plume felszínre emelkedése több tízmillió évig is eltarthat. Ezek az adatok azonban elméleti számításokon alapulnak, míg a geodinamikai folyamatok mai eszköztárának gyakorlati megfigyelései ennek ellenkezőjét sugallják. A szibériai folyamatok megfigyelései arra utalnak, hogy a plum felszínre emelkedése néhány évtizeden belül

bekövetkezik.

Irodalmi adatok⁴⁰ alapján ismert, hogy egy hasonló magmás óriási köpenycsóva, amely Euráziában (Szibériában) a perm-triász határon (250 mil.év) számos bazaltkitörést okozott, a következő méretekkel rendelkezett: nyugatról keletre 4000 km, északról délre 3000 km. A köpenycsóva feje pedig feltehetően 1000-2000 km átmérőjű volt.

A nyugat-szibériai lemezről ismert, hogy fiatalabb és vékonyabb, 35-40 km vastag. A kelet-szibériai platform ezzel szemben idősebb és vastagabb, hidegebb, 40-45 km vastag. Ezt nevezik szibériai kráternek. A szeizmikus tomográfiai adatok alapján a tudósok azt feltételezik⁴¹, hogy a Kelet-szibériai Platform déli vége alatt most kis magmás központok vannak, amelyek a hidegebb lemez miatt a Szibériai kráter alatt terjednek ki (36. ábra).



36. ábra.

A szibériai kraton kis magmás góccokkal való áramlásának sematikus ábrázolása (a nyilak bal oldalon jelzik).

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

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

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

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

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

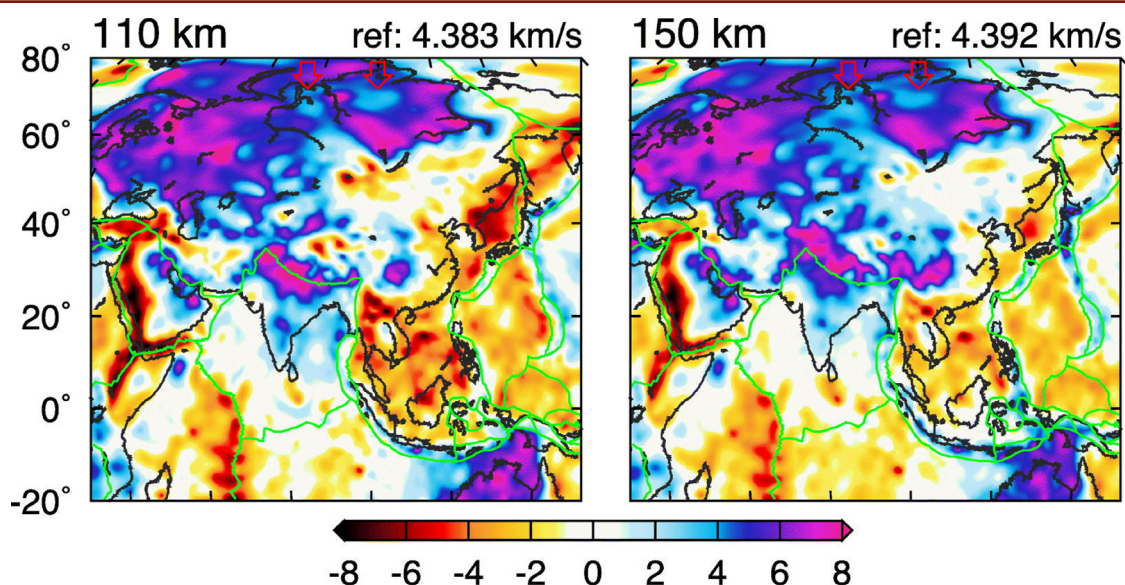
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012>

A hipotézis szerint a mai szibériai köpenycsóva a kelet-szibériai platform aljzata alatt és részben a nyugat-szibériai lemez alatt terjed. A terjedés az irodalmi adatok szerint 50-60 km mélységben történhet, és a fúvóka lábát feltételezhetően 100 km mélységben lehet a legvilágosabban megfigyelni. A másodlagos köpenycsókák bevezetése valószínűleg már 40 km-es mélységben megtörténik.

Egyes szeizmikus tomográfiai modellek 110-150 km mélységben alacsonyabb sebességanomáliákat⁴² (folyékonyabb közeg) mutatnak, ami megfelel a Gydan- és

Taymyr-félszigettől délre található felszín alatti folyékonyabb közegnek (37. ábra). Ez látható a 2024. augusztusi tanulmány sebességtérképein is. Ezek az anomáliák feltehetően két magmás anyag beáramlásával, azaz plume-csóvákhoz hozhatók összefüggésbe (38. ábra).

Ha ez a modell helyes, akkor a kelet-szibériai kráter alatt felszálló mindkét csóva átmérője kb. 600-700 km.



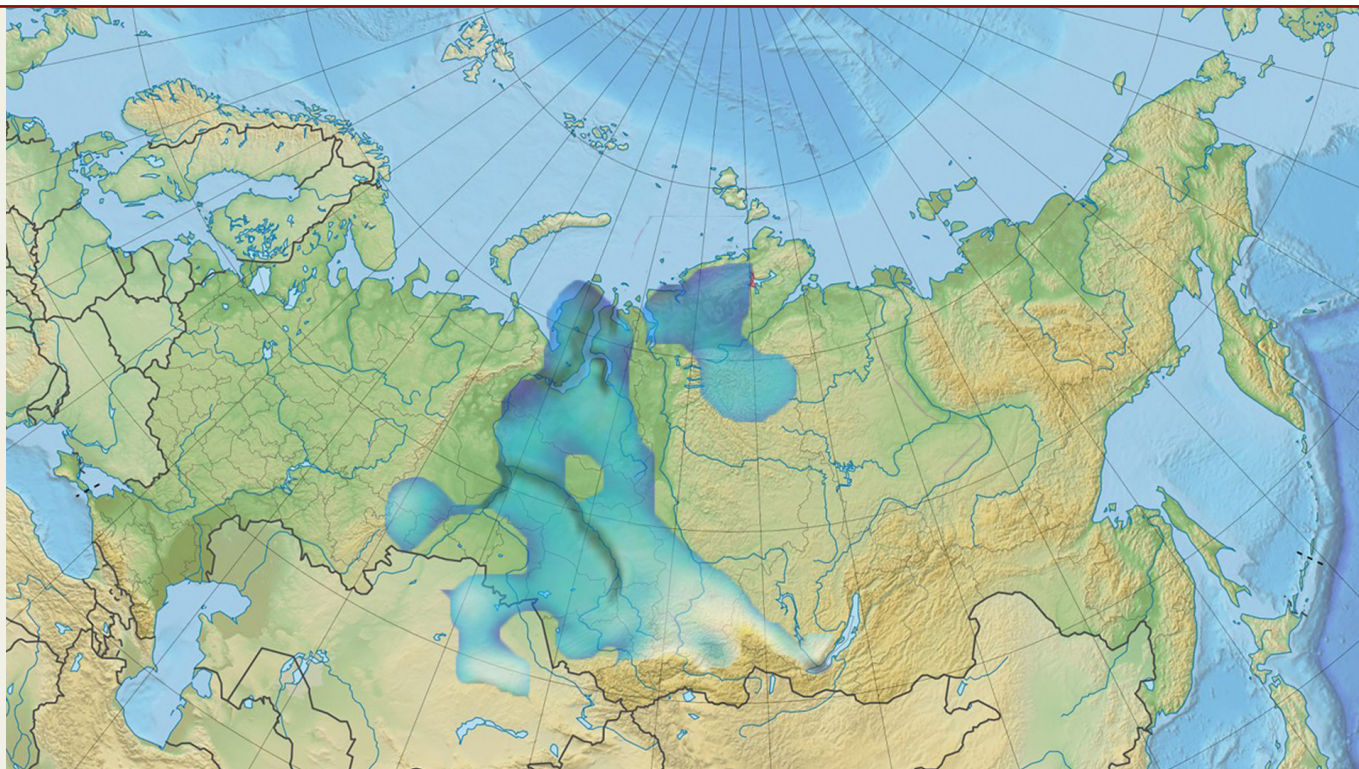
37. ábra.

A térképen a lila színek az akusztikus hullám gyors sebességeit (kemény kőzeteken keresztül), a kék színek pedig a lassabb sebességeket (folyékonyabb, olvadt anyag) jelzik. A folyékonyabb köpenyanyag zónáinak megfelelő csökkent szeizmikus hullámsebességek anomáliáit két piros nyíl jelöli.

Forrás: Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). Ázsia alatti felső köpeny szeizmikus tomográfiája, következtetésekkel a tektonika, szeizmicitás és magmatizmus mechanizmusaira. *Earth-Science Reviews*, 255, 104841.

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

⁴²Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). Az Ázsia alatti felső köpeny szeizmikus tomográfia alapján, következtetésekkel a tektonika, a szeizmicitás és a magmatizmus mechanizmusaira. *Earth-Science Reviews*, 247, 104595. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>

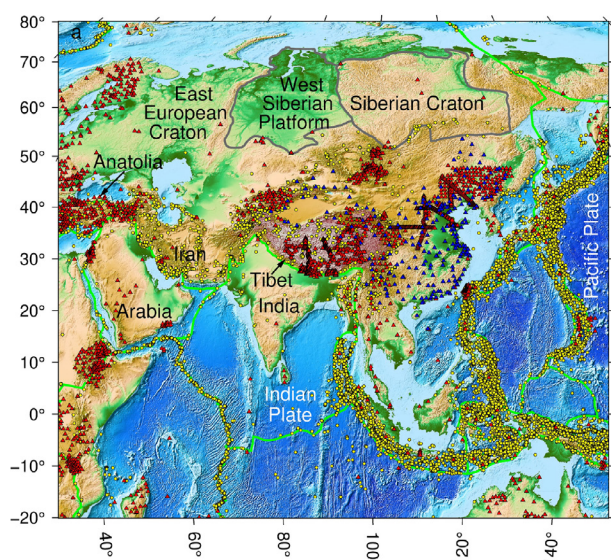


38. ábra.

Oroszország fizikai térképe, amely az alacsony sebességű szeizmikus hullámok anomáliáit mutatja és adaptálja a Dou et al. adatai alapján, 2024.

Fontos megjegyezni, hogy a Dou et al. (2024) tanulmányában Szibériára vonatkozóan bemutatott szeizmotomográfiai elemzés kevesebb mint 10 szeizmikus érzékelő adataira támaszkodott (39. ábra), amelyek mindegyike a lemezhatárok mentén helyezkedik el, és gyakorlatilag nem fedik le Nyugat- és Kelet-Szibériát. Az elemzés

az 1994-től 2023. szeptember 4-ig terjedő időszak összes nyilvánosan elérhető, széles hatótávolságú földrengésvételének adatait használta. Összehasonlításképpen a térképen a piros háromszögek jelzik az elemzésben használt érzékelőket Ázsiára vonatkozóan, amelyek száma több ezerre tehető.



39. ábra.

A szeizmikus tomográfiai elemzéshez használt érzékelők (piros háromszögek) elhelyezkedése.

Forrás: Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). Az Ázsia alatti felső köpeny szeizmikus tomográfia alapján, következtetésekkel a tektonika, a szeizmicitás és a magmatizmus mechanizmusaira. *Earth-Science Reviews*, 247, 104595.

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

Kínai kutatók 2023-as tanulmánya megerősíti, hogy a magma aktivitása jelenleg olvasztja és vékonyítja a kéreg Szibéria alatt⁴³ (40. ábra). Ez a folyamatban lévő folyamat csökkenti a litoszférikus lemez szilárdságát. A szerzők geomágneses adatokból származtatott köpeny elektromos vezetőképességi modellt mutatnak be Észak-Ázsiára vonatkozóan, amely kiemeli, hogy a Szibériai csapdák alatti köpeny átmeneti zónájában jelentős vezetőképességi anomália van a kitörésük során. Ezt az anomáliát a térségben lévő perm anomáliához kapcsolódó, olvadás nyomait tartalmazó termikus szabálytalansággként értelmezik (41. ábra).

Összességében a Kelet-szibériai kráterben a 40-110 km-es mélységeket vizsgáló szeizmotomográfiai modellek eltérő eredményeket mutatnak.

Szibériára vonatkozóan egyértelműen hiányoznak a szeizmológiai adatok, ami korlátozza e modellek pontosságát.

A modern tomográfiai modellek hosszú idő - körülbelül 30 év - alatt gyűjtött szeizmikus adatokon alapulnak. Az évmilliókat felölelő klasszikus köpenytelep-fejlődési koncepciók szempontjából a 30 éves időtartam rendkívül rövidnek tekinthető. A meglévő adatok azonban arra utalnak, hogy ez alatt az időszak alatt jelentős szerkezeti változások történtek a szibériai köpenyben.

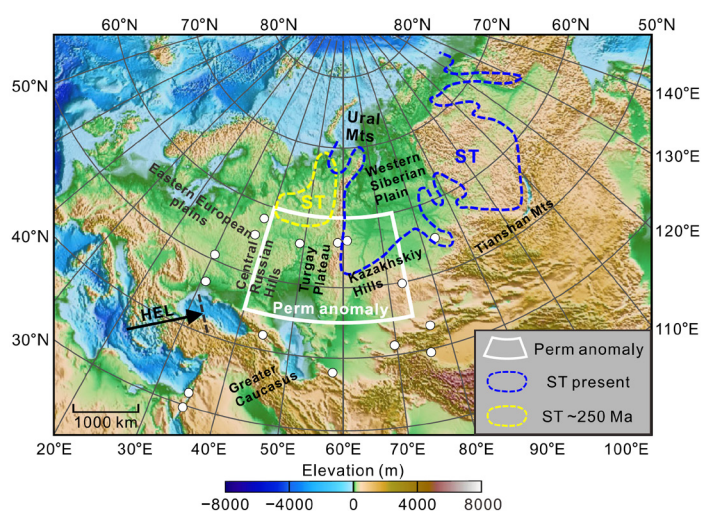
Ezek a megfigyelések rávilágítanak arra, hogy felül kell vizsgálni a köpenycsókák fejlődési sebességéről alkotott jelenlegi elképzeléseket és a vizsgálatukhoz használt módszereket.

40. ábra.

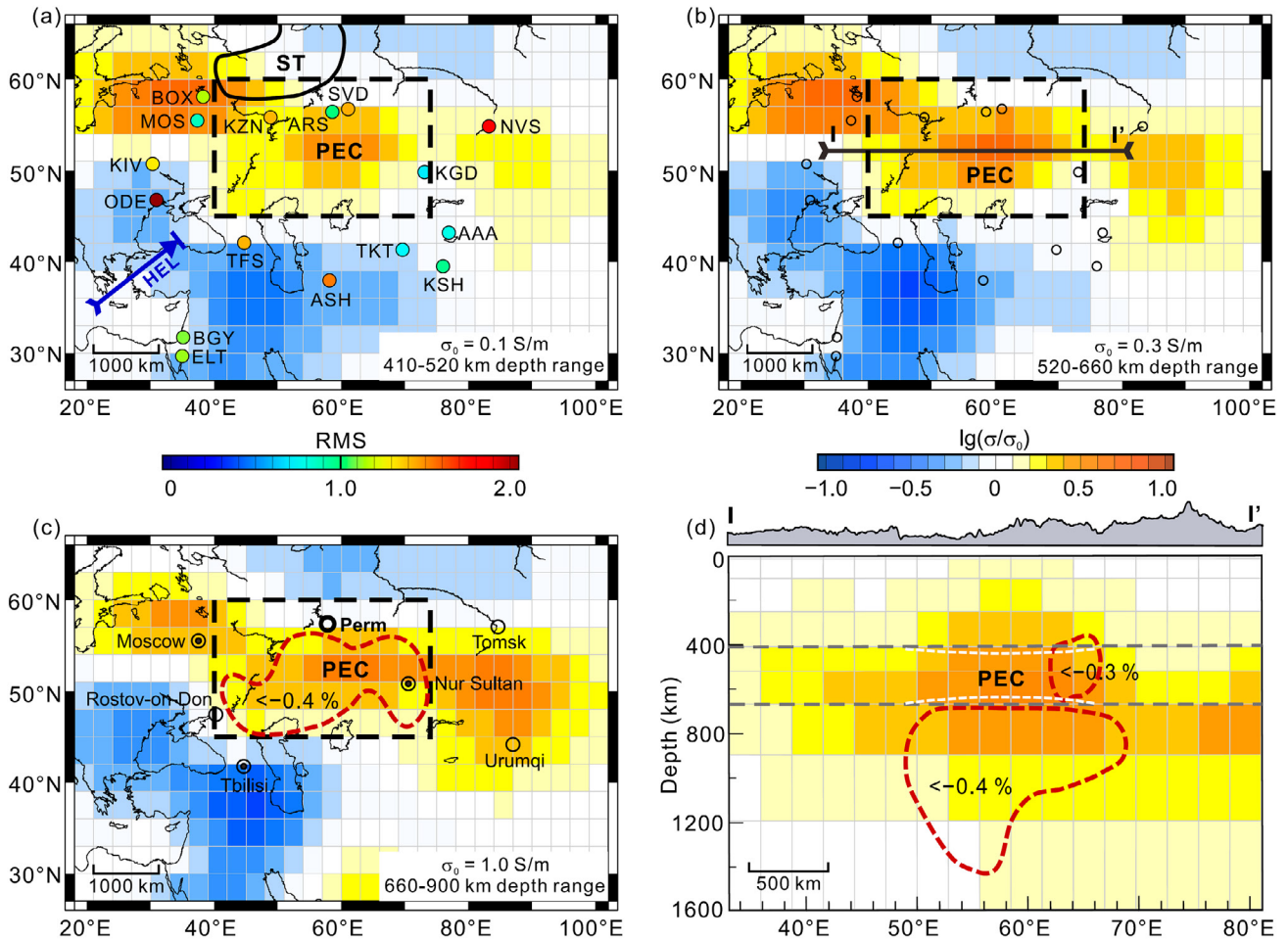
Fehér pontok jelzik azokat az állomásokat, amelyek C-válaszait ebben a tanulmányban felhasználták. A perm anomália tartománya fehér vonalakkal körvonalazott zónaként látható. A szibériai csapdák jelenlegi helyét kézzel, míg a korábbi pozíciókat sárgával, szaggatott vonalakkal jelöltük.

Forrás: Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). A Szibériai csapdák létrehozó késő perm mega köpenycsóva maradványa geomágneses adatokból következtetve. *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. ábra.

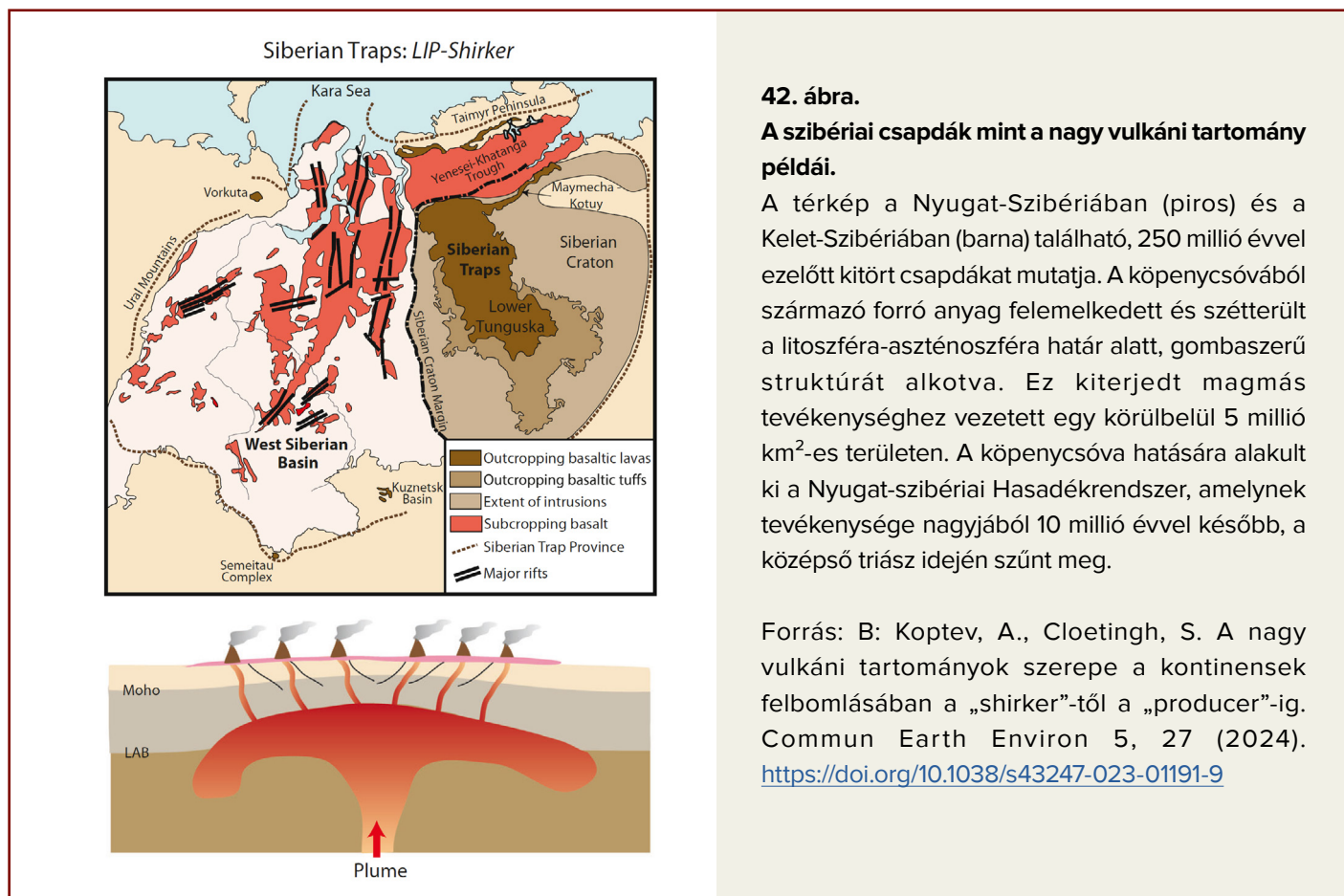
A Jilin Egyetem és a Shijiazhuang Tiedao Egyetem tudósai 16 észak-ázsiai állomás geomágneses mező adatait használták fel a köpeny elektromos vezetőképességének kiszámításához különböző mélységekben. Észrevehető vezetőképesség-növekedést fedeztek fel a világméretű átlagos vezetőképességhez képest a Szibériai csapdák alatti régióban (sárga és barna területek az ábrákon). A kutatók megállapították, hogy ezek a 400 és 900 km közötti mélységben lévő területek átlagosan 250 fokkal forróbbak, mint a környező köpeny. Ezeken a területeken az olvadt köpeny egy része található.

Forrás: Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). A Szibériai csapdák létrehozó késő perm mega köpenycsónának a geomágneses adatokból következtetett maradványa. *Nature Communications*, 14, 1311.

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

Érdemes megjegyezni, hogy 250 millió évvel ezelőtt, a perm és a triász korszak határán szintén történtek korábbi kitörések ebben a régióban. Az epicentrum a kelet-szibériai

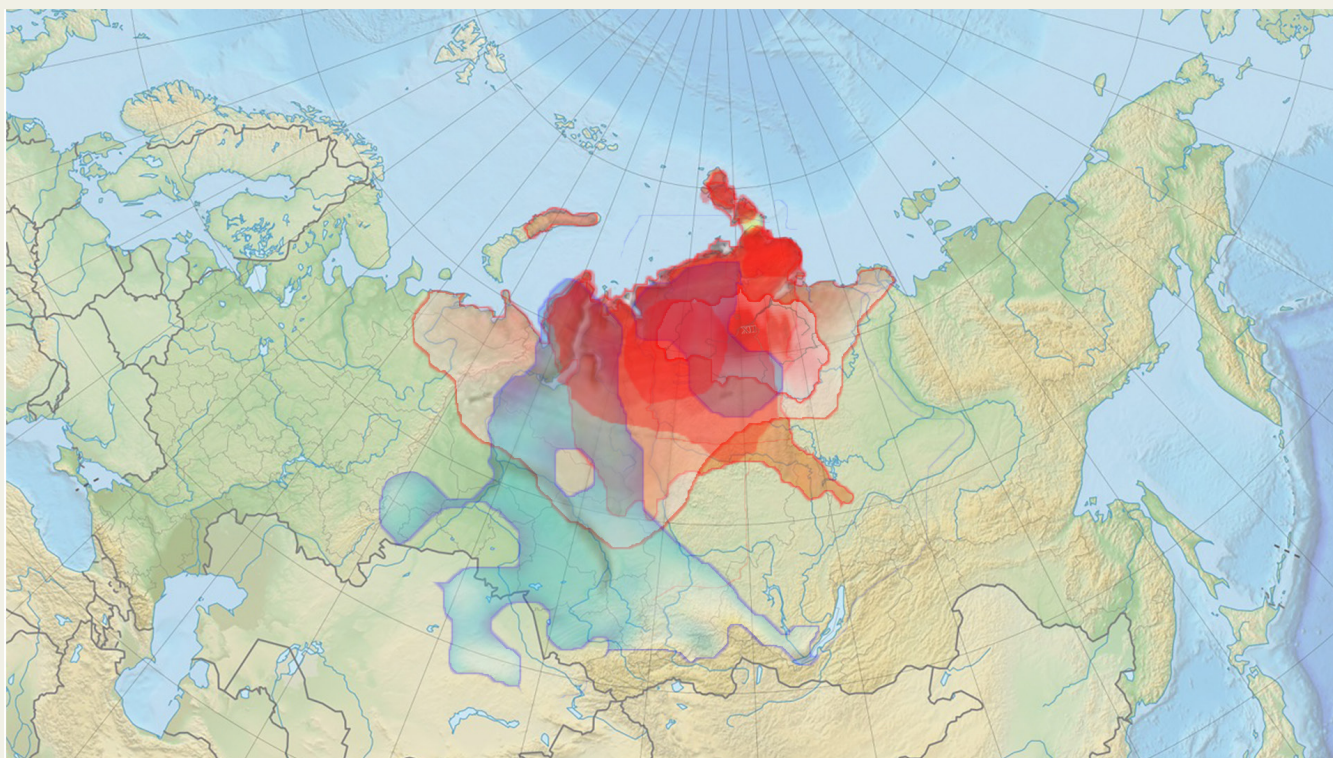
kráter alatt (a Putorana-fennsík alatt) volt, és a kitörések Nyugat- és Kelet-Szibériát is átfogták (42. ábra).



A köpenycsóva elhelyezkedése

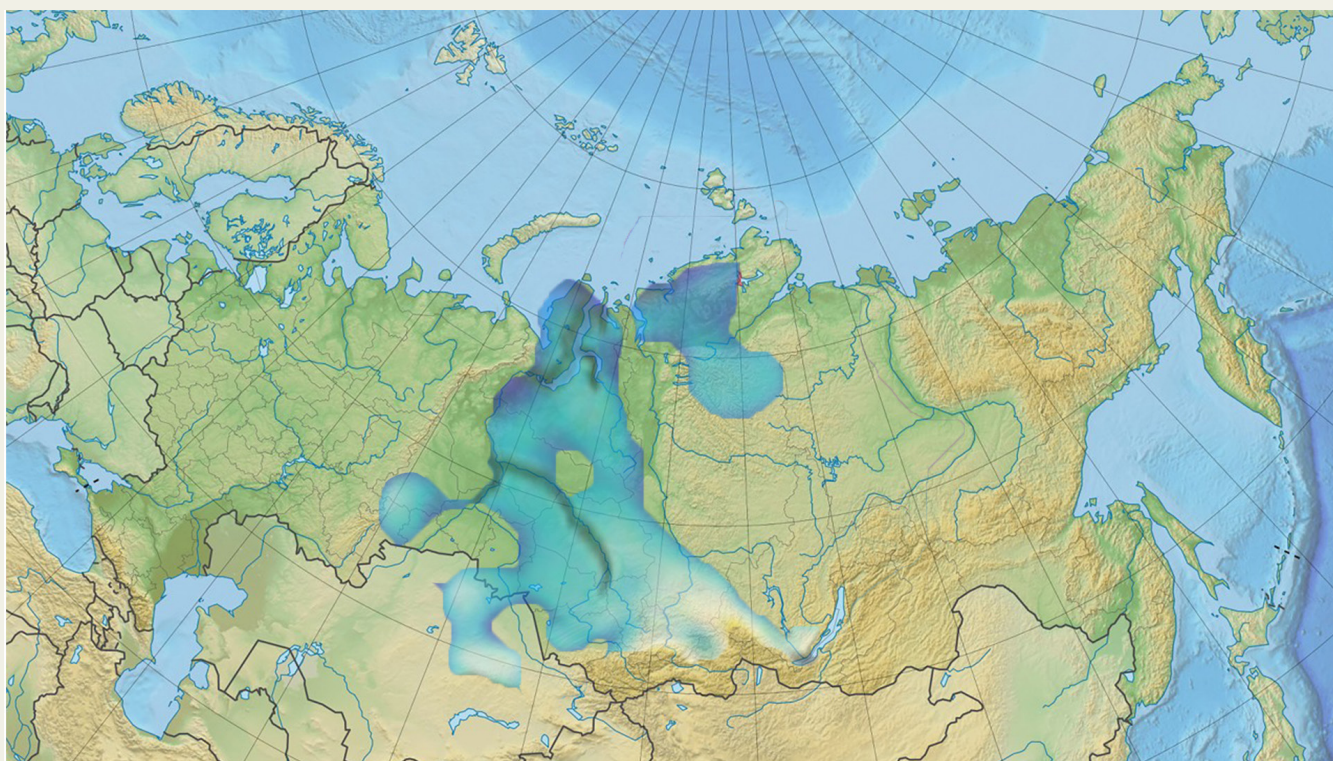
A talajhőmérsékleti anomáliák, a permafroszt olvadás mélysége, a felszínközeli hőmérsékleti anomáliák, a köpenyben lévő alacsony sebességű szeizmikus hullámok anomáliái és a mágneses

anomália elemzésének szintetizálásával azonosítható a szibériai köpenycsóva jelenlegi helye és mérete (43. ábra).



43. ábra.

A. Összetett térkép, amely a legfontosabb anomáliákat több paraméteren keresztül fedt le, az alábbiakban részletezettek szerint:



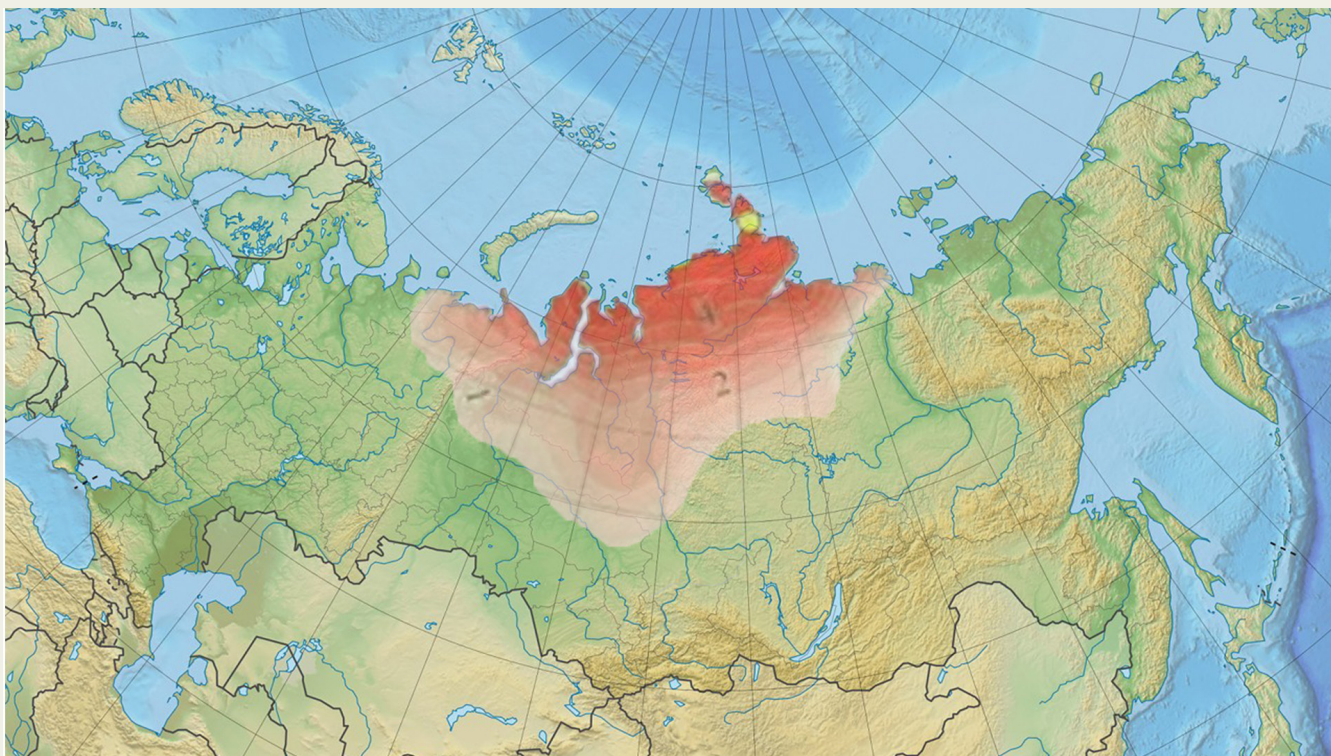
B. Az alacsony sebességű anomáliák térképe (amelyek több olvadt anyagra utalnak) 110 km mélységben, a Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023) szeizmotomográfia alapján.



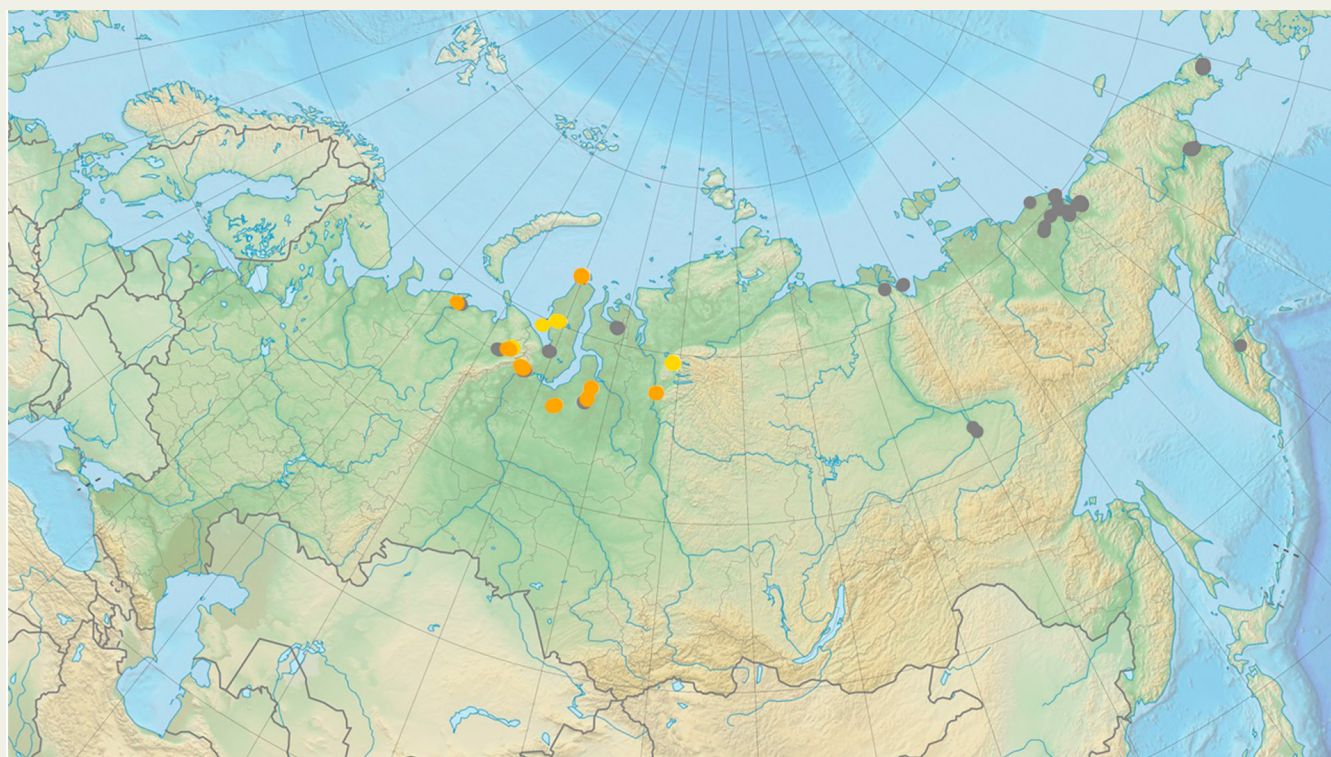
C. Az új talajfűtési anomáliák tendenciái az 1976-2021-es és az 1976-2023-as időszakok összehasonlítása a Roshydromet (2021, 2023) jelentése szerint.



D. A januári havi átlagos léghőmérséklet lineáris trendje 2001-2021 között, Sherstyukov (2023) szerint.



E. Szezonális átlagos léghőmérséklet 2023 decemberétől 2024 februárjáig, a Roshydromet adatai alapján (2024)



F. A szezonális olvadás növekvő mélységű területei a permafroszt rétegben. Adatforrás: <https://permafrost.su/>

A hipotézis szerint a köpenycsóva felszálló szakasza a Gyda- és a Taimyr-félszigettől délre helyezkedik el, és több ága van. A köpenycsóva fejének átmérőjét 1 200-1 500 km-re becsülik, míg a magmás áramlás szétterjedési zónája elérheti a 2 500-3 000 km-t is. Ez a régió a Nyugat-szibériai-lemez és a Kelet-szibériai-kraton szerkezeteit foglalja magában.

Jelenleg a köpenycsóva feje a Kelet-szibériai kráter alapjára gyakorol hatást, és magmás áramlásokat terít a területe alatt. Ez a folyamat valószínűleg hozzájárul a fokozott

szeizmikus aktivitáshoz a lemezperemek mentén, beleértve olyan területeket, mint a Bajkál vagy akár az Ural. Az ilyen anomáliák oka kifejezetten a lemezek peremvidékein a lemezek destabilizálódása az alatta lévő asztenoszféra lágyulása és a földkéreg szibériai tömbje központi részének enyhe felemelkedése miatt, vagyis a Nyugat-szibériai-lemez és a Kelet-szibériai-kraton tektonikai szerkezete, valamint a Verhojansk-Csukotka hajtásrendszer tektonikai szerkezete.

A szeizmikus aktivitás növekedése, mint a tektonikus lemez destabilizációjának mutatója a szibériai köpenycsóva aktivitása miatt

A szeizmikus aktivitás elemzésének módszertana magában foglalta a Nemzetközi Szeizmológiai Központ (ISC) honlapjáról származó adatok letöltését és speciális feldolgozását. Mivel az adatok különböző országokból és kutatóintézetekből származó különböző forrásokat, valamint különböző nagyságrendeket (Mw, Ms, Mb, ML, MD stb.) tartalmaznak, az adatok feldolgozására egy bizonyos algoritmust alkalmaztak, hogy kiválasszák a különböző forrásokból a megfelelő nagyságrendet (lásd az 1. függelékét). A feldolgozási algoritmus lényege az volt, hogy a leggyakoribb magnitúdótípusok közül a mediánértéket választotta ki az egyes eseményekhez, mivel az egyes eseményekhez különböző források különböző magnitúdótípusokat és -értékeket szolgáltatnak az ISC adatbázisába. Átlagosan ez a feldolgozás a benyújtott maximális értékhez képest kis mértékben csökkenti a magnitúdót, de a tapasztalat azt mutatja, hogy a medián alapú

algoritmus olyan eredményeket ad, amelyek jól illeszkednek a Gutenberg-Richter-törvényhez és más mintákhoz, és meglehetősen jól egyeznek más szeizmológiai forrásokból, például az IRIS-ből és az USGS-ből származó adatokkal.

Az algoritmus segítségével kapott adatokat az ISC-adatbázisban szereplő eseménytípusok szerint szűrtük (lásd az 1. függelékét), hogy kizárjuk a bányászati műveletek során emberi tevékenység által okozott eseményeket: robbanások, robbanásgyanús események, kőzetrobbanások stb. Mivel Oroszországban számos bányavállalat működik, az ISC-adatbázist összevetettük az Orosz Tudományos Akadémia Egyesített Geofizikai Szolgálatának⁴⁴ 2025. januári adataival, amely az összes ismert oroszországi robbanást és kőzetkitörést felsorolja. Ezeket az eseményeket is kizárták annak biztosítása érdekében, hogy a kapott adathalmaz ne tartalmazzon robbanásoknak tulajdonítható eseményeket.

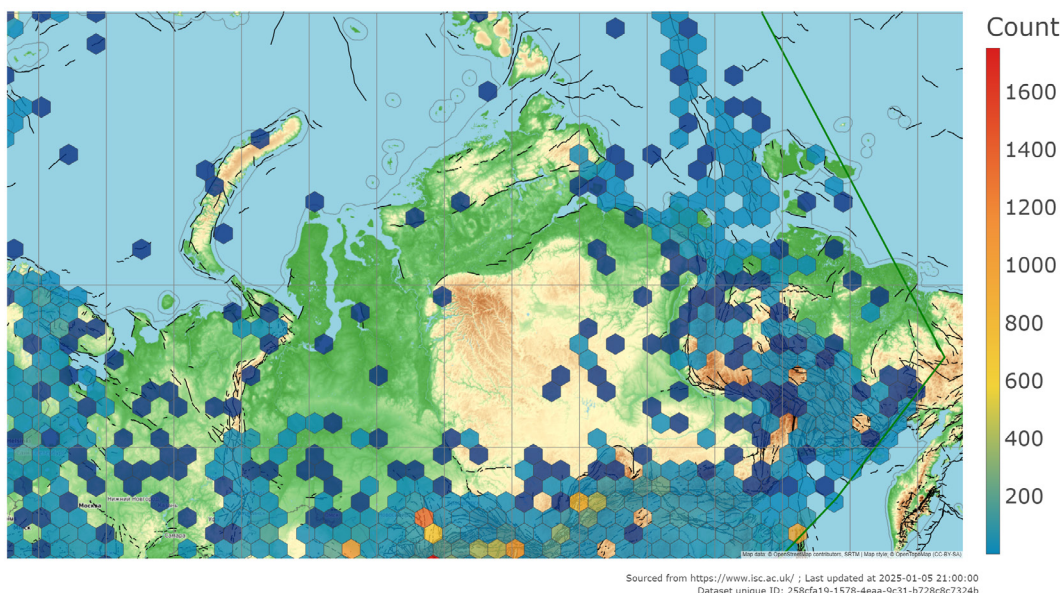
⁴⁴ Szövetségi Kutatóközpont, az Orosz Tudományos Akadémia Egyesített Geofizikai Szolgálat <http://www.ceme.gsr.ru/zr/contents.html>

Vizsgáljuk meg most az adatanalízis eredményeit a felszálló magmás plúma régiójában és a közvetlenül érintett főbb tektonikus blokkok perifériás területein. Mivel a Szibériai Kraton viszonylag stabil, aszeizmikus platformnak számít, már a határai közötti kis számú földrengés is anomáliának tekinthető.

A 44. ábra az földrengések sűrűségének eloszlását mutatja Oroszország területén. A Szibériai régióban a legmagasabb földrengés-koncentráció a várakozásoknak megfelelően a hajtásos területeken figyelhető meg: keleten

a Verhojanszki-hegységben, a Gakkel-háton, nyugaton az Urál-hegységben, valamint délen az Altaj-Szaján régióban. Elszigetelt események Szibéria területén belül is előfordulnak – több, körülbelül 4,0 magnitúdójú földrengést regisztráltak a Tajmir-félszigettől délre. Nézzük meg közelebbről a földrengések dinamikáját Szibéria helyi területein. Vizsgáljuk meg részletesebben a helyi földrengések dinamikáját a Szibériai magmafúvóka területén és a szomszédos régiókban.

M3+ földrengések sűrűsége Szibéria területén



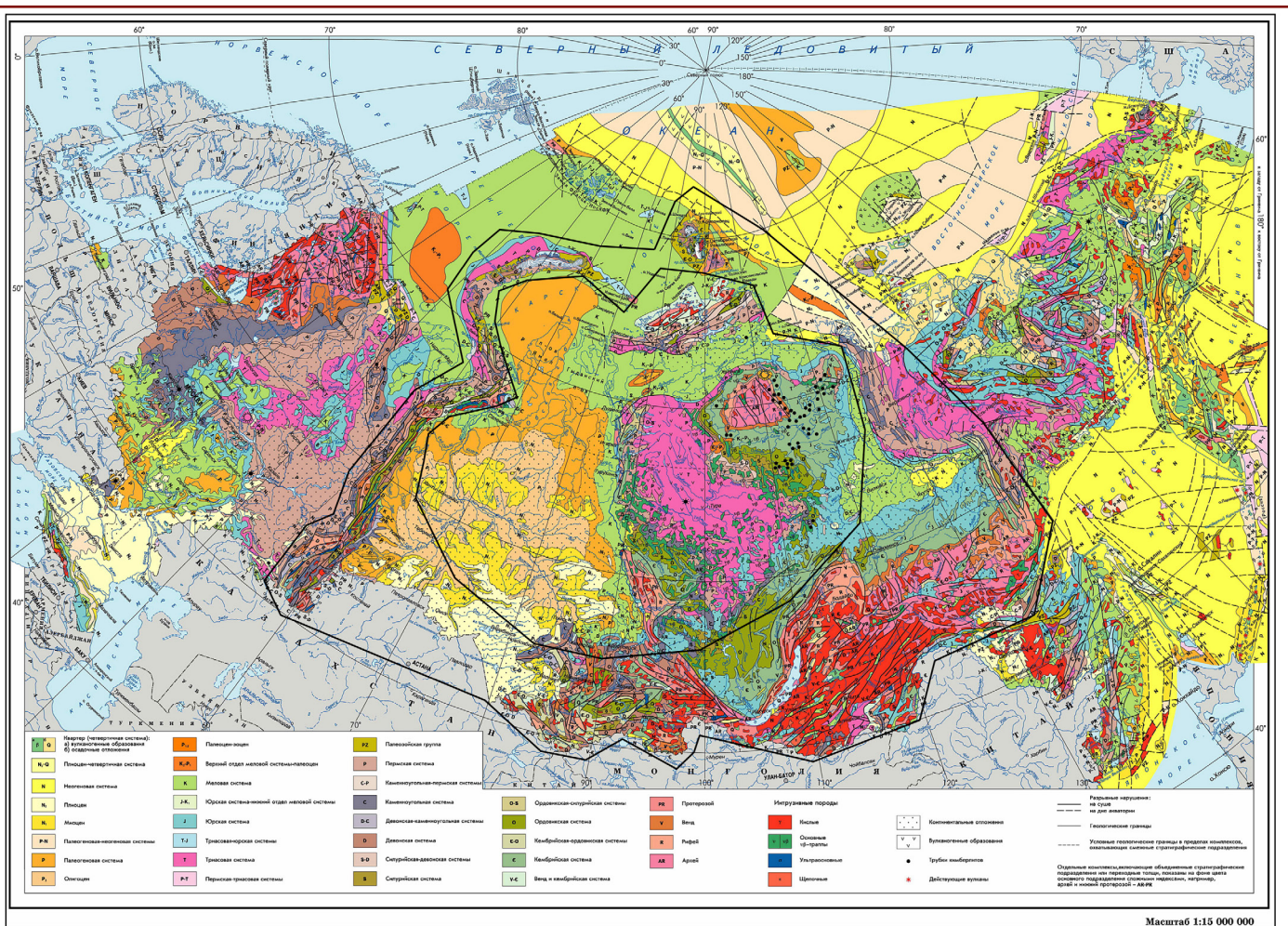
44. ábra.

M3+ földrengéssűrűség Szibériában 1990-től 2024-ig.

Forrás: ISC adatbázis

A geológiai struktúrák alapján olyan területeket azonosítottak, ahol a köpenyfúvóka különböző hatásokat gyakorolhat (45. ábra). Magának a köpenycsóvának a területét választották ki, ahol a hatás a magma és a fluid fázis (maggás gázok) behatolásával és nyomásával függhet

össze. A Kelet-szibériai platform és a Nyugat-szibériai-lemez marginális részein a köpenycsóva szeizmicitásra gyakorolt hatását valószínűleg a földkéreg sűrű tömbjeinek destabilizált helyzete okozza.



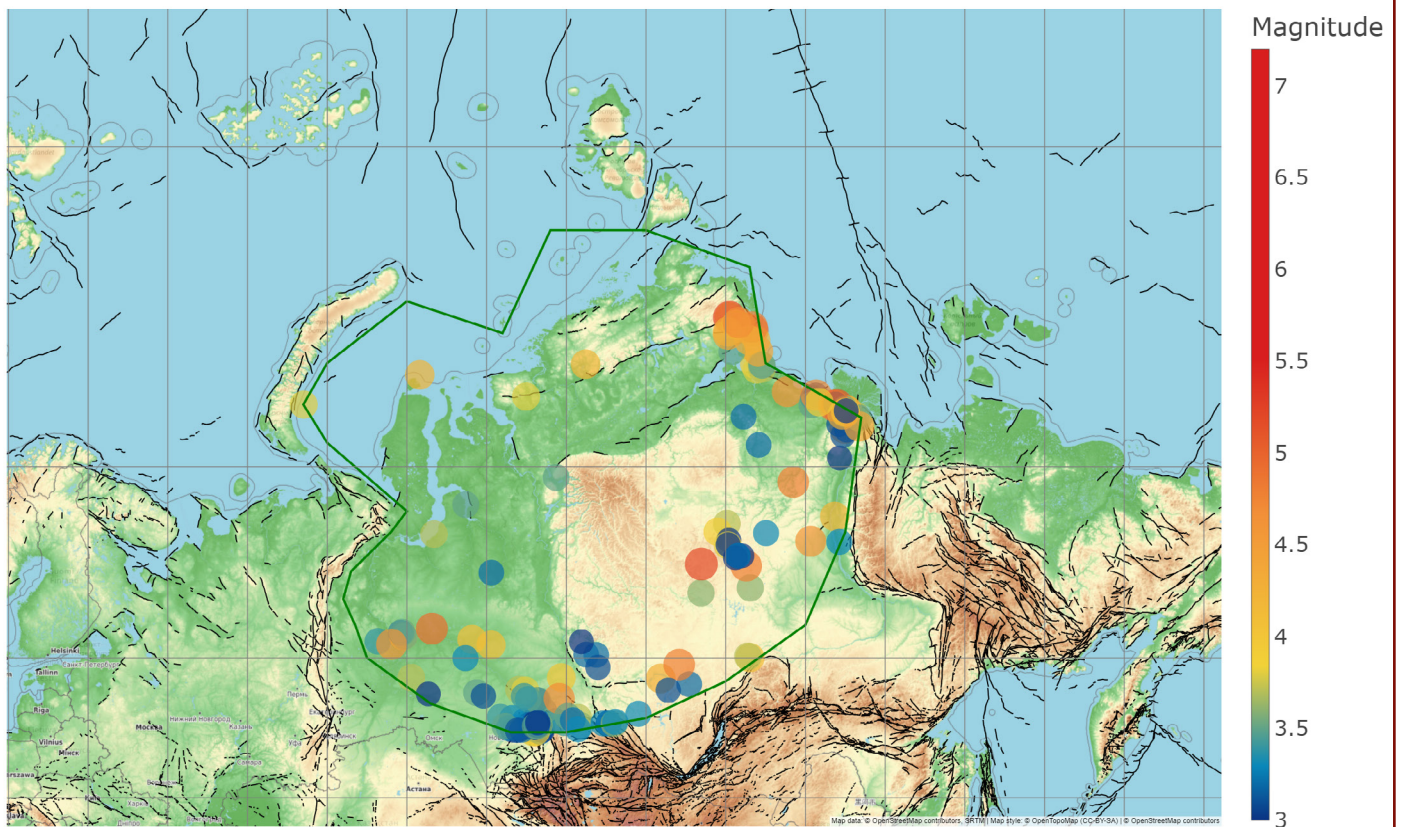
45. ábra.

A geológiai struktúrák által kiválasztott poligon a szibériai plume beágyazódásának és terjedésének régiójában (belső fekete poligon) a szeizmicitás elemzéséhez. A külső fekete sokszög a szibériai fűvóka által a lemezekre gyakorolt nyomásból eredő peremhatások régiójának felel meg.

Tekintsük, tehát, a szibériai köpenycsóva központi régiójában bekövetkező földrengéseket. A 46. ábra a 3,0 és nagyobb erősségű földrengések elhelyezkedésének térképét mutatja. A földrengéseket a Taymyr-félsziget déli részén regisztrálták. Különösen riasztó, hogy ebben a régióban a közelmúltban két 3,5 és 3,8 erősségű földrengés történt 2024 augusztusában,

illetve szeptemberében. Hasonló erősségű földrengéseket regisztráltak a Gydan-félsziget déli részén (M 3,5) és a Jamal-félszigeten (M 3,7 és M 4,2) 10 kilométeres mélységben. Ezeket a földrengéseket a szibériai köpenycsóva fejének lokalizációs zónájában regisztrálták, ami egy riasztó tendencia, amelyet a továbbiakban ismertetni fogunk.

M3+ földrengések, szibériai fűvóka régió



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

46. ábra.

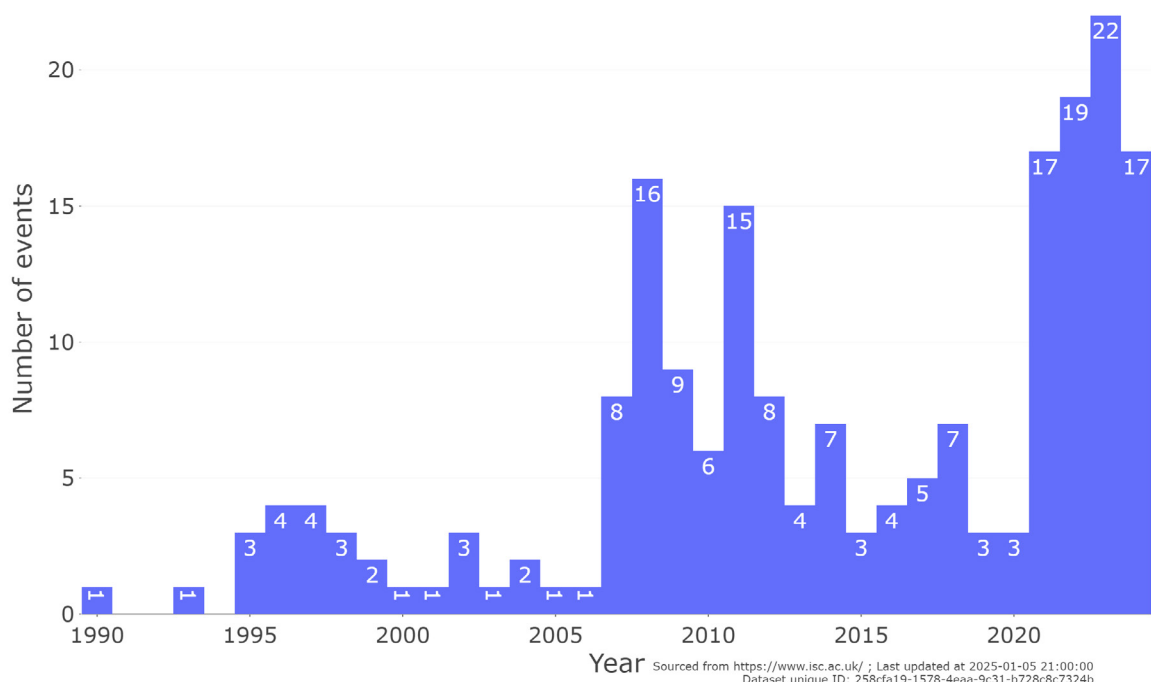
A 3,0-es és annál erősebb földrengések térképe a szibériai fűvóka térségében 1990 és 2024 között.

Adatbázis: ISC.

1990 és 2024 között összesen 205 3,0-es vagy annál erősebb földrengést regisztráltak a kiválasztott szibériai köpenycsóva régióban. 1995-ben a földrengések számának növekedése volt megfigyelhető (47. ábra), ami összhangban van a magmás aktiválódással összefüggő, 1995-ben az egész bolygón megfigyelhető növekvő szeizmicitás tendenciájával. 2007 óta a szeizmikus aktivitás fokozatos csökkenése

mellett a földrengések számának jelentős növekedése figyelhető meg. A földrengések száma 2021 óta ismét meredeken emelkedett, meghaladva a korábbi éves arányokat. A szeizmikus aktivitás hullámszerű növekedése figyelhető meg tehát a szibériai plume térségében. Az elmúlt években folyamatosan érezhetően több eseményt regisztráltak, mint ami korábban jellemző volt erre a területre.

M3+ földrengések, szibériai fúvóka régió



47. ábra.

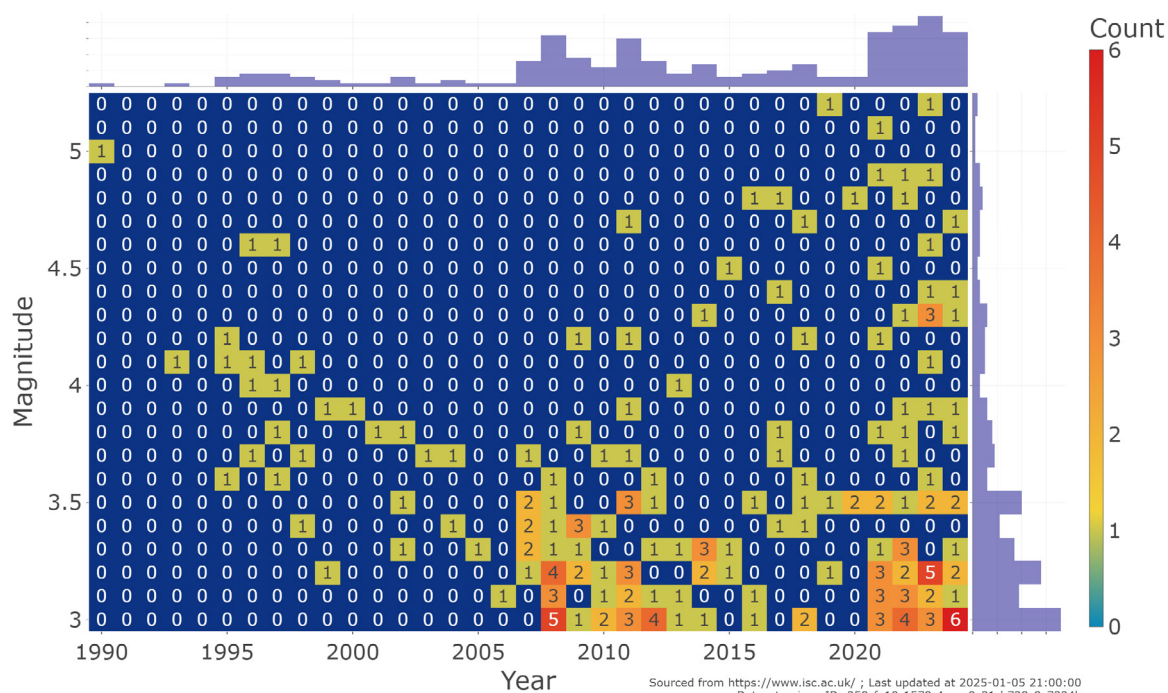
A 3,0-es vagy annál erősebb földrengések száma a szibériai földfelszín térségében 1990 és 2024 között

Adatbázis: ISC

Az 1990-es 5,0 magnitúdójú földrengés után fokozatosan csökkent a földrengések erőssége és száma (48. ábra). 1990 és 2007 között mindössze 3, 4,5 magnitúdó feletti földrengést regisztráltak. 2007 óta a földrengések erőssége fokozatosan növekszik. Az 5,1-es és 5,2-es erősségű földrengések először jelennek meg a

2019-es megfigyelések történetében. A 4,5-es és annál nagyobb erősségű földrengések mindegyike a plumkeretben található (49. ábra), némelyikük stabil területekre korlátozódik, ahol nincsenek ismert törések.

M3+ földrengések, szibériai fúvóka régió

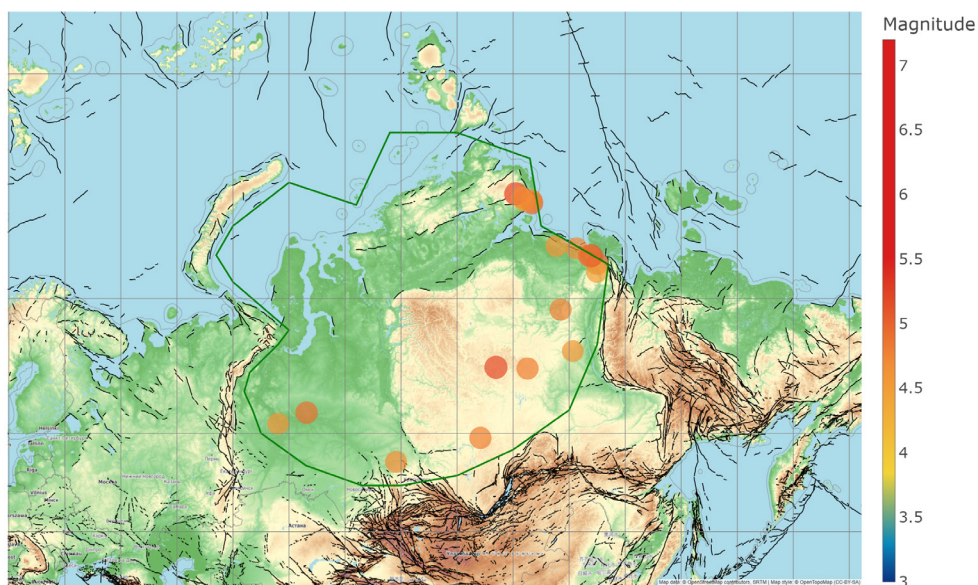


48. ábra.

A szibériai plume térségében 1990 és 2024 között bekövetkezett földrengések eloszlása magnitúdó szerint.

Adatbázis: ISC

M4,5+ földrengések, szibériai fúvóka régió



49. ábra.

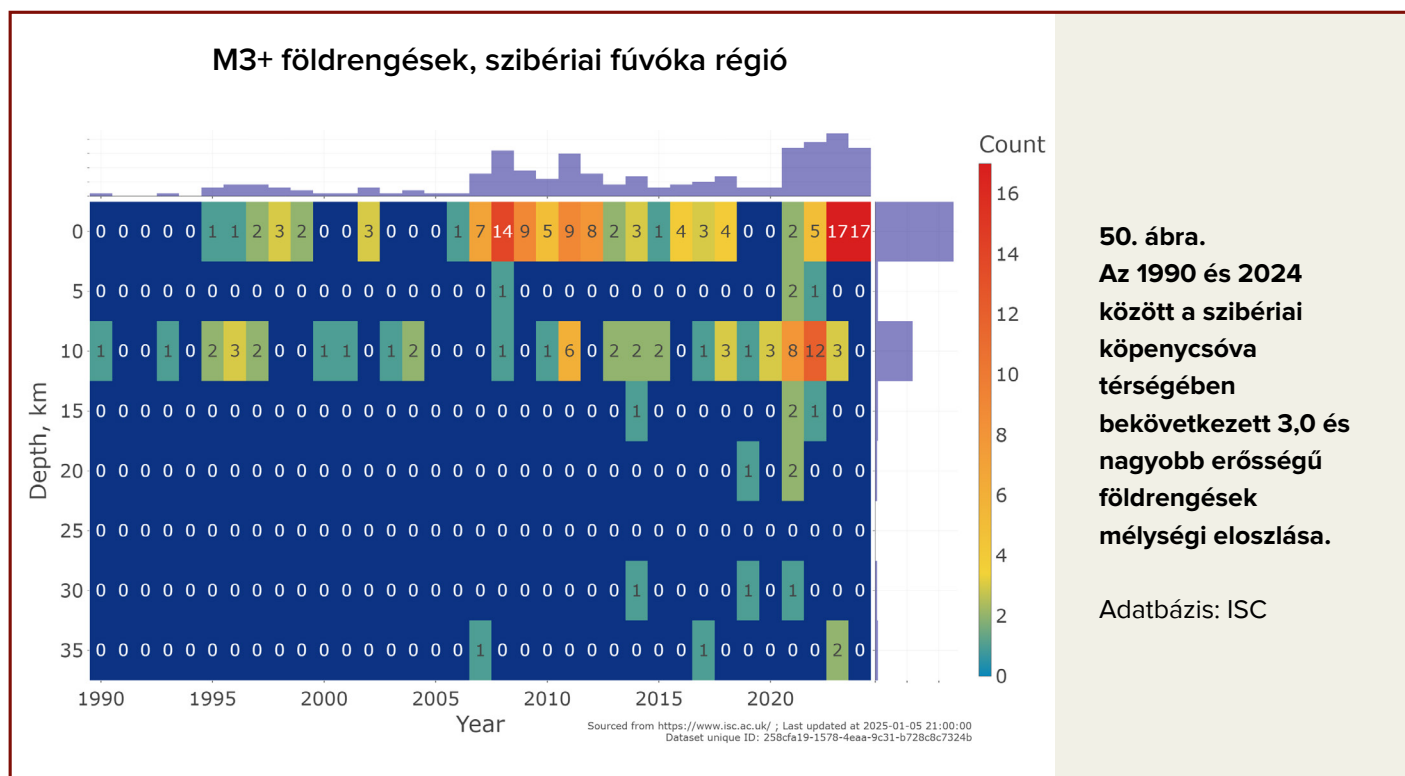
A 4,5 és annál nagyobb erősségű földrengések térképe a szibériai fúvókarégióban 1990 és 2024 között.

Adatbázis: 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

Szintén 2007-ben regisztráltak először 3,7-es erősségű földrengést 33 km mélységben, a Moho-határ közelében (50. ábra). 2014 után sokkal gyakoribbá váltak a kéreg aljához közeli, 30-35 km mélységben bekövetkező

földrengések, amelyek erőssége elérte az 5,0-es erősséget. Ezek mindegyike a feltételezett fúvóka-központ perifériája mentén helyezkedett el.



A szibériai köpenycsőva feltételezett helyének területén bekövetkezett földrengések fenti elemzése a szeizmicitás hullámszerű növekedését mutatja: a földrengések száma növekszik, a földrengések nagysága növekszik, és nagyobb mélységű földrengések jelentek meg. Ez a lemez deformációs folyamatait jelzi az alulról érkező magma kolosszális nyomásának hatására. E folyamatok előrehaladása a közeljövőben elkerülhetetlenül a szibériai plume kitöréséhez fog vezetni a következő okok miatt.

A kelet-szibériai kráter alapját magmás és metamorf kőzetek cementálják, amelyek a 250

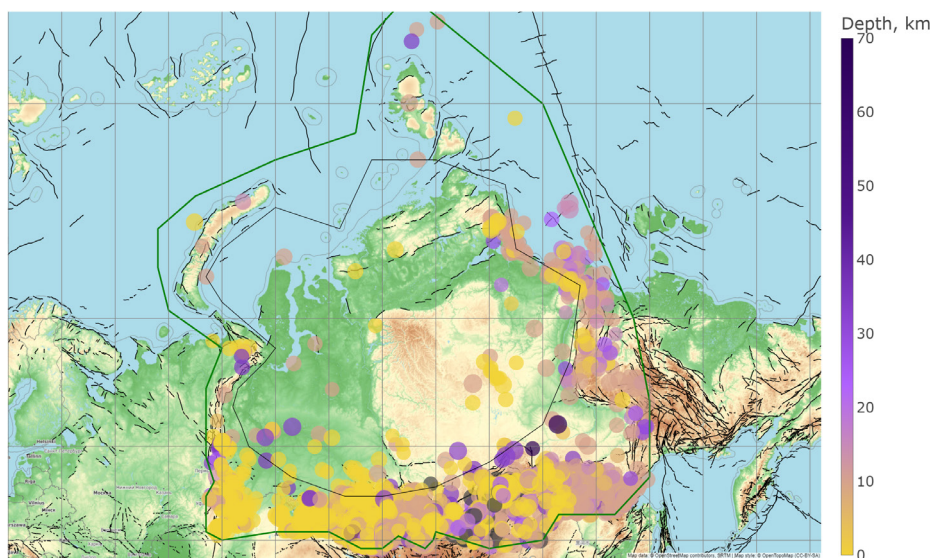
millió évvel ezelőtti kitörések eredményeként kialakult sűrű monolitikus kérget alkotnak. A 7,0-es vagy annál nagyobb erősségű erős földrengések előfordulása ebben a régióban arra utalna, hogy a szibériai kráter platformszerkezeteiben a kőzet szilárdsági határát meghaladó deformációk tapasztalhatók. Annak megértéséhez, hogy a monolitikus szibériai kráter hogyan szakadhat fel a plume nyomásának hatására, azt a példát hozhatjuk fel, hogy az üveg egy pillanatra megreped, mielőtt teljesen szilánkokra törik.

Jelenleg a magmás szibériai köpenycsóva területén a köpenycsóva előrehaladásának és a kéreg szilárdságának valós helyzetének megértéséhez további szeizmikus érzékelők telepítése, lehetőleg több kilométeres mélységben lévő fúrásokba, elengedhetetlen. Ez lehetővé teszi a kéreg és a köpeny részletes szeizmikus tomográfiai elemzését, valamint a köpenycsóva helyzetének és aktivitásának folyamatos nyomon követését (lásd „3. forgatókönyv: Tervezett, ellenőrzött

gázmentesítés”).

Figyelmet kell fordítani a földrengések mélységi eloszlására a szibériai köpenycsóva és peremzónái térségében (51. ábra). A Moho-határhoz közeli (30 km-nél nagyobb) mélységben és magában a köpenyben bekövetkező földrengések főként a redős régiókban fordulnak elő, és látható, hogy ezek a szibériai köpenycsóva feltételezett helyének régióját szegélyezik.

M3,5+ földrengések, szibériai fúvóka régió



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. ábra.

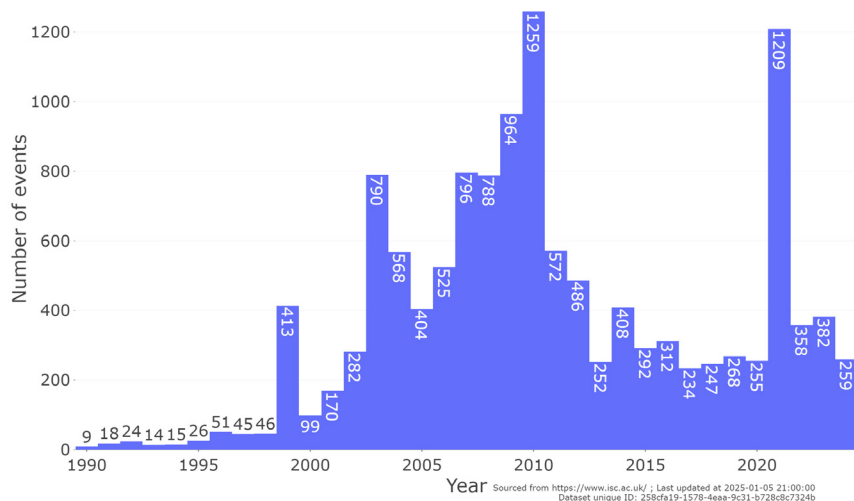
A 3,5-es és annál erősebb földrengések térképe a szibériai köpenycsóva térségében 1990 és 2024 között. A színskála a mélységi értéknek felel meg.

Adatbázis: ISC.

Tekintsük a szeizmikus aktivitást csak a szibériai köpenycsóva peremterületein. Geológiailag ezek a területek a szeizmikusan aktív területekhez, a hajtásövekhez tartoznak, amelyekben a szeizmicitást mind a tektonikus mozgások, mind a magmás fúvóka hatása okozhatja. A földrengések számának grafikonja a különböző szeizmicitási tényezők átfedésének vegyes képét mutatja (52. ábra). Egyes években jelentős szeizmikus kitörések láthatók. E folyamatok természetének pontosabb megértéséhez az egyes régiókat külön-külön kell vizsgálni.

A Laptev-tenger alján található verhojanszki hajtásszerkezetek és törések zónáját figyelembe véve (53. ábra) azt látjuk, hogy 2013-ban és 2021-2022-ben erős, 3,0 magnitúdótól kezdődő földrengéskitörések történtek (54. ábra). Az ilyen kitörések a magma intrúziójának szakaszaira jellemzőek, amelyek a földkéreg folytonosságának jelentős megbomlását és a fluid fázisok szökését okozzák a kőzetrepedéseken és a közeli töréseken keresztül. Az ilyen megnyilvánulásokat a kis erősségű földrengések számának növekedése és földrengésrajok, sőt néha földrengéssorozatok előfordulása is kíséri.

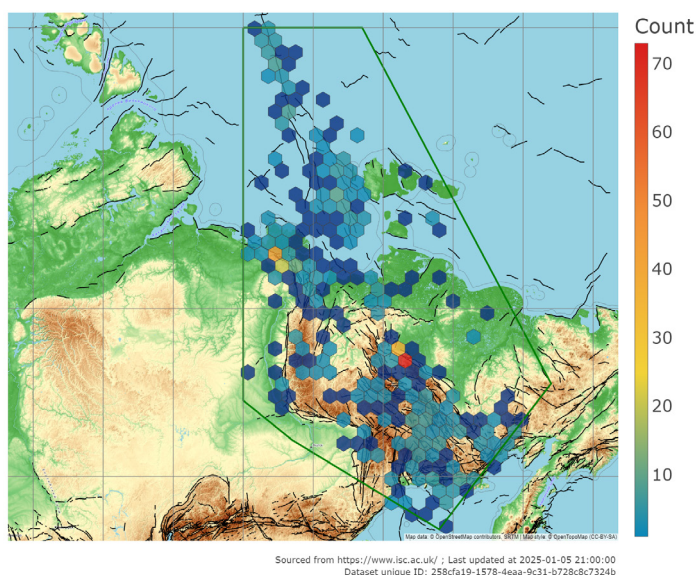
M3+ földrengések a szibériai fűvóka peremvidékén



52. ábra.

A 3,0 magnitúdójú és annál erősebb földrengések száma a szibériai köpenycsóva peremterületein 1990 és 2024 között. A poligonon belüli földrengéseket kizártuk (47. ábra).

M3+ földrengések sűrűsége, északkeleti rész

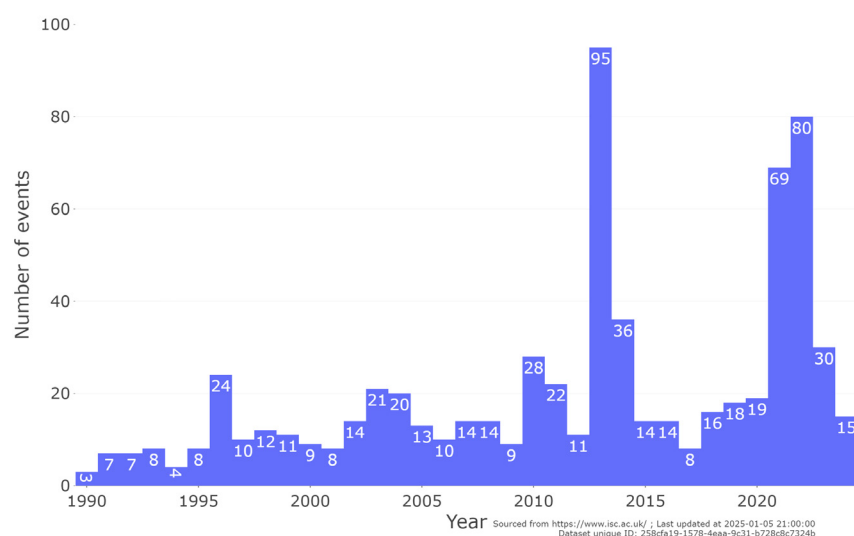


53. ábra.

A 3,0-nál nagyobb erősségű földrengések sűrűsége a földkéreg szibériai tömbjének északkeleti peremének kiválasztott területén 1990 és 2024 között. A törésvonalakat fekete színnel jelöltük.

Adatbázis: ISC

M3+ földrengések sűrűsége, északkeleti rész



54. ábra.

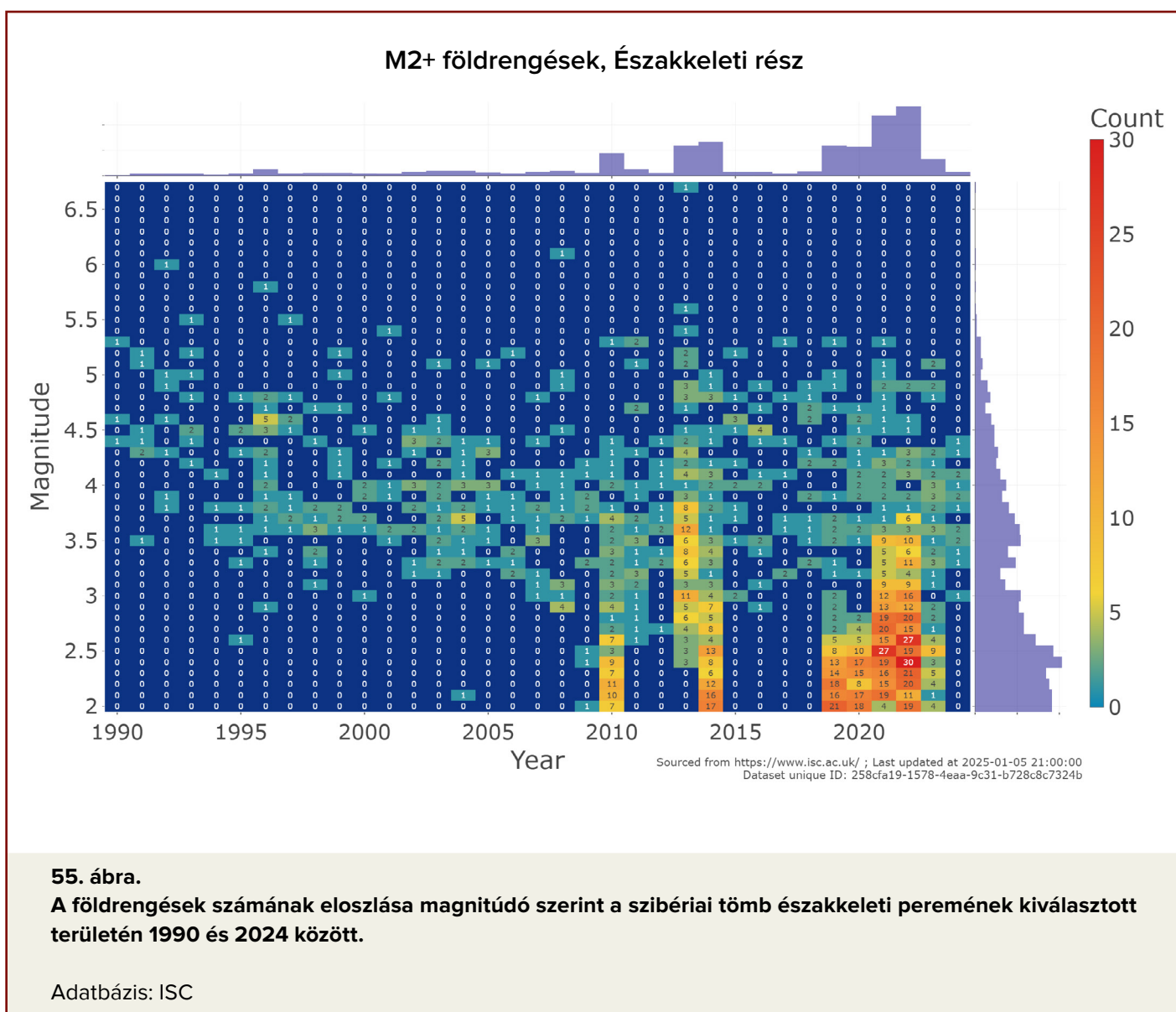
A 3,0 és annál nagyobb erősségű földrengések számának grafikonja a földkéreg szibériai tömbjének északkeleti peremének kiválasztott területén 1990 és 2024 között.

Adatbázis: ISC.

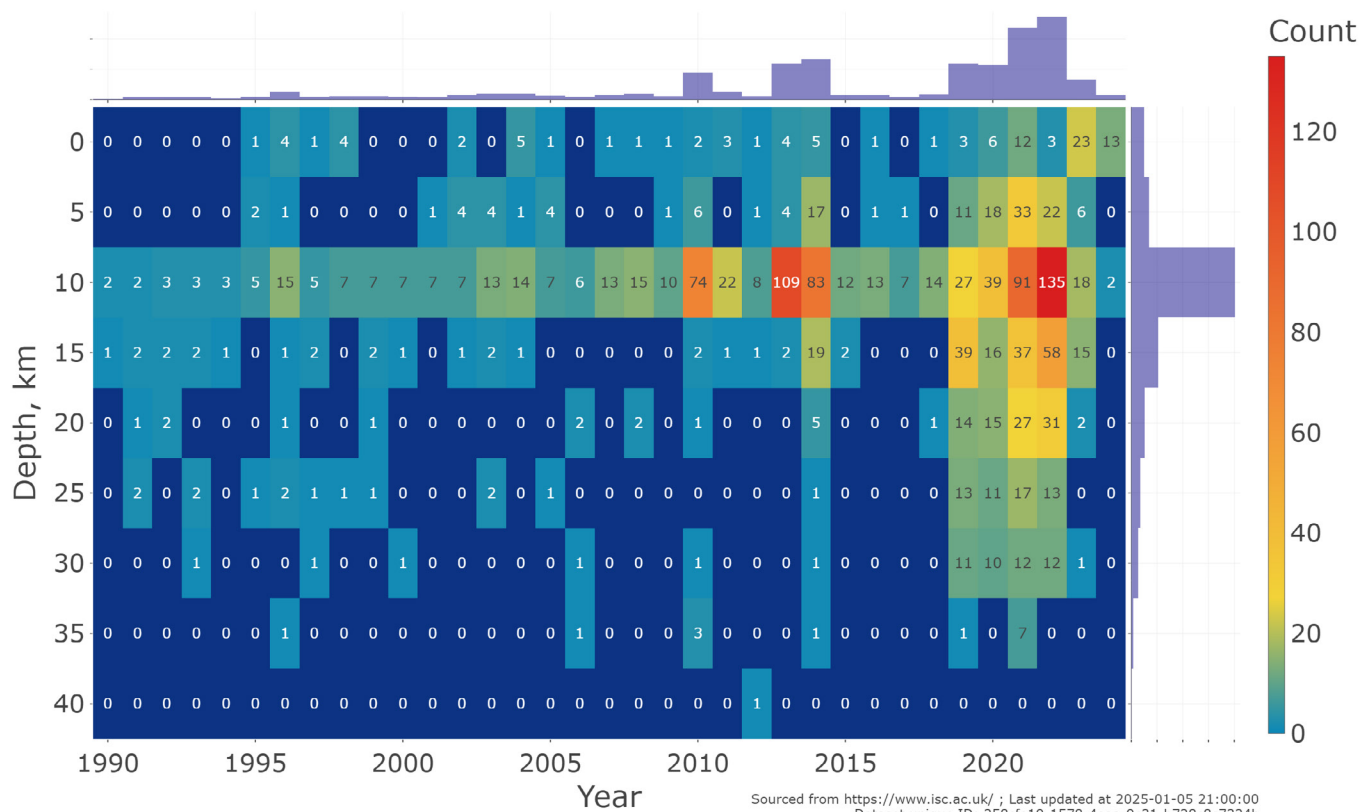
A földrengések erősségének vizsgálata ebben az övezetben azt mutatja, hogy a 2,0-3,5-es erősségű földrengések száma 2010-ben, 2013-2014-ben ugrásszerűen megnőtt, 2019-től pedig jelentősen megnövekedett (55. ábra). 2019 óta a földkéreg szinte az aljáig, 35 kilométeres mélységig ható földrengések számának jelentős növekedése is megfigyelhető (56. ábra). Ebben a régióban

2013-ban jelenik meg először egy 6,7-es erősségű földrengés, ami egyértelműen a feszültségfelhalmozódás vagy a felhalmozódott magmás fluidumok kirakódásának hosszú szakaszára utal.

Tekintsük külön a Taymyr-félszigettől délkeleti irányban bekövetkező földrengések egy csoportját (57. ábra).



M2+ földrengések, Északkeleti rész

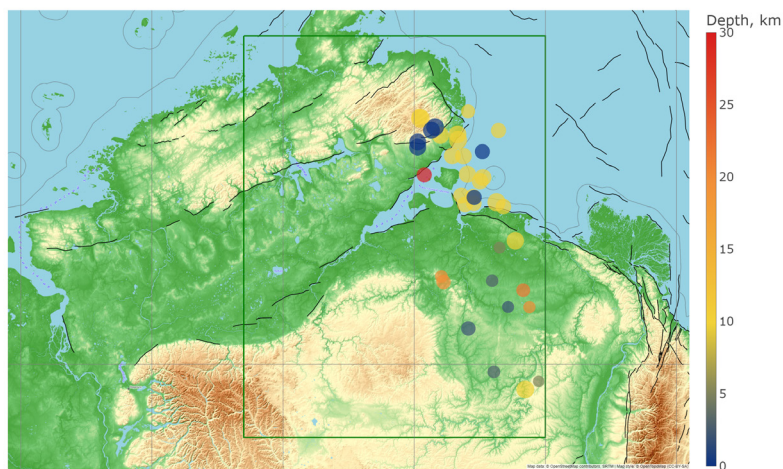


56. ábra.

A 2,0 és annál nagyobb erősségű földrengések számának mélység szerinti megoszlása a szibériai tömb északkeleti peremének kiválasztott területén 1990 és 2024 között.

Adatbázis: ISC.

M2+ földrengések, a Taimyr-félsziget északkeleti része



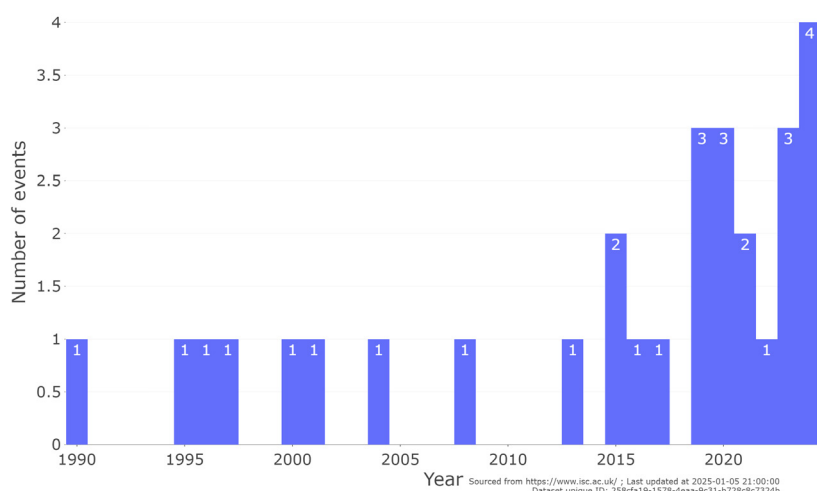
57. ábra.

A 2,0-nál erősebb földrengések eloszlási térképe a kiválasztott területen, a Tajmír-félszigettől északkeletre, 1990-től 2024-ig.

Adatbázis: ISC

2019-2020-ban itt is megugrott a kis és közepes erősségű szeizmikus aktivitás (58., 59. ábra).

M3+ földrengések, a Tajmyr-félsziget északkeleti része

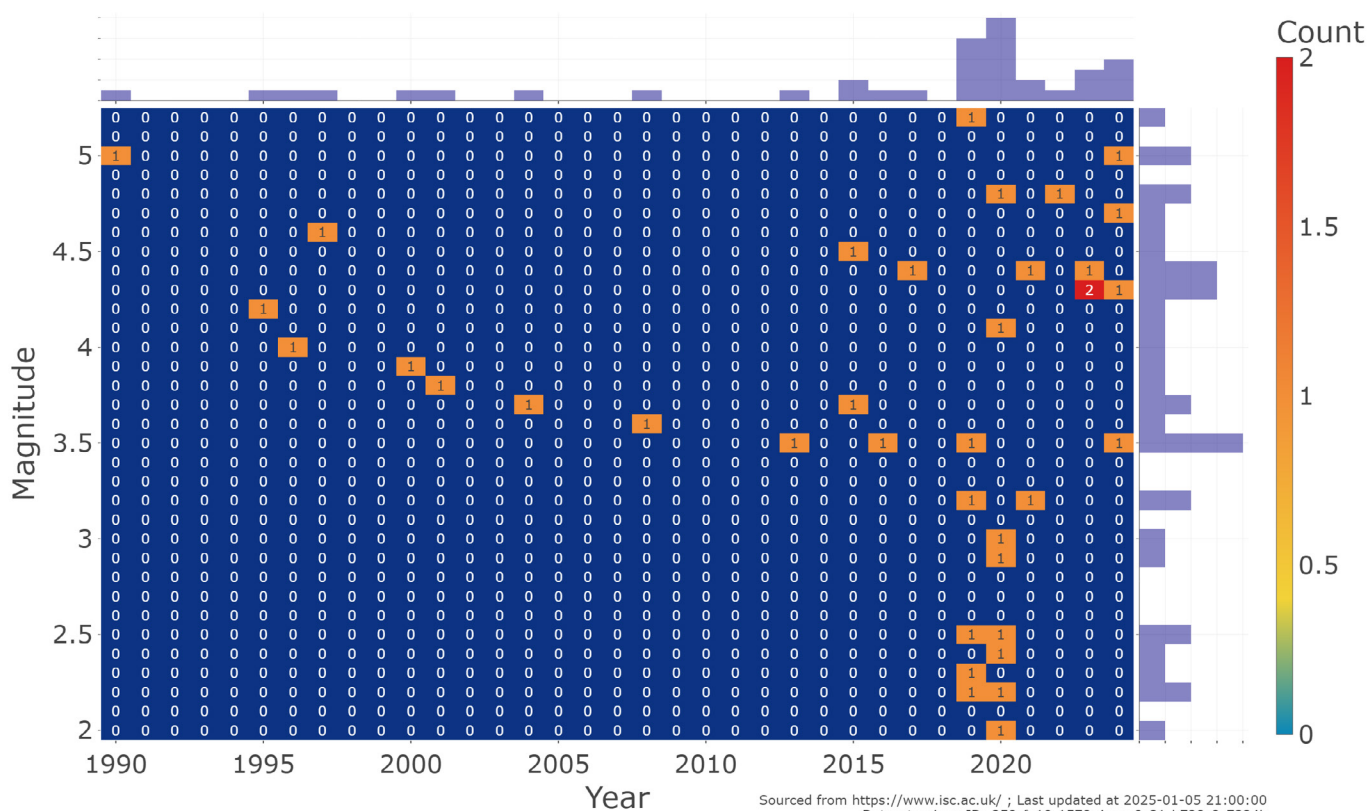


58. ábra.

A 3,0-es és annál erősebb földrengések számának grafikonja a kiválasztott területen, a Tajmyr-félszigettől északkeletre.

Adatbázis: ISC

M2+ földrengések, a Tajmyr-félsziget északkeleti része



59. ábra.

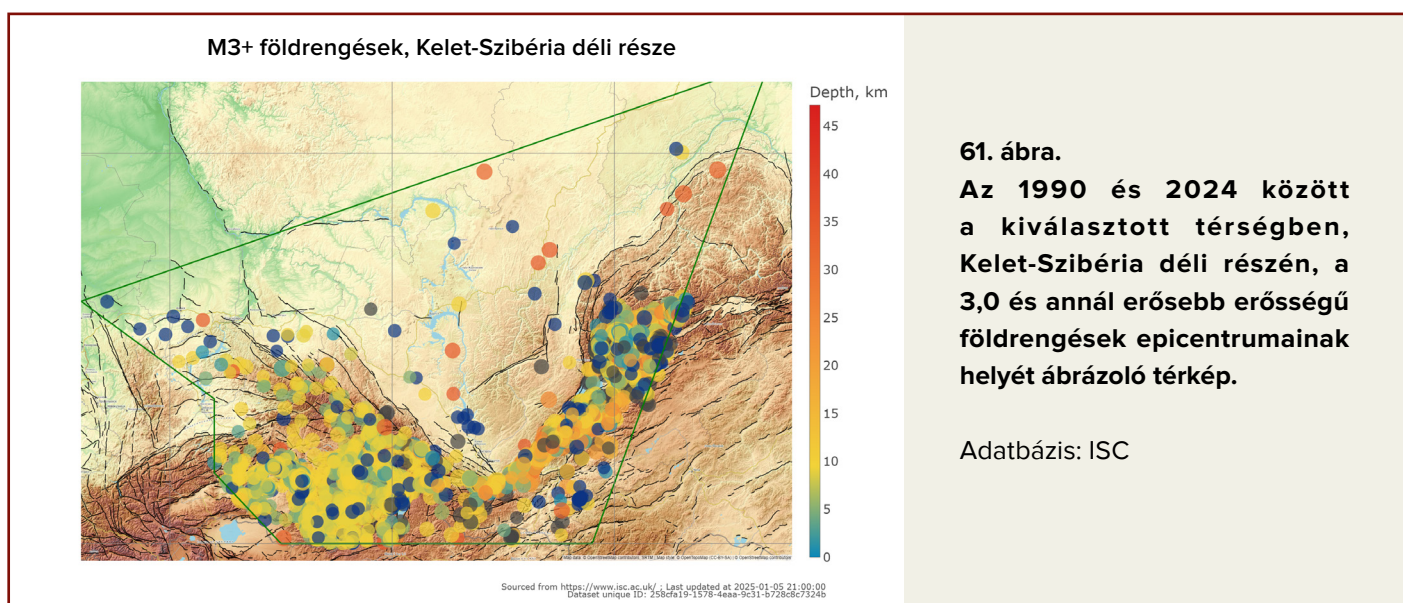
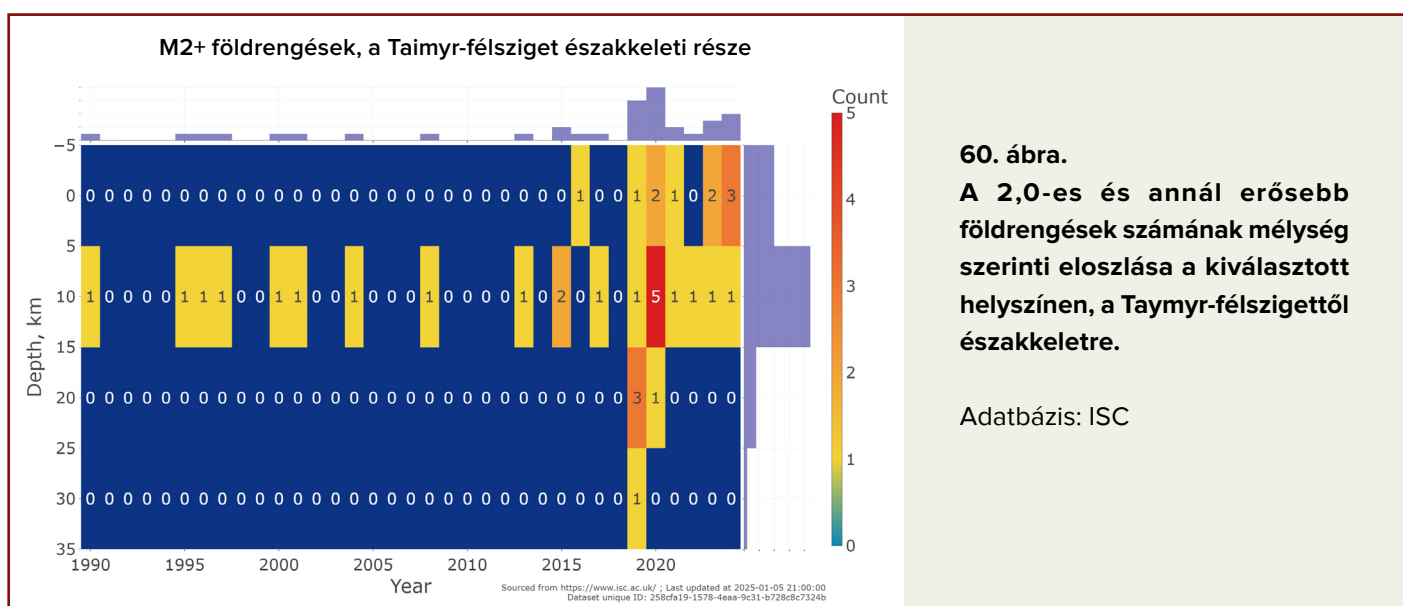
A kiválasztott területen, a Tajmír-félszigettől északkeletre bekövetkezett földrengések számának magnitúdó szerinti megoszlása 1990 és 2024 között.

Adatbázis: ISC

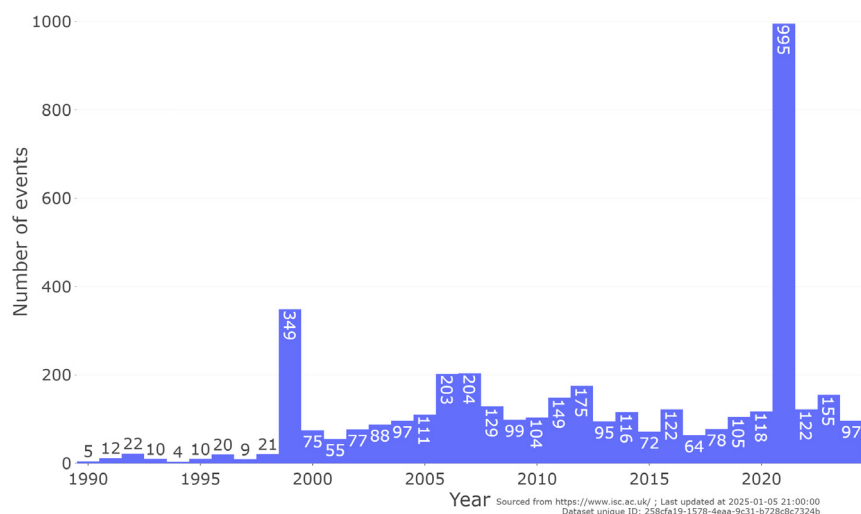
Szintén 2019-2020-ban a földrengések előfordulási mélysége a földkéreg aljáig (60. ábra) ugyanabban az időszakban növekszik, mint a verhojanszki hajtásszerkezet területén.

Hangsúlyozni kell, hogy ez a zóna a szibériai plume fejének befolyási területén helyezkedik el, és a földrengések alacsony száma ellenére hasonló tendenciát mutat a földrengések mélységének és számának növekedése tekintetében, mint a Verkhoyansk foldszerkezetek, csak 2019-től kezdődően.

A vizsgált terület déli része az Altaj-Szajáni-redő és a Bajkál-vidék területét foglalja magában (61. ábra). Ez egy tektonikailag mozgékony és szeizmikusan aktív régió. Itt 1999-ben és 2021-ben földrengéshullámot észleltek (62. ábra). A földrengések erőssége 2007 óta növekszik, és 2021-ben eléri a 6,8-as értéket (63. ábra).



M3+ földrengések, Kelet-Szibéria déli része

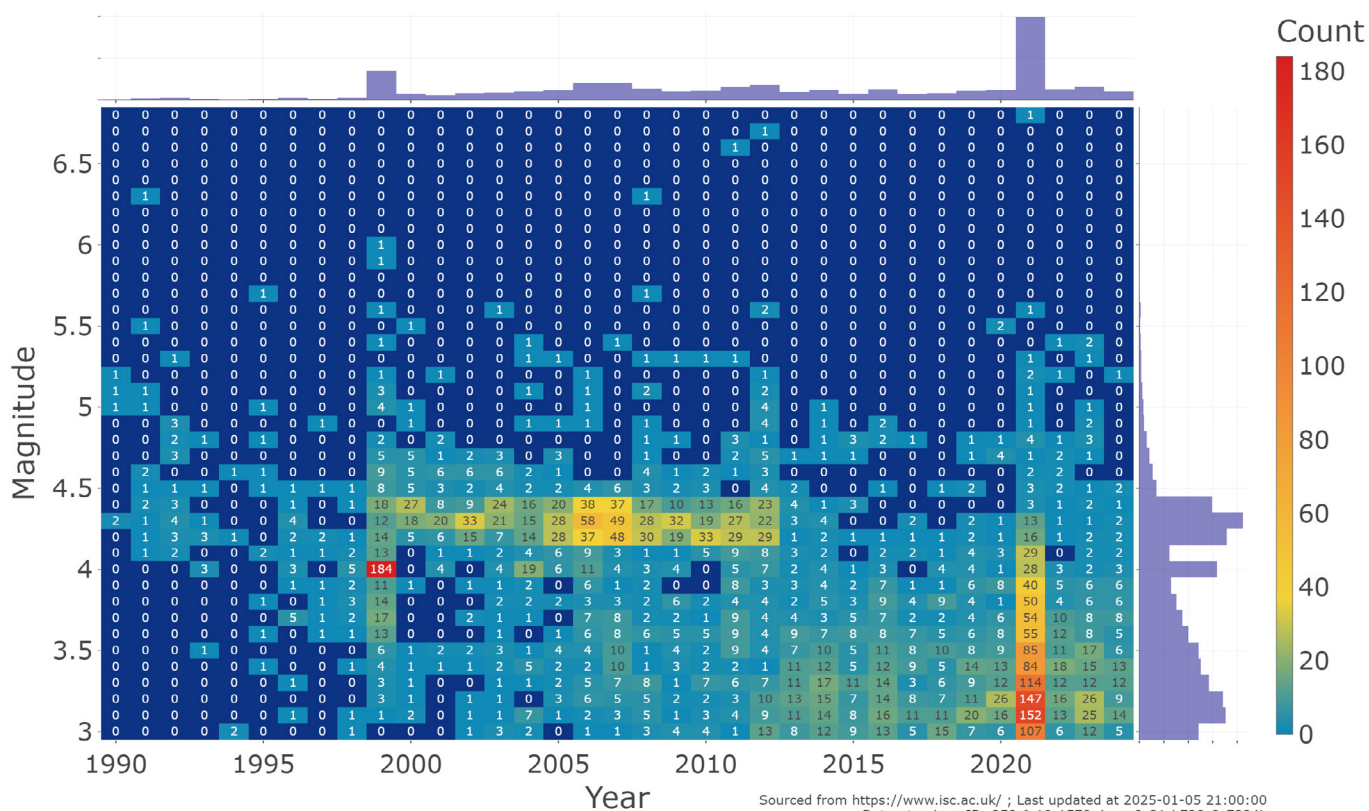


62. ábra.

A 3,0 magnitúdójú és annál erősebb földrengések száma Kelet-Szibéria déli részén.

Adatbázis: ISC

M3+ földrengések, Kelet-Szibéria déli része



63. ábra.

A földrengések eloszlása a kiválasztott térségben Kelet-Szibéria déli részén, 1990 és 2024 között, magnitúdó szerint.

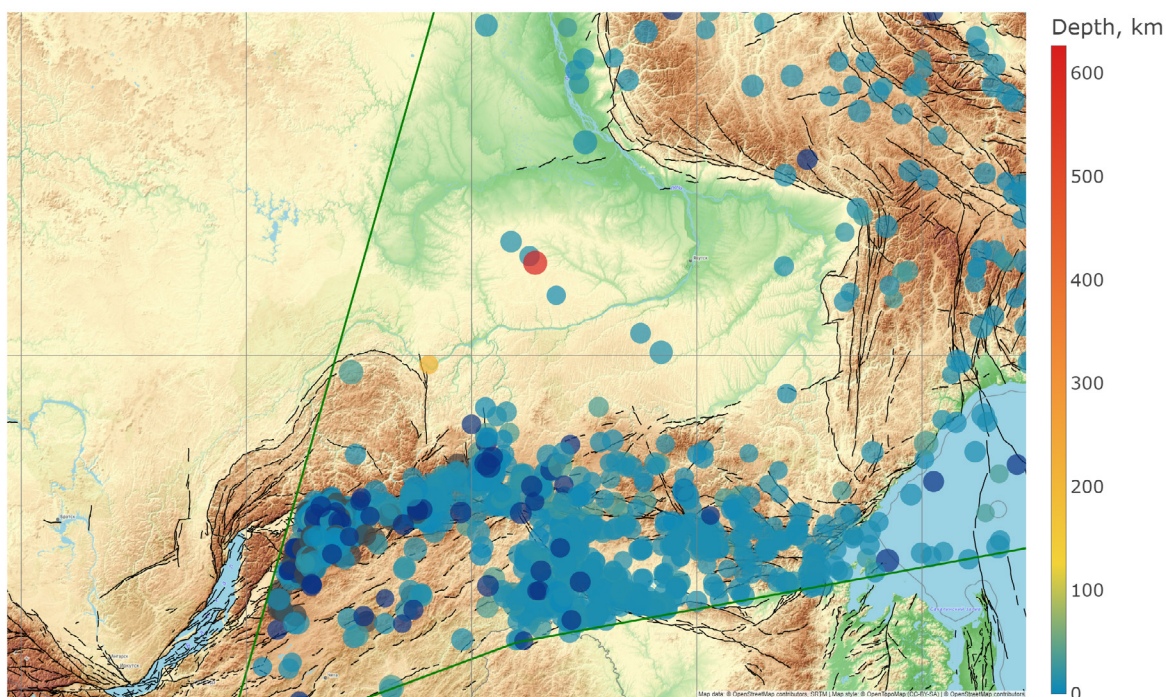
Adatbázis: ISC

Fontos megjegyezni a szibériai kráter alatti köpenyföldrengések megjelenését. Még 1998-ban a Vilyui szinkleózisban 211 kilométeres mélységben egy 3,3 magnitúdójú földrengést regisztráltak. Ez váratlan tény volt, de ennél sokkal egyedibb esemény egy jelentős, 5,1-es erősségű földrengés már 2023-ban, 627 km mélységben ugyanebben a régióban (64. ábra).

A mélyfókuszú szeizmicitás megnyilvánulása egy platformstabil kéregtömb alatt önmagában is egyedülálló esemény. Hagyományosan feltételezik, hogy az ilyen intramantilis földrengések az úgynevezett szubdukciós zónák mentén következnek be, de a legközelebbi ilyen zóna több ezer kilométerre van, és nem lehet hatása. A jelentés szerzői úgy vélik, hogy a mélyfókuszú földrengések okai hatalmas erejű intramantilis robbanások,

amelyek akkor következnek be, amikor viszonylag forróbb magmafolyamok viszonylag hűvösebb folyamokkal érintkeznek. A szeizmikus tomográfiai modell szerint mindkét mélyfókuszú földrengés keletkezési helyén viszonylag viszkózusabb és folyékonyabb áramlásoknak megfelelő szeizmikus hullámsebesség-anomáliák figyelhetők meg, amelyek valószínűleg a hőmérsékletkülönbségeket tükrözik. Így ez a két köpenyföldrengés a viszonylag hideg és viszonylag meleg köpenyáramlások érintkezési pontjain nyilvánult meg (65. ábra), amelyek nagy energiakibocsátásokat okoztak, amelyek a szeizmikus érzékelők által földrengésként regisztrált akusztikus hullámokat generáltak. Ez egyértelműen a köpenyáramlások jelentős aktivitására utal ebben a régióban.

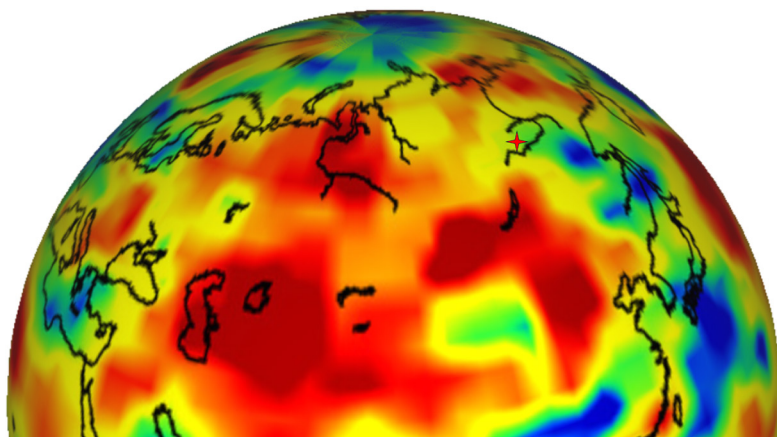
A mélységi földrengések helye Szibériában



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

64. ábra.

A térképen a 2023-as 5,1-es erősségű mélyfókuszú földrengés epicentruma látható 627 km mélységben (piros jelölés) a Szibériai Platform alatt, valamint az 1998-as M 3,3-as erősségű földrengés epicentruma 211 km mélységben (sárga jelölés).



65. ábra.

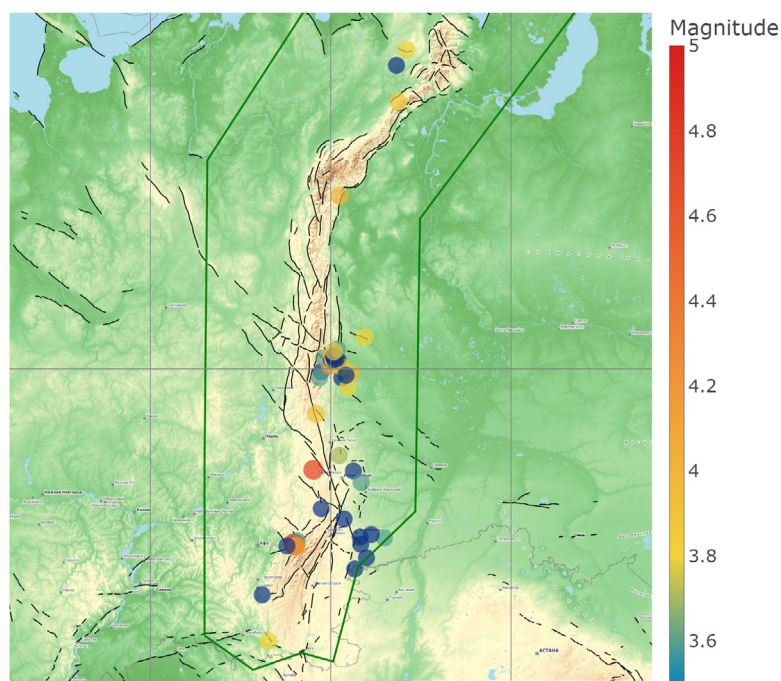
Csökkent szeizmikus hullámsebességek zónái a köpenyben kb. 600 km mélységben. A 2023-as 5,1-es erősségű földrengés hipocentruma a köpeny viszonylag meleg és viszonylag hideg régiói közötti érintkezési zónába esik.

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

A szibériai tömb peremrészeinek ringatózása a szeizmikus aktivitás növekedését okozza az Urál térségében. Az elemzéshez felhasznált adatokat úgy szűrték, hogy figyelembe vették a bányászati tevékenység által keltett kőzetlökéseket. A 3,5-ös vagy annál nagyobb

magnitúdót is kiválasztották, hogy az ember okozta eseményeket pontosan kizárják (66., 67. ábra). Következésképpen a szeizmicitás megfigyelt hullámszerű növekedése természetes folyamatokat tükröz.

M3,5+ földrengések az Urálon

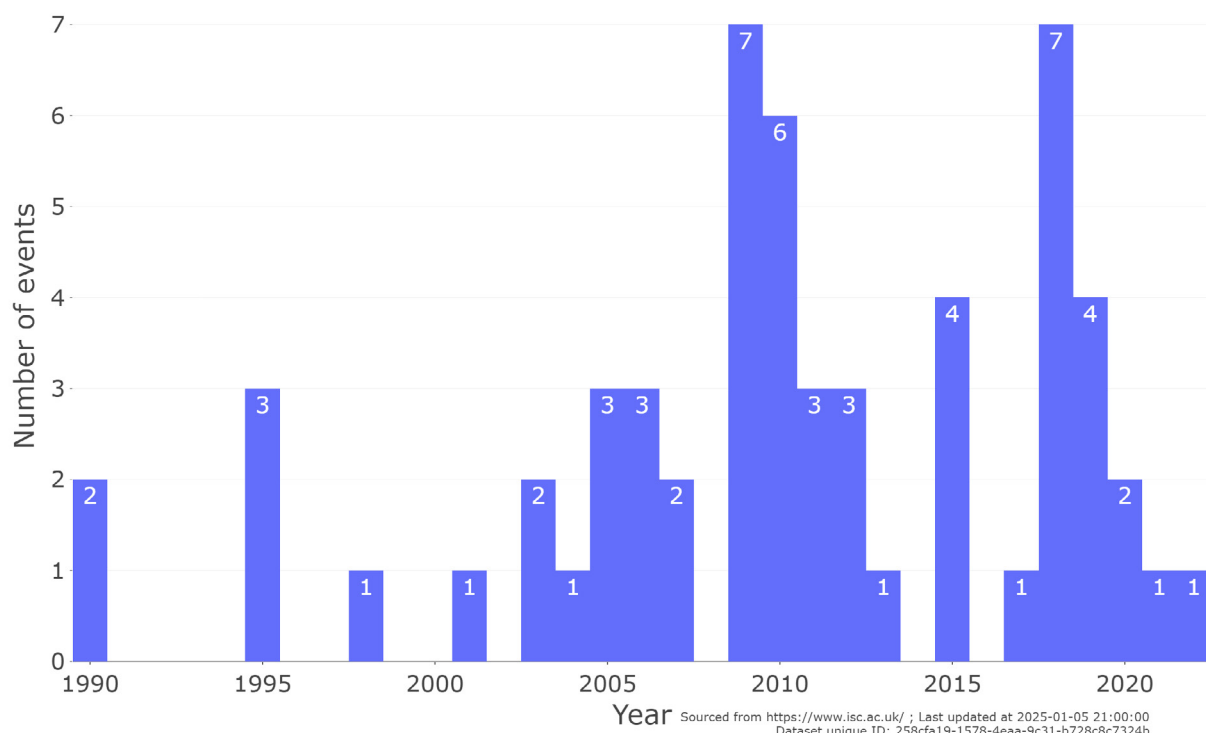


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

66. ábra.

Az Urál régióban 1990 és 2022 között regisztrált 3,5-ös vagy annál nagyobb erősségű földrengések epicentrumainak elhelyezkedési térképe.

M3,5+ földrengések az Urálon

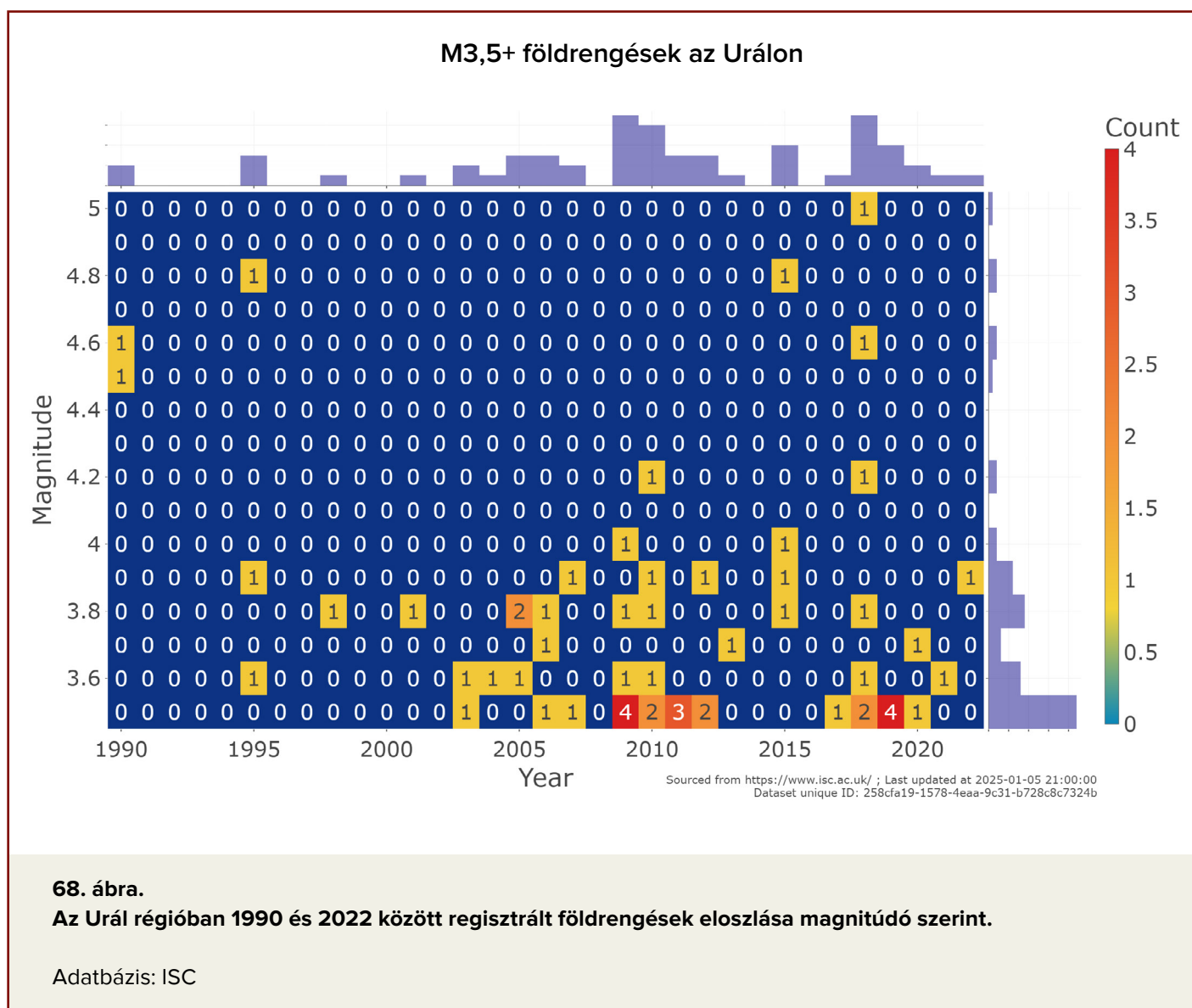


67. ábra.

Az Urál régióban 1990 és 2022 között regisztrált 3,5-ös vagy annál nagyobb erősségű földrengések száma.

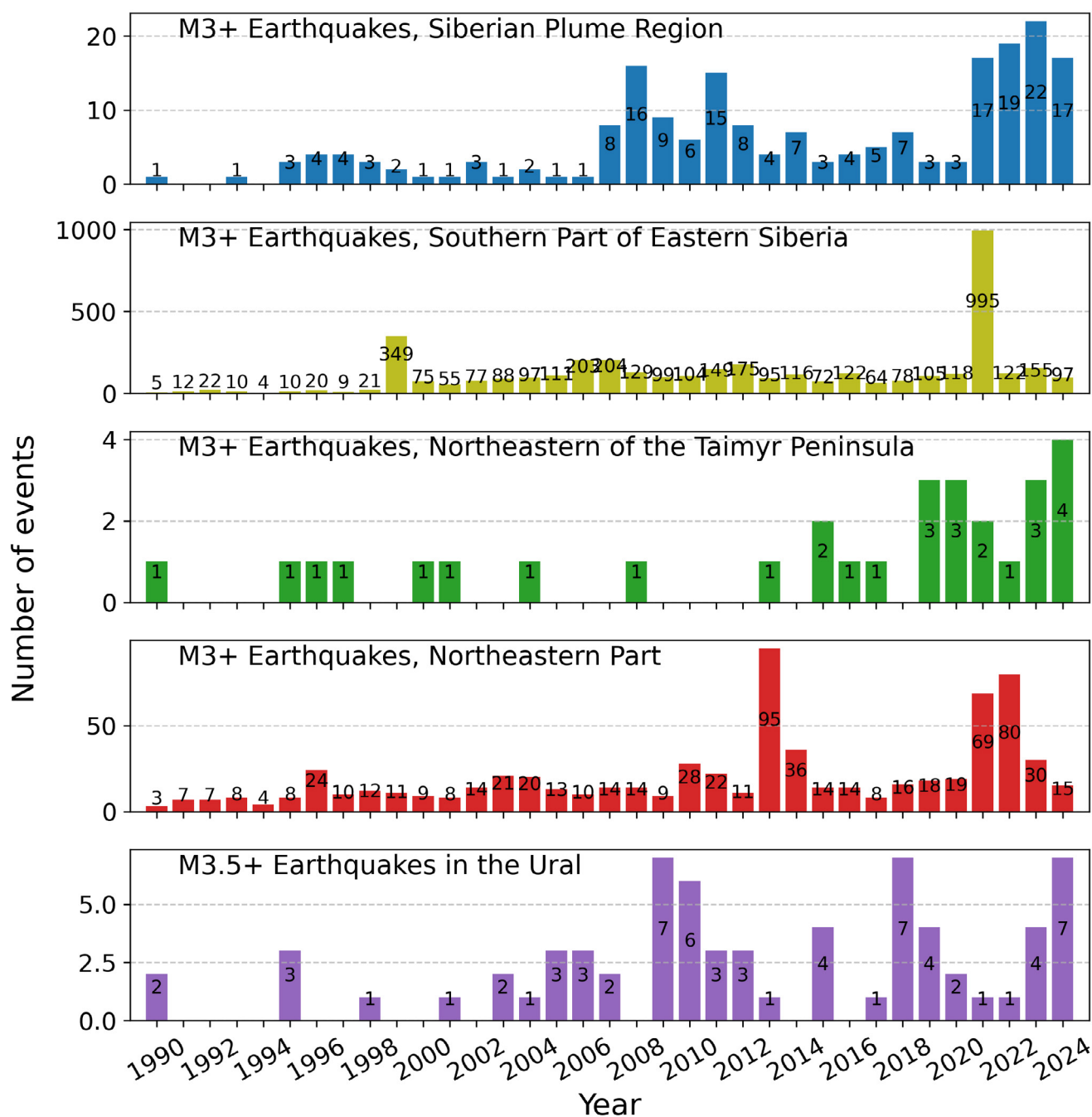
Emellett a régióban megjelentek a 4,0-5,0 magnitúdójú földrengések is, ami szintén a földrengések természetes növekedését jelzi

(68. ábra). A szeizmicitás növekedése az uráli régióban nem szisztematikusan, hanem hullámokban történik, ami természetes mintázat.



A szibériai köpenycsóva régió különböző részein és környékén a szeizmikus aktivitáscsúcsok időzítésének összehasonlítására egy grafikon készült (69. ábra). A 2021-es évben az Ural kivételével minden vizsgált régióban emelkedik a szeizmikus aktivitás. A grafikon azt mutatja, hogy a szeizmikus aktivitás minden régióban előfordul, és az elmúlt években növekedett. A növekedés nem egyszerre, hanem hullámokban és pulzáló kitörésekben jelentkezik a különböző régiókban. Van egy bizonyos mintázat, amely a lemez fokozatos billegésére hasonlít nyugatról keletré és északról délre.

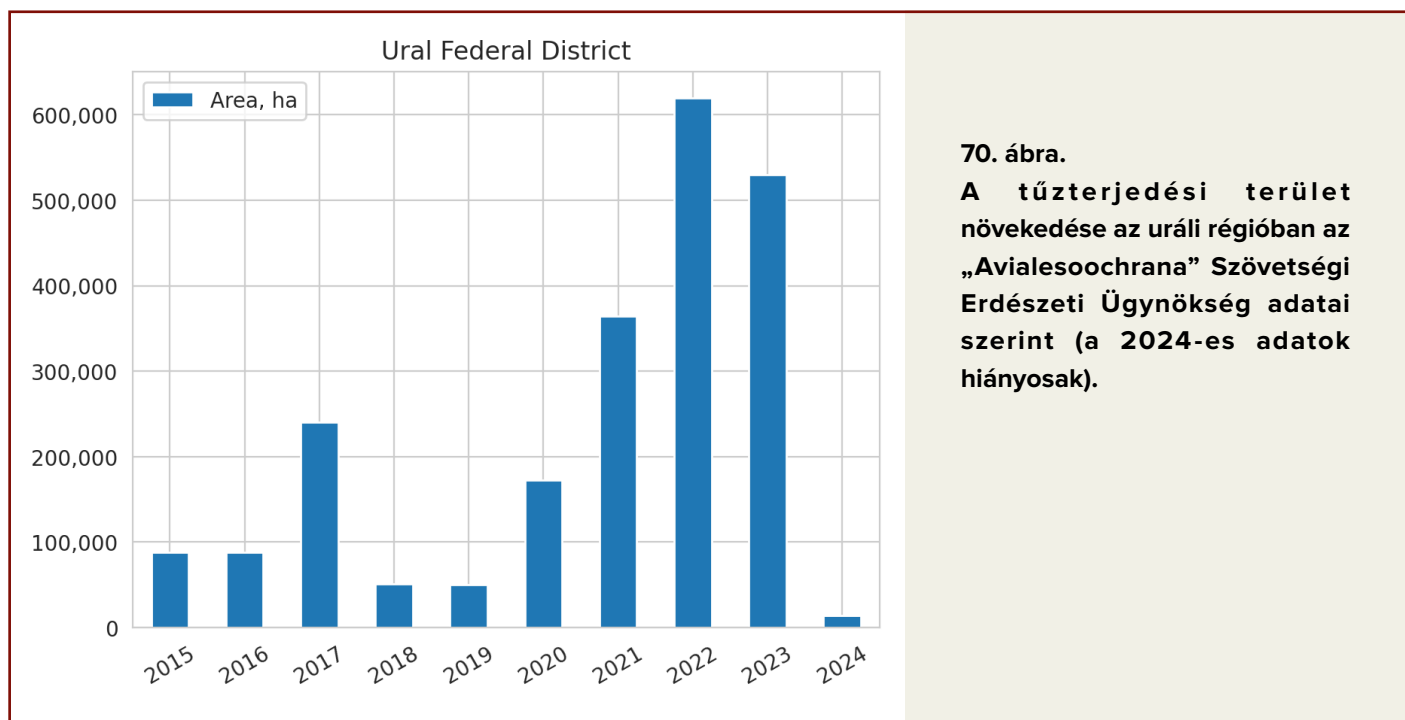
Tekintsük az erdőtüzek megnyilvánulását egyes régiókban. A tüzek területének növekedése egy régióban a felszín alatti aktivitás növekedését jelzi, mivel a tüzek gyakran olyan töréseknél keletkeznek, ahol gyúlékony gázok távoznak. Az ilyen tüzeket nehéz eloltani, és rendkívül gyorsan terjednek nagy területekre. Az uráli régióban a természetes tüzek területe 2020-tól kezdődően jelentősen megnövekszik (70. ábra). Az ábra a Szövetségi Erdészeti Ügynökség „Avialesoochrana” adatain alapul.



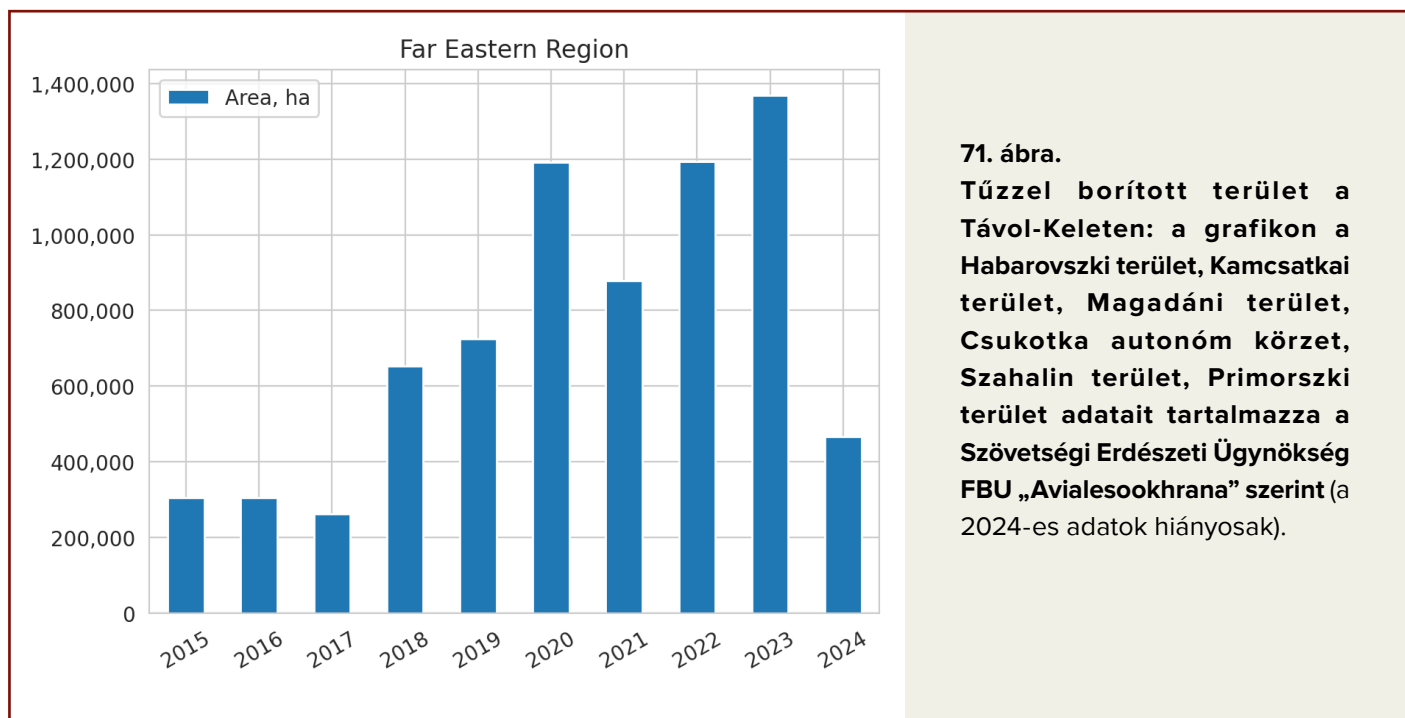
69. ábra.

A szeizmikus aktivitási csúcsok eloszlása a Verhojanszki régióban (a Szibériai Platformtól keletre), Kelet-Szibéria déli részén, az Urálban (Kelet-Szibériától nyugatra) és Szibéria középső részén (beleértve a Nyugat-Szibériai Lemezt és a Kelet-Szibériai Platformot) évenként. A 3,0-es erősségű és erősebb földrengések.

Adatbázis: ISC



A távol-keleti régióban a tüzek által lefedett terület szintén exponenciálisan növekszik, amit jól mutat a grafikon (71. ábra).

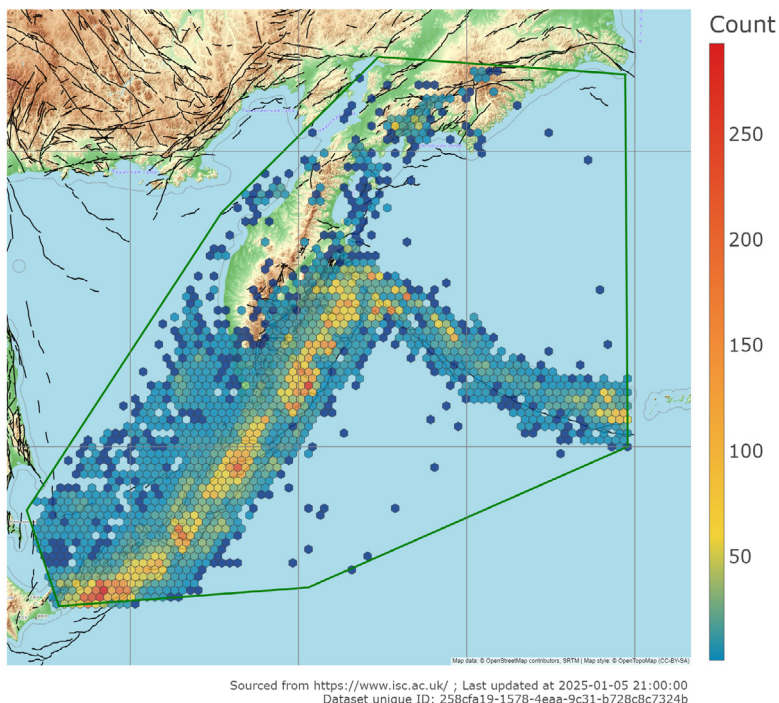


Így, a szibériai és távol-keleti kéregtömb másik oldalán, a Csendes-óceáni lemezzel való határon hasonló tűznövekedési folyamatok játszódnak le.

Feltételezzük, hogy a szibériai köpenycsóva bevezetése a Kuril-Kamcsatka régiót is érinti, mint a kontinentális kéregtömb végének a plume nyomása alatt álló régióját. A Kamcsatka és a Kuril-szigetek térségében a szeizmikus adatsorok elemzése a 4,0-es

és annál nagyobb erősségű földrengések számának jelentős növekedését mutatják (72., 73. ábra). A régió a csendes-óceáni tűzgyűrű része (74. ábra), és ennek megfelelően a szeizmicitás növekedésének tendenciáját mutatja e tektonikai struktúra tendenciáinak megfelelően. A legtöbb szeizmicitási kitörés azonban független jellegű. Ez arra utalhat, hogy a szibériai köpenycsóva saját befolyással van a Kamcsatka és a Kuril-szigetek térségére.

**M4+ földrengések sűrűsége
a Kamcsatkai-félszigeten és a Kuril-szigeteken**

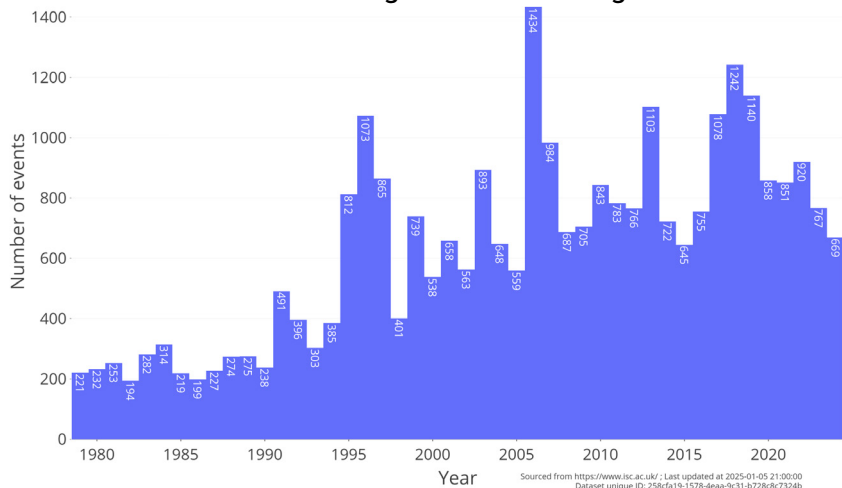


72. ábra.

A 4,0 és annál erősebb földrengések sűrűsége a Kamcsatka-félsziget és a Kuril-szigetek térségében, 1979-2024.

Adatbázis: ISC.

**M4+ földrengések sűrűsége
a Kamcsatkai-félszigeten és a Kuril-szigeteken**

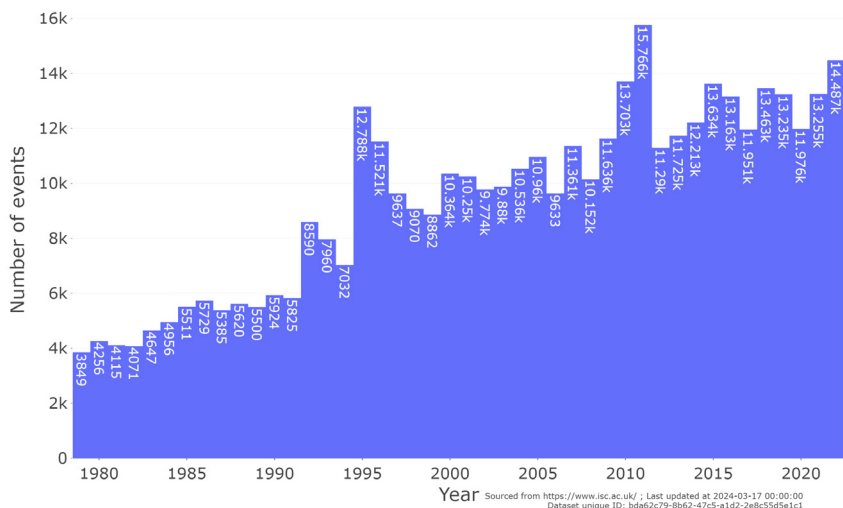


73. ábra.

A 4,0-es vagy annál erősebb földrengések számának növekedése a Kamcsatkai-félsziget és a Kuril-szigetek térségében, 1979-2024.

Adatbázis: ISC.

M4+ földrengések a Tüzgyűrűn 1979-2022 között



74. ábra.

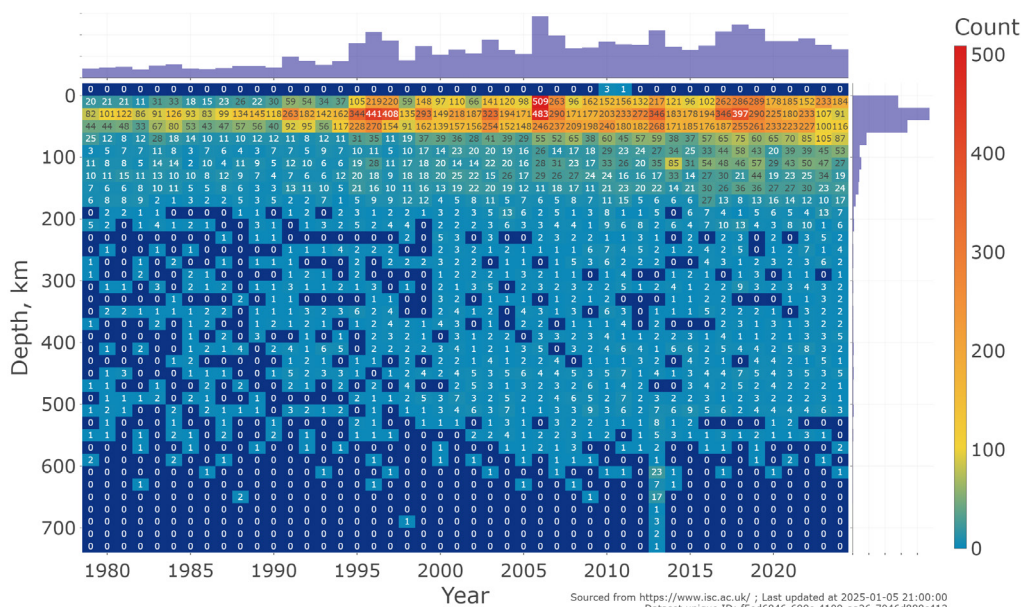
A 4,0-es és annál erősebb földrengések számának növekedése a Tüzgyűrű térségében, 1979-2022.

Adatbázis: ISC.

Érdemes megjegyezni, hogy a Kurilo-Kamcsatka régióban a földrengések mélységének növekedése is megfigyelhető (75. ábra). Ez azt jelzi, hogy a litoszférolemezek találkozása a szibériai magmás köpenycsóva hatására egyre mozgékonyabbá válik. Várható a vulkánok aktivitásának növekedése a

Kuril-Kamcsatka régióban, valamint a mélységi magma gyors emelkedésének anomáliáinak megjelenése, összetételének gyors változása a vulkánkitörések során mélyebb mafikus magmákra. Ilyen összetételváltozást mélyebb összetételűre a Bezymjannyi vulkán mutatott a 2017-es kitörés során.⁴⁵

M4+ földrengések a Kamcsatkai-félszigeten és a Kuril-szigeteken



75. ábra.

A kiválasztott poligonban, a Kamcsatkai-félsziget és a Kuril-szigetek térségében 1979 és 2024 között regisztrált 4,0 és nagyobb erősségű földrengések mélységi eloszlása. Adatbázis: ISC.

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

A szeizmicitás növekedése, tüzek, a vulkáni tevékenység anomáliái - ezek a földkéreg szibériai tömbjének felemelkedésének peremhatásai, amelyek a szibériai köpenycsóva bevezetéséből származó nyomást tapasztalják.

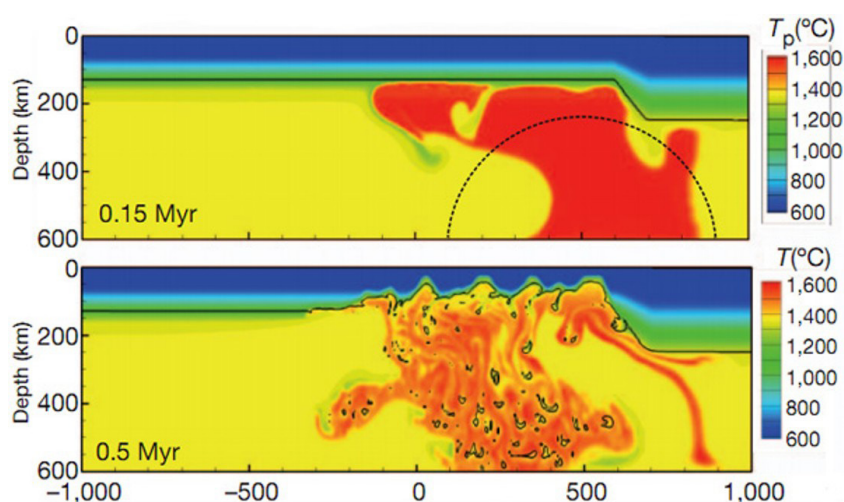
A szeizmikus aktivitás növekedése nemcsak Szibériában, hanem különösen a Nyugat-szibériai-lemez és a Kelet-szibériai-kraton peremén jelzi, hogy a magmás köpenycsóva által alulról rá nehezedő nyomás következtében bekövetkező lemezemelkedés már megkezdődött. Ez a magmás köpenycsóva nagymértékű és jelentős hatását jelzi a lemezre.

A hagyományos modellek azt feltételezték, hogy a köpenyfúvókák emelkedése és a felszín feletti litoszféra felmelegedése során jelentős, akár 2 kilométeres magasságú felszínemelkedést kell létrehozniuk, mielőtt a

magma áttörne. Ilyen drámai kiemelkedésre utaló geológiai bizonyíték azonban nincs a Szibériai csapdák térségében, amelyek 250 millió évvel ezelőtt egy magmafúvócső behatolásának eredményeként alakultak ki.

A szibériai csapdákból származó magmás kőzetek tanulmányozása alapján oroszországi, németországi és franciaországi intézetek tudósai megállapították⁴⁶, hogy a fúvóka nem buborékként emelkedett fel, hanem fokozatosan, alulról erodálta a litoszférát (76. ábra).

Amikor az erózió az olvadt fúvóka anyaga és a felső köpeny kőzetek közötti érintkezési zónában elérte az 50 kilométeres (kb. 31 mérföldes) mélységet, nagyszabású lávaömlések és kitörések kezdődtek a felszínen.



76. ábra.

A szibériai csapdák kialakulásának kezdeti szakaszainak rekonstrukciója.

A függőleges tengely a mélységet mutatja (km-ben). A különböző színek a kőzet hőmérsékletét jelzik. Köpenycsóva csúcsának kezdeti helyzete szaggatott félkörrel van jelölve. A köpenycsóva megközelíti a litoszféra alsó határát - ez egy folytonos fekete vonalként látható -, és „szétterül” alatta.

Alul: a köpenycsóvacsúcsa által okozott erózió következtében - a mélybe süllyedő litoszféra darabjai láthatók - a köpenycsóva utat kovácsolt magának a felső köpenyen keresztül a földkéreg felé. Ez megfelel a csapdával kapcsolatos magmatizmus fő fázisának kezdetének.

Forrás: 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). A köpenycsóva, a nagy magmás tartományok és a környezeti katasztrófák kapcsolata. *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). A köpenyfúvókák, a nagy magmás tartományok és a környezeti katasztrófák kapcsolata. *Nature*, 477, 312-316. DOI: 10.1038/nature10385

A köpenycsóva mai aktivitása valószínűleg ugyanezt a mechanizmust követi. Ezért nem várható jelentős helyi felszínemelkedés egyetlen ponton, ahol a köpenycsóva feje behatol. Ez a mechanizmus azonban nem zárja ki az egész Kelet-szibériai Platform széles körű, kis mértékű regionális kiemelkedését. A tektonofizikai modellezés szerint még egy ilyen kis mértékű kiemelkedés is elegendő lenne a magma kitöréséhez, amely nagy nyomás alatt olvadt anyagot szabadítana fel, és katasztrofális eseményt okozna.

A köpenycsóva feltételezett központja a Putorana-fennsík északi részén található, Norilszktól mintegy 225 km-re északkeletre. Ezenkívül az áttörés az egész vékony Nyugat-szibériai-lemezt érintené, ahol a régi varratok - a földkéregben lévő hasadékok és mély törések - valószínűleg újra megnyílnak.



A szibériai köpenycsóva kitörés elkerülhetetlenségének indoklása

Az okok, amelyek miatt a modern szibériai köpenycsóva kitörése a jelenlegi időszakban nagy kockázatot rejt magában, a következő feltételekkel kapcsolatosak.

Az elmúlt 30 évben a Földön fokozatosan növekednek a geofizikai anomáliák, amelyek a bolygó magjának régiójában a hőenergiát növelő külső kényszer közvetlen következményei. A jelenlegi helyzet azonban gyökeresen eltér a korábbi időszakhoz képest: **2024 végén a bolygó a bolygómagot érő fokozott energiahatás fázisába lépett. És a számítások alapján 2030-ra megközelíti a maximális fázist.**

A helyzetet súlyosbító kritikus tényező az óceánok antropogén tényező okozta globális szennyezése, beleértve a szénhidrogéneket, mikro- és nanoplasztikákat. Ez az antropogén tényező jelentősen megváltoztatta az óceánok vizének hővezető képességét, megzavarva annak azon képességét, hogy hatékonyan elvezesse a hőt a Föld belsejéből. Az óceán, amely történelmileg a bolygó fő hőszabályozójaként szolgált, elvesztette hővezető funkciójának nagy részét. Az eredmény a hőenergia abnormális felhalmozódása a köpenyben, ami a Föld történetében bármikor tapasztaltnál intenzívebb olvadást okoz.

A geofizikai vizsgálatok azt mutatják, hogy soha nem látott mértékben megnőtt a mélyfókuszú földrengések száma, amelyek az aktív köpenyolvadás közvetlen jelzői. A megolvadt magma térfogatának növekedésével óriási nyomás nehezedik a földkéregre. Ez a folyamat

egy léggömb fokozatos felfújásához hasonlítható - egy bizonyos ponton a nyomás meghaladja a kéreg szilárdságát.

A szibériai régió sajátos geológiai felépítése miatt különösen érzékeny ezekre a folyamatokra: itt egy erőteljes köpenycsóva emelkedik fel - az olvadt köpenyanyag felfelé irányuló áramlása, amelyet az 1997-1998-as mageltolódás idézett elő. A szibériai hőmérsékleti anomáliák növekedése azt mutatja, hogy a szibériai kráton alatti magma mennyisége továbbra is exponenciálisan növekszik. A geológiai adatok és a modern megfigyelések alapján nagy bizonyossággal kijelenthető, hogy a szibériai köpenycsóva a kitörésre való felkészülés kritikus fázisában van.

Különös aggodalomra ad okot, hogy a szibériai fűvókával egyidejűleg a Mariana-árok területén is kritikus helyzet alakul ki. Ez az óceánfenék legmélyebb pontja, ahol a kéreg a legvékonyabb és legsebezhetőbb. Itt is forró magma emelkedik, és ennek következtében a szeizmikus aktivitás is jelentősen megnövekedett. Valós veszélyt jelent, hogy az óceánfenék ezen a helyen felszakad, és egy bolygóromboló forgatókönyv valósul meg.

Az események alakulására két valószínű forgatókönyv létezik. Az első a szibériai mamatikus fűvóka áttörése, amely a növekvő magma nyomása miatt bármikor bekövetkezhet. A második a földkéreg felszakadása a Mariana-árokban, amely megelőzheti a szibériai katasztrófát. A szibériai köpenycsóva nem fog csak akkor felrobbanni, ha a Mariana-árok robban előbb.

A Mars geológiai története megmutatja nekünk egy ilyen forgatókönyv lehetséges következményeit: a Mariner-árok néma tanúja marad egy hasonló katasztrófának, amikor az óceán alatt felrobbanó köpenycsóva globális következményekkel járt az egész bolygóra nézve.

A geofizikai aktivitás növekedésének jelenlegi tendenciáit figyelembe vevő számítások szerint a Mariner-árok áttörésének kritikus pontja 2036-ra érhet el. Fontos azonban tudatosítani, hogy ez a határidő feltételes. Előfordulhat, hogy a szibériai földkéreg már sokkal korábban nem bírja el a növekvő nyomást. Az események jelenlegi alakulása szerint a szibériai köpenycsóva áttörése vagy a földkéreg felszakadása a Mariana-árokban a Föld belsejében zajló folyamatok elkerülhetetlen következményének tűnik. Az egyetlen bizonytalanság a katasztrófa pontos idejében

és helyszínében rejlik, de nem a közeledésének tényében.

A továbbiakban a szibériai köpenycsóva kapcsolatos események alakulásának három lehetséges forgatókönyvét vizsgáljuk meg. Az első forgatókönyv a szibériai fúvóka egylépcsős kitörése. A szibériai fúvóka hirtelen, egyszeri kitörése következik be. A második forgatókönyv a szibériai magmafúvóka fokozatos kitörése. Lassú és fokozatos láva kitörések lesznek Szibériában, hasonlóan a szibériai csapdák kialakulásához. A harmadik forgatókönyv a tervezett irányított gázmentesítés. Ez akkor lehetséges, ha az emberiség megteszi a szükséges intézkedéseket a szibériai köpenycsóva másodlagos magmás forrásainak gázmentesítésére a földkéregben.

1. forgatókönyv.

A szibériai köpenycsóva egylépcsős kitörése

A szibériai köpenycsóva egylépcsős kitörésének várható kárainak becsléséhez a földtörténeti példákkal való összehasonlítás módszerét alkalmazhatjuk. Érdekes azonban szem előtt tartani, hogy a Földön jelenleg uralkodóhoz hasonló körülmények - nevezetesen az elmúlt 24 000 év legerősebb ciklusának és a „bolygó fő hűtőrendszerének”, az óceánnak az antropogén szennyezésének egybeesése - még soha nem voltak. Éppen ezért a szibériai köpenycsóva egylépcsős kitörése tekinthető a legvalószínűbb eseménynek, ha az emberiség nem tesz lépéseket a kitörés kockázatainak mérséklésére.

A vulkánkitörések erejének becslésére a

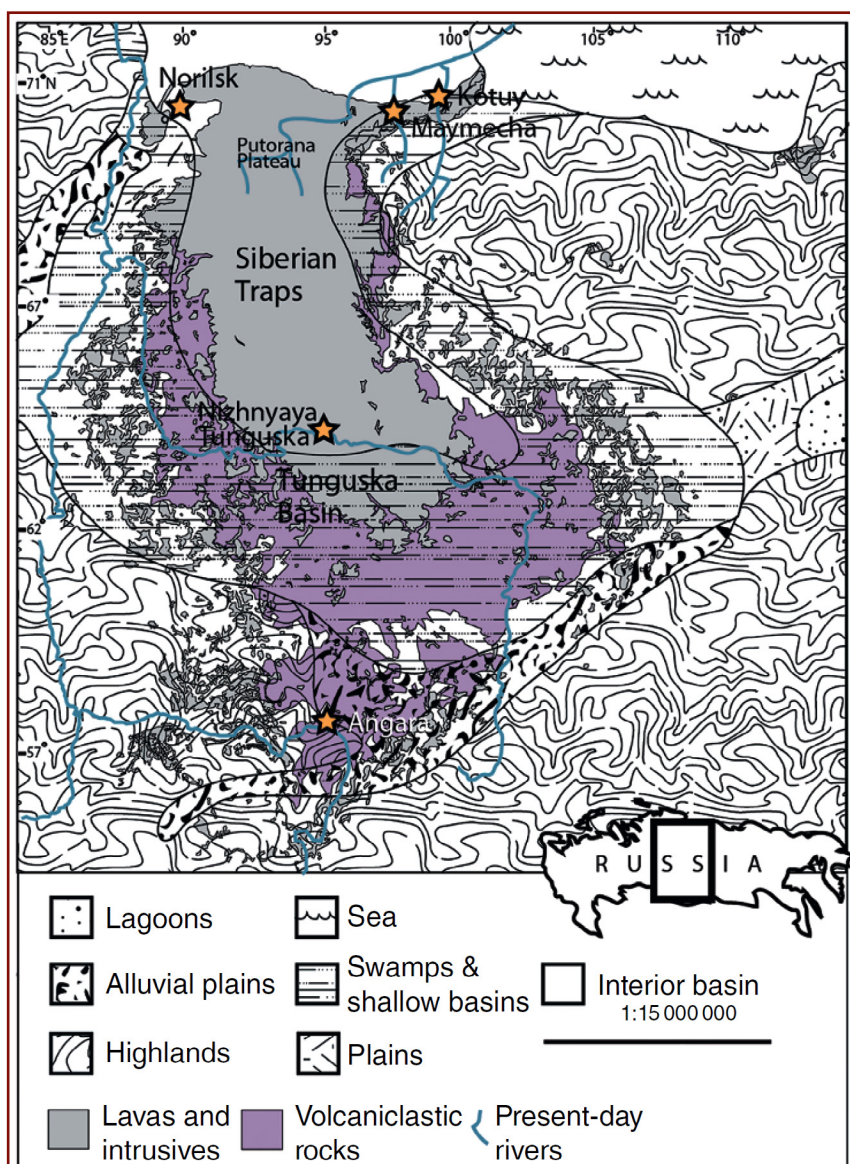
kilövellt anyagmennyiséget használják. Például a Yellowstone szupervulkán egyik legnagyobb, 2,1 millió évvel ezelőtti kitörése során a kilökött magma mennyisége 2500 km³ volt, amint azt az észak-amerikai tufa lerakódások tanulmányozása alapján megállapították.⁴⁷ E kitörés során a hamu és a gáz kibocsátás 50 kilométeres magasságba emelkedett, elérve a felső sztratoszférát. A kitörés nagyságrendjét tekintve a Szumátra szigetén lévő Toba szupervulkánhoz hasonlítható, amely körülbelül 72 000-74 000 évvel ezelőtt tört ki, és az elmúlt 25 millió év legnagyobb kitörése volt.

⁴⁷ Swallow, E. J., Wilson, C. J. N., Charlier, B. L. A., & Gamble, J. A. (2019). A Huckleberry Ridge Tuff, Yellowstone: több magmás rendszer kiürülése egy komplex epizodikus kitörés során. *Journal of Petrology*, 60, 1371-1426. <https://doi.org/10.1093/petrology/egz034>

A szibériai csapdák 250 millió év körüli kitörései során a kilökött anyag mennyisége különböző becslések szerint 3-4 millió km³ láva és tufa volt⁴⁸ (77. ábra). Vagyis a szibériai csapdák kitörése a kidobott anyag mennyiségét tekintve 1000-szer nagyobb volt, mint a Yellowstone-kaldera vagy a Toba szupervulkán leghevesebb kitörése.

egylépcsős jellegét tekintve, annak aktiválódása 1000-szer erősebb kitörést eredményezhet, mint az ismert történelmi események, például a Yellowstone-kaldera vagy a Toba szupervulkán kitörései.

Így a szibériai csapda potenciális kitörésének



77. ábra.

A szibériai csapdák paleogeográfiájának térképe, amely a főbb vulkanikus feltárások és lelőhelyek kiterjedését mutatja. Malich et al. (1974), Polozov et al. (2010), Black et al. (2015), a Czamanske et al. (1998) alapján egyszerűsített késő perm paleogeográfiával.

Forrás: 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>

Feltételezzük, hogy ha a szibériai köpenycsóva egyszerre tör ki, a kitörés robbanásszerű, azaz robbanásszerű lesz, és egyetlen kalderát fog képezni. A hipotézis szerint a szibériai köpenycsóva kitöréséből származó kaldera várhatóan 75 000 km² területű lesz, ennek a területnek a sugara 150 km (vagy például 380 km x 250 km). A szibériai csapdák 250 millió év előtti kitörése során a láva által elöntött terület a szakirodalom⁴⁹ szerint 4-7 millió km²⁵⁰ között volt. Hasonló területeket érinthetnek a kitörések ezúttal is.

Téves az a vélemény, hogy a vulkáni jelenségek közül a lávafolyások jelentik a legnagyobb veszélyt. Valójában gyakran a hamu az elsődleges oka a végzetes következményeknek. A nagy robbanásveszéllyel jellemezhető szupervulkánok esetében a magma nagy részének nincs ideje lávává alakulni. Ehelyett robbanásakor darabokra törik, és hatalmas mennyiségű apró vulkáni hamu - éles és csipkés kőzetdarabok vörösen izzó darabjai - keletkeznek, amelyek szétszóródnak a légkörben. Belélegezve ez a hamu cementszerű keveréket képez az emberi tüdőben, ami a közeli halálhoz vezet.

Feltételezések szerint a szibériai kitörés során az ilyen forró hamu mozgási sugara körülbelül 9 000 km lesz, vagyis mintegy 255 millió km² területet fog borítani. Mivel a Föld teljes felszíne valamivel több mint 510 millió km², a nem belélegezhető hamu sugara a bolygó felét fedné le: ez a terület a Föld felszínének mintegy 50%-át tenné ki.

Így, a szibériai köpenycsóva egylépcsős

áttörése esetén három halálos sugárral kell számolni.

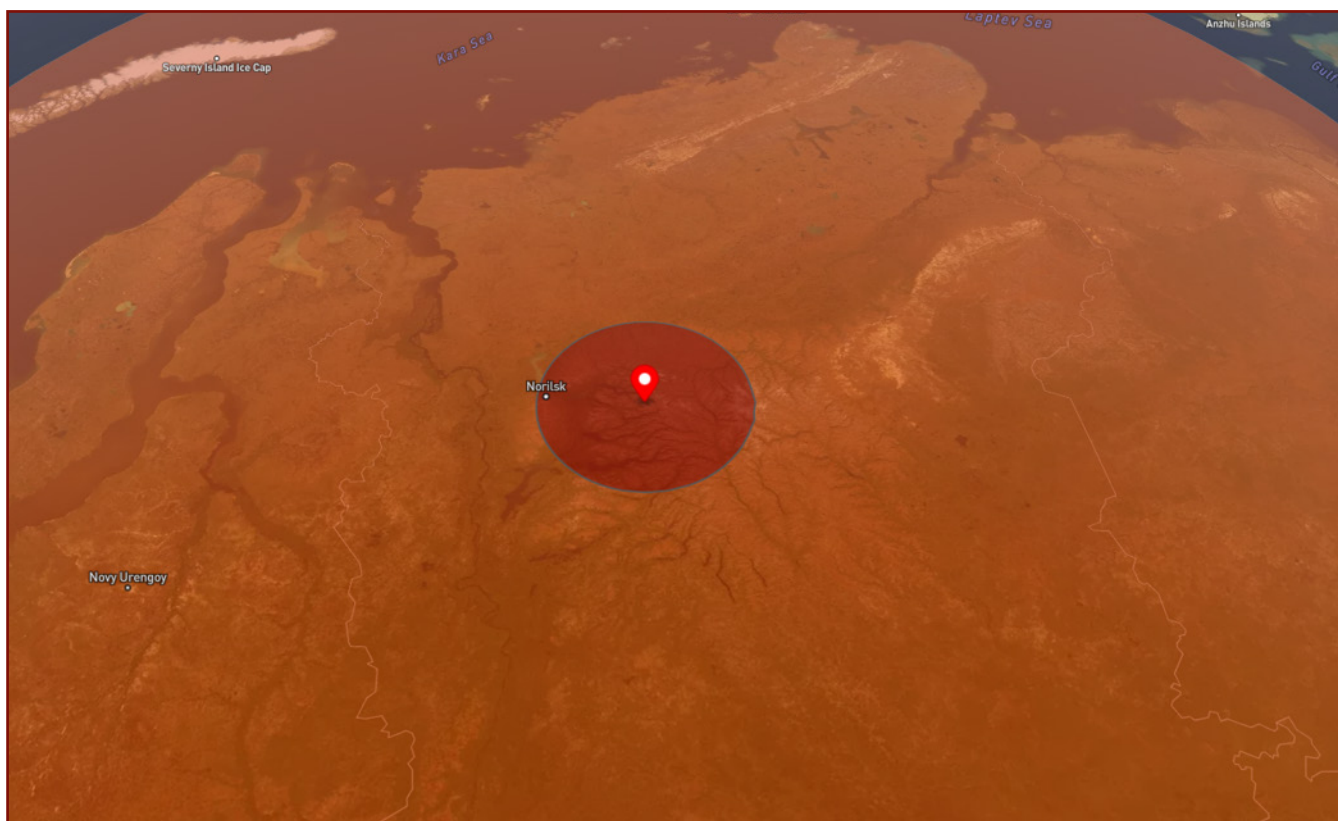
Az első (központi) becsapódási zóna egy 150 km sugarú terület, amelynek középpontja a Putorana-fennsík északnyugati részén van, ahol a kaldera kialakulása várható (78. ábra). Norilszk, Dudinka és Talnakh városok a Krasnojarszki területen ebbe a zónába esnek. Ha a kitörés kezdeti fázisában a kitörési zónán belül aktiválódik a köpenycsóva, akkor a lökéshullám és a vörösen izzó piroklasztikus áramlatok miatt minden objektum azonnal megsemmisül.

A második becsapódási zóna (1 500 km sugarú) a láva és a nehéz vulkáni anyag terjedésének területe (79. ábra). Észak-Szibéria kiterjedt területeit foglalja magában, beleértve a Jamalo-Nyenyec Autonóm Körzetet, a Taimír-félszigetet, a Hanti-Manszijszki Autonóm Körzet egyes részeit, a Krasnojarszki Kraj északi részét, Jakutföld nyugati részét és Oroszország északkeleti részét. Ebbe a körzetbe olyan nagyvárosok tartoznak, mint Igarka, Novy Urengoj, Nadym, Szalekhard, Vorkuta, Naryan-Mar, Mirny, Kogalym, Leszoszibirszk, Szurgut, Krasnojarszk, Hanti-Manszijszk, Tomszk, Nyizsnyevartovszk.

A kitörés első óráiban ezen a területen gyorsan mozgó (akár 700 km/h sebességű), vörösen izzó gáz-, hamu- és lávaáradat fog lezúdulni. Ezek az áramlások minden élőlényt elpusztítanak, és a területet vastag vulkáni anyagréteggel borítják be, amely maga alá temeti a városokat és a természeti erőforrásokat.

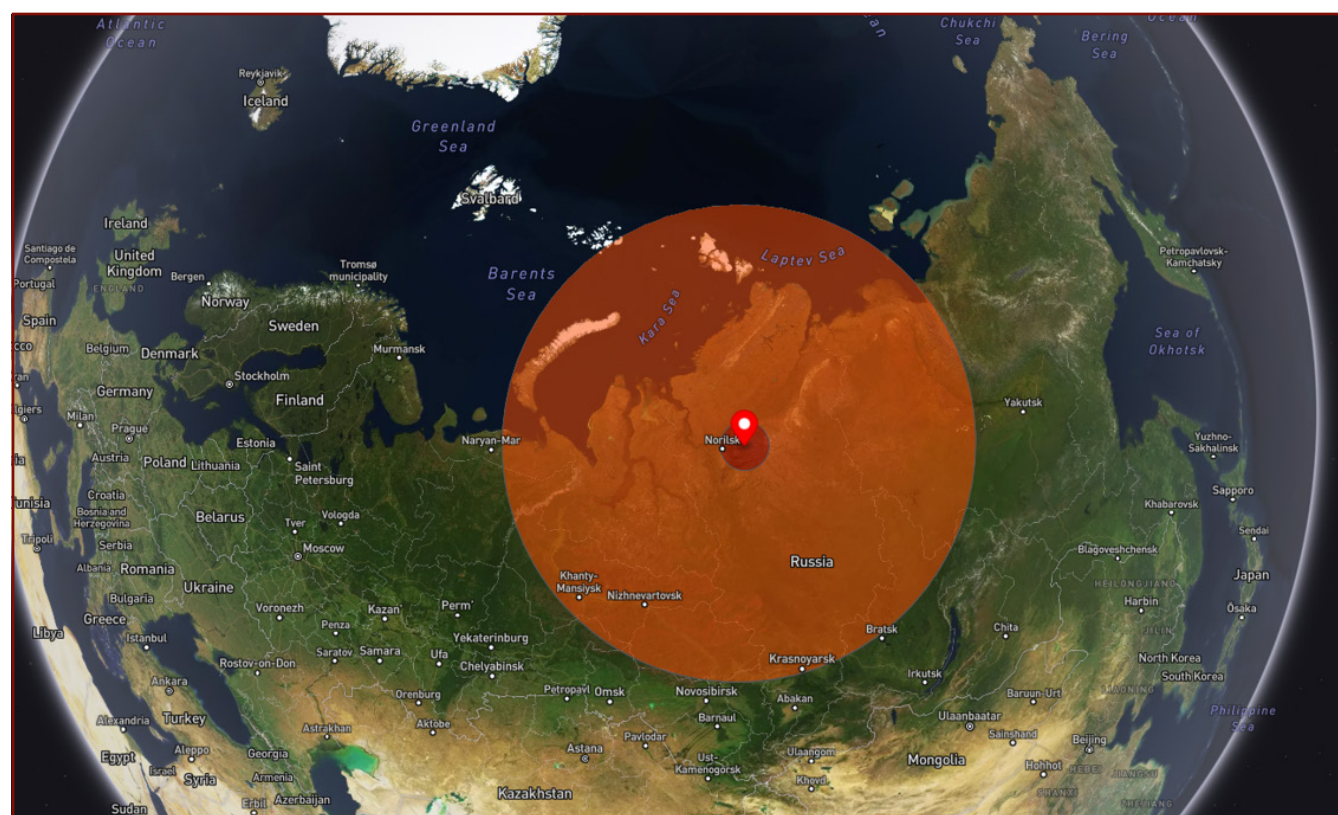
⁴⁹ Fedorenko, V. A., Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., Czamanske, G. K., Hawkesworth, C. J., Wooden, J. L., & Ebel, D. S. (1996). A Noril'sk-i árvíz-bazalt szekvencia petrogenézise, Észak-Közép-Szibéria. *International Geology Review*, 38(2), 99-135. <https://doi.org/10.1080/00206819709465327>

⁵⁰ Ivanov, A.V., He, H., Yan, L., Ryabov, V.V., Shevko, A.Y., Paleckii, S.V., Nikolaeva, I.V., 2013. Szibériai csapdák nagy vulkáni tartománya: Bizonyíték két árvízi bazaltimpulzusra a perm-triász határ körül és a középső triászban, valamint egyidejű gránitmagmatizmusra. *Earth-Science Reviews*, 122, pp. 58-76. Elérhető a következő címen: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>



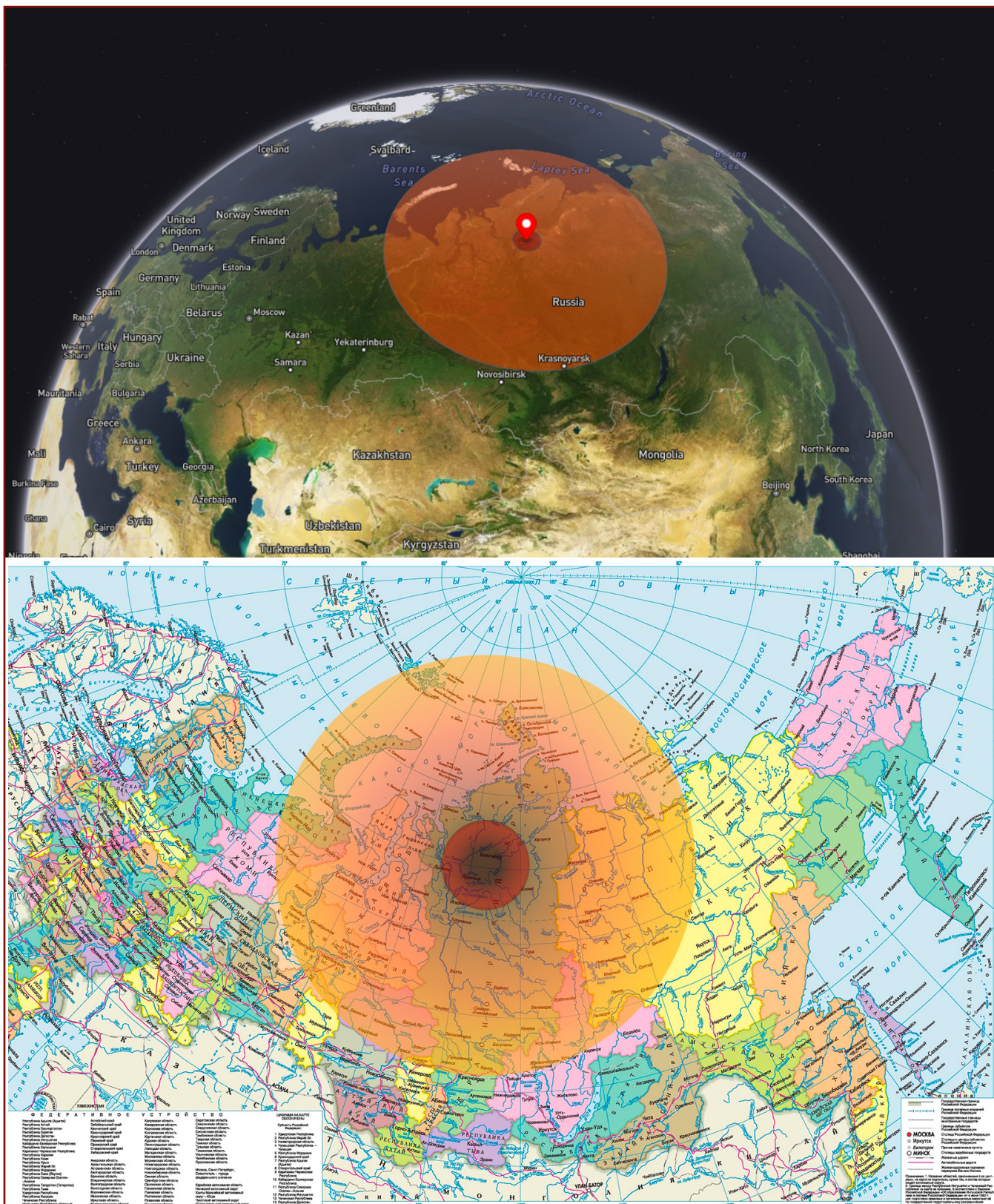
78. ábra.

A kalderaképződés zónája, amelynek megközelítőleg 150 km-es sugara piros színnel van jelölve.



79. ábra.

A narancssárga a láva kiömlésének és a nehéz piroklasztikus frakciók felszabadulásának zónáját mutatja - körülbelül 1500 km-es sugarú körben.



79. ábra.

A narancssárga a láva kiömlésének és a nehéz piroklasztikus frakciók felszabadulásának zónáját mutatja - körülbelül 1500 km-es sugarú körben.

A harmadik becsapódási zóna (kb. 9 000 km sugarú) a finom piroklasztikus anyagok és a vulkáni hamu szétterjedésének területe, amely a felszín kb. 50%-át fedi le (80. ábra).

A kezdeti szakaszban (a kitörést követő első napon) az Orosz Föderáció, a kontinentális Ázsia, Európa, az Arab-félsziget, az afrikai kontinens

északi része és Észak-Amerika területei lesznek kitéve a hamukibocsátás maximális hatásának. Az előrejelzések szerint a következő 7-10 napban a hamutömegek az ausztrál kontinens, Dél-Amerika és az Antarktisz területeire is áttérjednek.



80. ábra.

A finom vulkáni hamu elterjedési területe sárgával van jelölve - körülbelül 9000 km-es sugarú körben.



80. ábra.

A finom vulkáni hamu elterjedési területe sárgával van jelölve - körülbelül 9000 km-es sugarú körben.

A geológiai folyamatok tanulmányozása azt mutatja, hogy a szibériai köpenycsóva aktiválódása számos további katasztrofális eseményt fog okozni. Erős lökéshullám várható, rendkívüli erejű (kb. 10-es erősségű) földrengések, pusztító cunamik kialakulása és a Föld más nagy vulkáni rendszereinek valószínű felébredése. A kitörés során felszabaduló energia láncreakciót indíthat el, ami szupervulkánok és nagy vulkáni területek aktiválódásához vezethet az egész bolygón.

Ezek a következtetések az energiafolyamatok és a földkéregre gyakorolt hatásuk matematikai számításain alapulnak.

Ezután vizsgáljuk meg azokat a további kockázati tényezőket, amelyek a szibériai köpenycsóva egylépcsős kitörése következtében fenyegetik az emberiséget.

Lökéshullám

A nyilvánosan elérhető adatok szerint a Yellowstone szupervulkán kitörése körülbelül 900 000 megatonna energiát szabadíthat fel, és 11,2-es erősségű földrengést okozhat. Mivel a magnitúdóskála logaritmikus (minden egyes egységnyi növekedés az energia 32-szeresét jelenti), a Yellowstone-nál 1000-szer erősebb szibériai köpenycsóva kitörése 13,2-es erősségű földrengést okozhatna. Ez 350 000-szer erősebb, mint a legerősebb feljegyzett földrengés, a chilei nagy földrengés (9,5-es erősségű, 1960), és egy nagy aszteroida becsapódásához hasonlítható.

A felszabaduló 10^{24} J nagyságrendű energia globális méretű, hatalmas lökéshullámot hozna létre. A kitörés középpontjában olyan nagy lenne a nyomás, hogy a kőzetek azonnal elpárolognának és a felső légkörbe lökődnének. A szuperszonikus lökéshullám percek alatt több ezer kilométeres távolságban okozna pusztítást, hasonlóan a Tunguska meteorit zuhanásához,

csak sokkal erősebb.

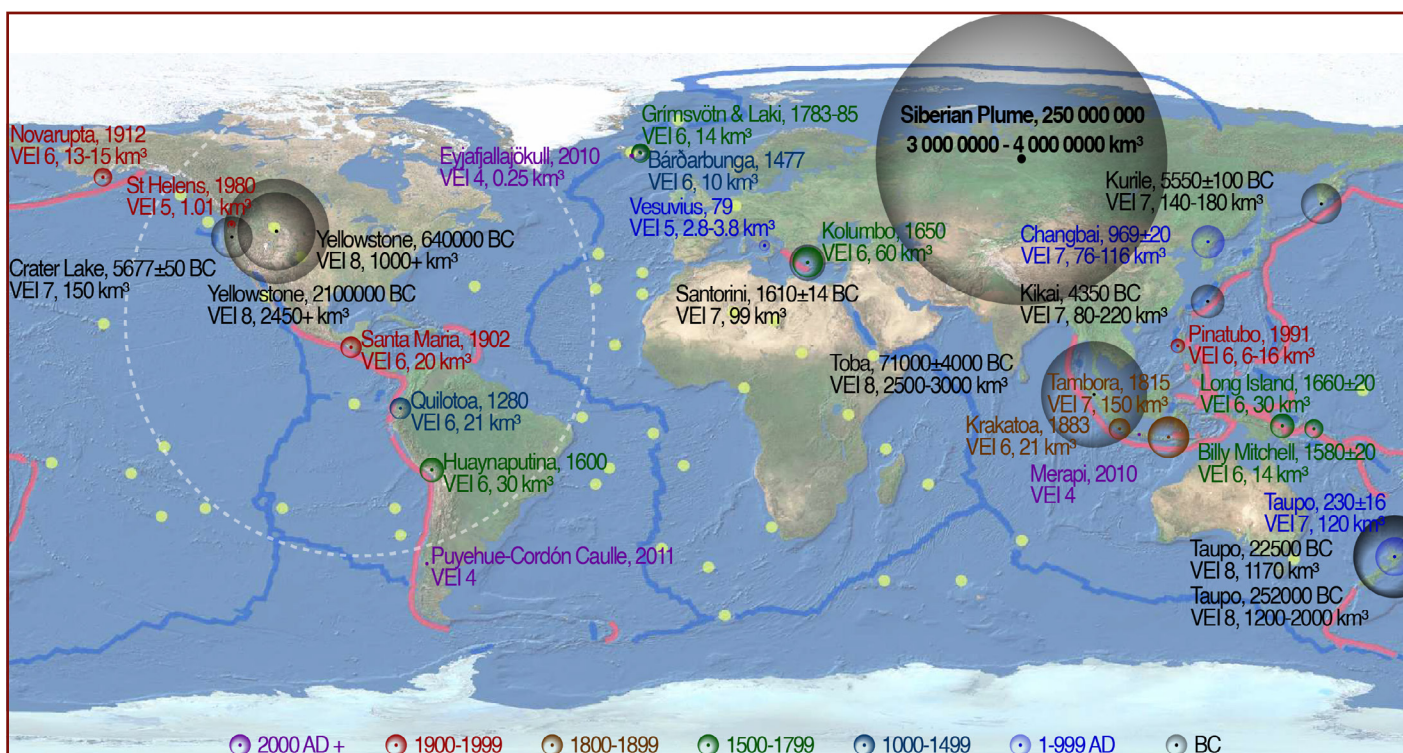
A szibériai tajgában nagy kiterjedésű tüzek fognak kitörni, és hatalmas területek kerülnek vastag vulkáni hamuréteg alá. Több ezer kilométernyi permafroszt gyorsan felolvad, ami az üvegházhatású gázok felszabadulásával jár. A kéreg töréseinek aktiválódásával a táj nagymértékű pusztulásnak lesz kitéve. Szeizmikus hullámok söpörnek végig a bolygón, újabb, 10-es erősségűnél erősebb földrengéseket okozva.

A Jeges-tengeren több száz méter magas óriási cunamik keletkeznek, amelyek Oroszország, Kanada, Grönland és Skandinávia partjait fenyegetik. Másodlagos cunamik fogják érinteni Indonézia, Japán, Ausztrália, Észak- és Dél-Amerika partjait. A globális légköri zavarok szupererős hurrikánok és viharok kialakulásához vezetnek.

Szupervulkánok és vulkáni rendszerek aktiválódása.

A kitörésből származó szeizmikus hullámok nemcsak a levegőben és a földfelszínen, hanem mélyen a földköpenybe is terjedni fognak. Mivel minden szupervulkán a köpeny olvadt rétegei révén kapcsolódik egymáshoz, a szibériai köpenycsóva kitöréséből származó ilyen nagyságrendű szeizmikus hullámok valószínűleg már az első napon más szupervulkánok

kitöréseinek láncreakcióját váltják ki (81. ábra). A legnagyobb vulkáni rendszerek várhatóan aktívvá válnak, köztük a Yellowstone és a Long Valley kalderák (Észak-Amerika), a Flegreai-mezők (Appennini-félsziget), a Toba (Zondes-szigetcsoport), az Ira (Japán-szigetek) és a Taupo vulkáni komplexum (Új-Zéland).



81. ábra.

A vázlat a legnagyobb vulkánkitörések globális térképét mutatja be, időszakok szerint kategorizálva, a prekambriumtól a modern korig.

A szimbólumok mérete arányos a kitört anyag mennyiségével (km^3 -ben). A térkép a $\text{VEI} \geq 4$ értékű kitörések időbeli sorrendjét tükrözi, ahol a Toba (Kr. e. 71 000±4 000, 2500-3000 km^3), Yellowstone (Kr. e. 640 000, >1 000 km^3) és Tambora (1815, 150 km^3) események vannak kiemelve. Hasonló kitörések várhatóak a szibériai magmatikus-robbanás esetében is, amely a legnagyobb esemény lenne (3-4 millió km^3). A piros vonalak a tektonikus lemezhatárokat jelzik, ami a nagy kitörések lokalizációjával való térbeli összefüggést mutatja.

A szupervulkáni kitörések mellett a csendes-óceáni tűzgyűrű mentén és más szeizmikusan aktív zónákban található számos vulkán kitörése valószínűsíthető. Nagy a valószínűsége az olyan vulkánok újbóli vulkáni tevékenységének, mint a Fujiyama (Japán), a Krakatau és a Merapi (Indonézia), a Vezúv és az Etna (Olaszország), a Popocatépetl (Mexikó), a kamcsatkai vulkán csoportok, az Andok és az alaskai vulkáni övek, valamint a Nyugat-Antarktiszi szubglaciális vulkáni

rendszerei.

A régóta szunnyadó vulkáni struktúrák várhatóan újra aktiválódnak, beleértve az Ararát sztratóvulkánt (Anatóliai-fennsík), az Elbrusz vulkáni masszívumot (Kaukázus régió), a Laacher See vulkánt (Közép-Európa), a Kilimandzsáró és a Nyiragongo sztratóvulkánokat (kelet-afrikai hasadékrendszer) és az Arab-félsziget vulkáni rendszereit.

Savas esők

A vulkáni hamu és kén-dioxid katasztrofális kibocsátása egy kitörés következtében a bolygó egészén savas eső formájában hulló csapadékot okozna. A kibocsátás mértékének illusztrálására a Yellowstone szupervulkán 630 000 évvel ezelőtti kitörését tekinthetjük, amikor mintegy 500 megatonna kén-dioxid került a légkörbe. Ezeket az adatokat a szibériai köpenycsóva feltételezett kitörésének erejével méretezve 1 500 000 megatonna (vagy $1,5 \times 10^{12}$ tonna) nagyságrendű kén-dioxid-kibocsátást feltételezhetünk, ami körülbelül egymilliószorosan meghaladja a Tambora 1815-ös (a „nyár nélküli év”) kibocsátását. Érdemes hangsúlyozni, hogy ez a számítás nem veszi figyelembe más vulkánok kibocsátását, amelyek egy láncreakció részeként aktiválódhatnak.

A kén-dioxid-kibocsátás ilyen koncentrációja globális aeroszol-részecskék képződését okozná a sztratoszférában, amelyek évtizedek alatt savas eső formájában fokozatosan kimosódnának a légkörből. A savas eső fő időszaka az előrejelzések szerint 3 és 10 év között lesz, az éghajlati folyamatoktól és a légköri keringéstől függően. Az ilyen kibocsátások epicentrumához közelebb eső régiókban, például a mai Szibériában, 1,5-nél alacsonyabb pH-értékű csapadék fog hullani, ami a híg kénsavhoz

hasonló. Ez elpusztítaná a növényzetet, beleértve a gyökereket, leveleket és ágakat, és ásványi anyagokat mosna ki a talajból, ami alkalmatlanná tenné azt az élet fenntartására. A vízi ökoszisztémák is súlyosan elsavasodnak: a víztestek 2-3-as pH-szintű savas tavakká válnak, ami a legtöbb életforma számára mérgezővé teszi őket. Ezenkívül a vízkészletbe kerülő sav kifinomult szűrés nélkül használhatatlanná teszi az ivóvizet. Az infrastruktúra, beleértve a cementből, márványból és fémekből készült épületeket is, a szulfát vegyületek által gyorsított korróciónak lesz kitéve.

A savas eső maximális koncentrációja azonban csak a kitörés utáni első néhány hónapban fog fennállni, utána a csapadék fokozatosan bizonyos régiókra lokalizálódik. A vulkanikus tél beköszöntével a csapadék nagy része hóvá változik, ami csökkenti az ökoszisztémák savas terhelését, de addigra a savas csapadék okozta globális növény- és állatvilág pusztulása visszafordíthatatlan lesz. Az ökoszisztémák károsodása már jóval a globális lehűlés kezdete előtt érezhető hatással lesz a természetes és antropogén folyamatokra.

Vulkanikus tél

A szibériai vulkánkitörés kumulatív hatása, amelyet több vulkán egyidejű aktiválódása fokoz, kolosszális katasztrofális hatással jár majd, amely a globális éghajlati és környezeti viszonyok változásában nyilvánul meg. A vulkáni hamu, gázok (különösen a kén-dioxid - SO_2) és aeroszolok nagymértékű kibocsátása a légkörbe évtizedekre leküzdhetetlen akadályt képez a napsugárzás számára.

A szulfát aeroszolok magas koncentrációja a sztratoszférában visszaveri a napsugárzás nagy részét, ami a bolygó energiaegyensúlyának felborulását okozza. A hőbevitel erőteljes csökkenése várható, ami az éghajlat szélsőséges lehűléséhez vezet - egy olyan állapothoz, amelyet „hipervulkáni télként” lehet megjelölni. Az ilyen folyamatok eredményeként a Föld „jégömbbé” válik, ahol az élet fenntartásához szükséges feltételek csak korlátozott régiókban, főként az egyenlítői zónában maradnak fenn.

A lehetséges hatások becslései a jelentős kitörések történelmi feljegyzéseire épülnek. Például a Yellowstone 2,1 millió évvel ezelőtti maximális kitörése során a globális hőmérséklet átlagosan 3-5 °C-kal csökkent. A számítások szerint a szibériai köpenycsóva kitörése során, amelynek léptéke sokszorosa a fent említett eseménynek, a Föld átlaghőmérséklete ~24-31 °C-kal csökken. A sarkvidékeken a hőmérséklet várhatóan 28-36 °C-ra vagy még ennél is magasabbra csökken, ami a legfontosabb víztestek, köztük az Atlanti-óceán északi részének és a Csendes-óceán nagy részének teljes befagyását eredményezi. A

középső szélességi területeken 24-31 °C-os hőmérséklet-csökkenés várható, amely elpusztítja az összes növényzetet és tömeges pusztulást okoz az élőlények körében.

Az óceáni ökoszisztémák drámai módon felborulnak. Az óceánok felszíni és part menti területein fagyás kezdődik, ami globális szinten a tengeri élővilág eltűnését okozza. Az egyenlítői régiókban a hőmérséklet 20-27 °C-kal fog csökkenni, így még a trópusi területek is túl hidegek lesznek az élet fenntartásához.

A globális hideg, az árnyékolás és a fotoszintézis megszűnése következtében gyakorlatilag a teljes szárazföld terméketlen lesz. A táplálékláncok megsemmisülnek, ami a mezőgazdaság összeomlásához, a növény- és állatvilág, valamint az emberiség nagy részének tömeges kihalásához vezet. Csak a szélsőséges körülményekhez alkalmazkodott, elszigetelt mikrobiális ökoszisztémák maradnak életképesek.

A sztratoszférában lévő, hosszú ideig tartó szulfát aeroszolok még évtizedekig blokkolni fogják a napfényt. A „hipervulkanikus tél” hatásai azonban sokkal hosszabb ideig lesznek érezhetők. Még a hamu és az aeroszolok lerakódásának befejezése után is több száz vagy akár több ezer évbe telik, amíg a bolygó visszanyeri természetes éghajlati és ökológiai egyensúlyát, tekintettel az óceánok befagyására, a gleccserek kialakulására és a bioszféra radikális változásaira.

Következtetések az 1. forgatókönyvvel kapcsolatban.

A szibériai köpenycsóva egylépcsős kitörése katasztrofális geológiai és éghajlati esemény lenne, amely globális változásokat okozna a légkörben, a hidroszférában és a bioszférában. A Putorana-fennsíkon bekövetkező erőteljes robbanás 150 kilométeres körzetben azonnal elpusztítana mindent, és egy óriási kalderát hozna létre, míg a piroklasztikus áramlások és lávafolyamok 1500 kilométeres körzetet borítanának be, Szibériát felperzselt sivataggá változtatva. A bolygó felszínének felét hamuréteg fogja borítani. A köpenycsóva robbanása által okozott, akár 13,2-es erősségű földrengés pusztító szeizmikus hullámokat fog generálni, amelyek szétterjednek a bolygón, törésvonalakat, másodlagos földrengéseket és több száz méter magas megaszunamikát aktiválva, elárasztva a kontinensek part menti zónáit.

TAz 1,5 millió megatonna SO_2 kibocsátása savas esőt fog okozni, amelynek pH-ja 1,5 alá csökken, elpusztítva a talajt, a növényzetet és a vízi ökoszisztémákat. A víztestek lakhatatlanná válnak, a földek pedig gyorsan elveszítik termékenységüket. A fotoszintézis és a táplálékláncok összeomlása a növényvilág,

az állatvilág és következéskeppen az emberi civilizáció tömeges kihalásához vezet.

A szupervulkánok, köztük a Yellowstone, a Campi Flegrei és a Toba masszív aktiválódása a vulkáni hamu, a kén-dioxid (SO_2) és az aeroszolok kibocsátásának növekedése révén súlyosbítja a globális éghajlatváltozást. Ezek felhalmozódása a sztratoszférában elzárja a napfényt, ami a bolygó lehűlését („hipervulkáni tél”) és több tíz fokos hőmérsékletcsökkenést okoz. A hőmérséklet a sarkvidékeken 28-36 °C-kal, a mérsékelt égövön 24-31 °C-kal, a trópusokon 20-27 °C-kal csökken, ami az óceánok befagyását, az óceáni keringés leállítását, az ökoszisztémák összeomlását, a szárazföldön pedig óriási gleccserek kialakulását okozza.

A „hipervulkanikus tél” hatása gyakorlatilag lakhatatlanná tenné a Földet, és a természetes állapotok helyreállítása évezredek vagy évmilliókat venne igénybe. Ez az esemény a bolygó geológiai történelmének legnagyobb kihalási eseménye lenne.

2. forgatókönyv.

A szibériai köpenycsóva fokozatos kitörése

A szibériai köpenycsóva kitörésének második forgatókönyve nem egy egylépcsős robbanást feltételez, hanem a gázok és lávafolyamok fokozatos kitöréssorozatát a földkéreg törésein és meggyengült zónáin keresztül. Ez a folyamat a szibériai csapdák kialakulásához hasonlítható, amely a perm végén, 250 millió éve-ban történt ugyanebben a régióban.

A szibériai trapok tartományainak kialakulása a földi vulkanizmus legnagyobb léptékű megnyilvánulása volt. Ebben az időben a Föld történelmének legnagyobb környezeti

katasztrófáját, a perm-triász tömeges kihalást élte át, amelynek során a tengeri fajok akár 90%-a, a szárazföldi fajok 70%-a eltűnt (82., 83. ábra).

A geológiai bizonyítékok⁵¹ arra utalnak, hogy a kelet-szibériai krátonban a szibériai kitörések szokatlanul robbanásszerűek lehettek (Campbell et al. 1992), a piroklastikus lerakódások vastagsága elérte a 800 métert (Khain 1985). A robbanási erő olyan nagy volt, hogy néha 10 km mélységből is kidobott üledékes kőzeteket.



82. ábra.

A perm-triász kihalási időszak alatti szibériai kitörések művészi ábrázolása.

Illusztráció: Tigran Nshanyan képe.

83. ábra.

Művészi ábrázolás: A tömeges kihalást túlélő lisztroszauruszok uralják a feldúlt tájat, illusztrálva a perm-triász válság utáni ökoszisztéma-változást.

Illusztráció: Julio Lacerda.



⁵¹Beerling, D.J., Harfoot, M., Lomax, B. & Pyle, J.A., 2007. A sztratoszférikus ózonréteg stabilitása a szibériai csapdák perm végi kitörése idején. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 365, pp.1843-1866. Elérhető a következő címen: <http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2046>

A vulkáni tevékenység a régióban több szakaszban nyilvánult meg, kardinálisan megváltoztatva a geológiai tájat. Kezdetben a magma behatolt az üledékes rétegekbe, és különféle intruzív testeket, például halmazokat képezett. A kitörések ezután robbanásszerű kitörésekké váltak, amelyek hatalmas mennyiségű piroklasztikus anyag felszabadulását és hatalmas vulkáni lerakódások kialakulását eredményezték. Ez a folyamat kolosszális mennyiségű, több százezer köbkilométerre becsült bazaltláva kitörésében csúcsosodott ki. A vulkáni kőzetek teljes térfogata, beleértve az intrúziókat, a piroklasztikus lerakódásokat és a lávafolyásokat, körülbelül 3 millió km³-re becsülhető. Fontos megjegyezni, hogy ez a szám csak a fennmaradt kőzeteket tükrözi, és feltételezhető, hogy a kitörések eredeti kiterjedése sokkal nagyobb volt, de később elmaradt.

A szibériai csapdák kialakulása hatalmas szén-dioxid (CO₂), kén-dioxid (SO₂), hidrogén-klorid (HCl) és más illékony anyagok kibocsátását okozta. Ezek a gázok drámaian megnövelték az üvegházhatást, és a vulkáni tél után gyors felmelegedést okoztak. A CO₂ koncentrációja a légkörben elérte a 8000 ppm-et, ami hússzor magasabb a mai szintnél. Ennek következtében a trópusi tengerek hőmérséklete 22-25 °C-ról 30 °C-ra emelkedett, és az óceánok savasodni kezdtek, elpusztítva a karbonátvázal rendelkező organizmusokat.

A kén teljes kibocsátása elérte a 7800 gigatonnát, a klóré a 8700 gigatonnát, a fluoridé pedig a 13 600 gigatonnát⁵².

A vulkáni hamu és az aeroszolok blokkolták a napfényt, megzavarták a fotoszintézist, tömeges erdőpusztulást okoztak, és megzavarták a táplálékláncokat, súlyosbítva mind a növény-, mind az állatfajok kihalását. Az akkori ökológiai válság jól mutatja, hogy a szibériai vulkánkitörés akár csak fokozatos kitörése milyen súlyos következményekkel járhat.

A kutatások szerint a 250 millió évvel ezelőtt kezdődött kitörések időszakát a köpenycsóva, a Föld mélyéről felszálló erőteljes magmaáramlás okozta a mai Putorana-fennsík területén. Ennek a forgatókönyvnek a megismétlődése napjainkban hatalmas lávafennsíkok kialakulásához vezetne - a bolygó legnagyobb geológiai képződményei közé tartoznak, amelyek több ezer kilométeres sugarú körben gyakorlatilag minden életet elpusztítanának, lefedve Szibéria és a szomszédos régiók területét. A geológiai feljegyzések azt mutatják, hogy ilyen, óriási bazaltmezők kiömlésével kísért katasztrófák⁵³ többször is előfordultak, és minden alkalommal nagy tömeges kihalást okoztak (84. ábra).

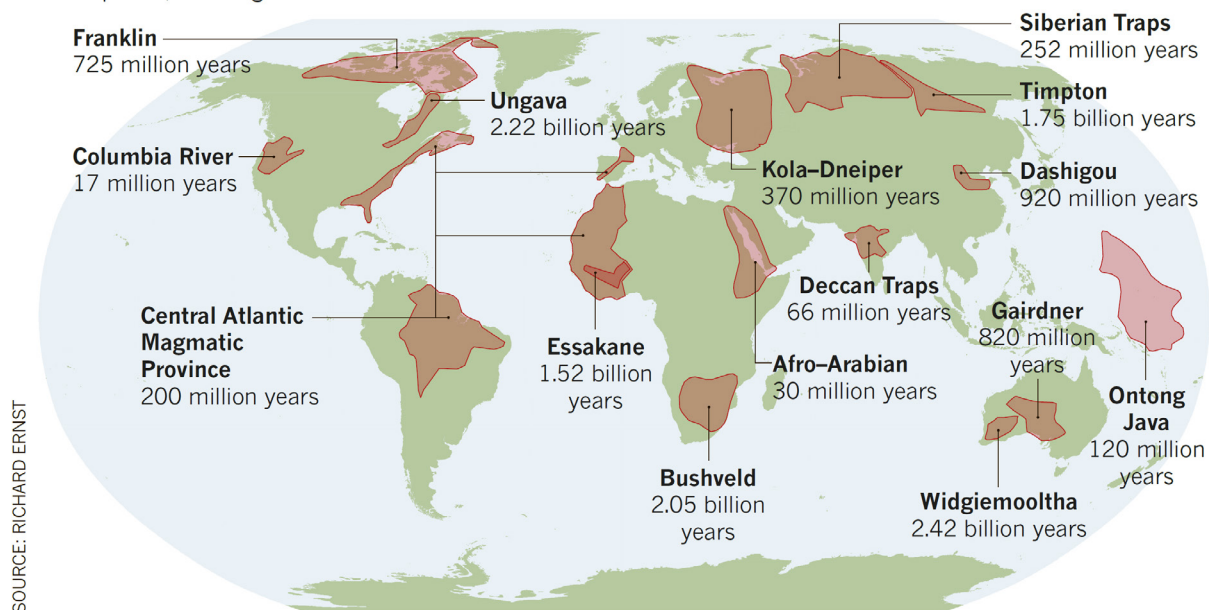
⁵²Benjamin A. Black, Linda T. Elkins-Tanton, Michael C. Rowe, Ingrid Ukstins Peate, Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps, *Earth and Planetary Science Letters*, Volumes 317–318, 2012, Pages 363–373, ISSN 0012-821X, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001>

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. ábra.

A képen a Föld történelmének legnagyobb vulkánkitöréseinek térképe látható, amelyen az események során kialakult lávatáblák földrajzi elhelyezkedése és kora látható.

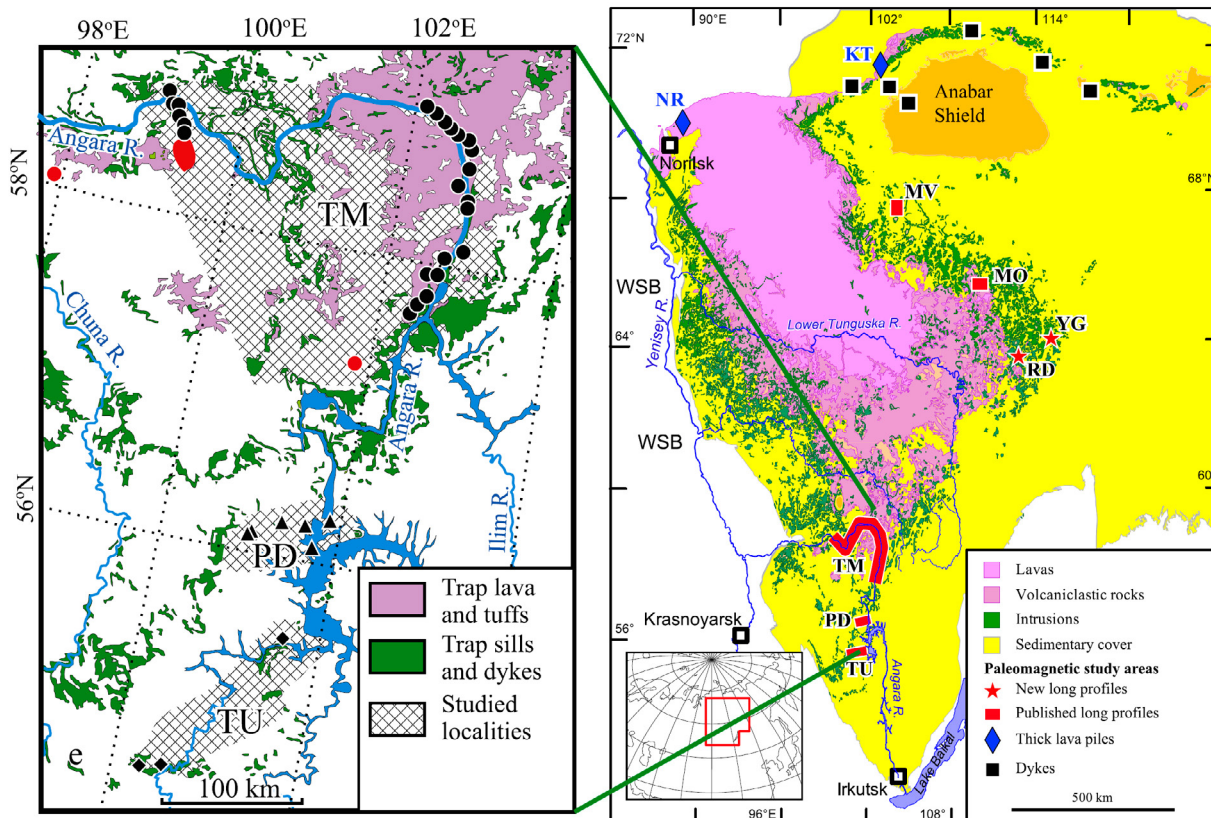
Illusztráció: Richard Ernst

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

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

A korábbi földtörténeti korszakokhoz hasonlóan a magma a földköpenyből emelkedik fel, a földkéreg repedésein keresztül szivárogva, hasonlóan ahhoz, ahogy a lágy anyag átszivárog egy sűrű szűrőn. Ez a folyamat felszíni túlhevüléshez, számos intrakristális magma intrúzió kialakulásához és a litoszféra olvadásához vezet. A 85. ábra az effuzív kőzetek eloszlását mutatja Szibériában: a lávafolyásokat lila színnel, a földkéregbe fagyott magmás testeket pedig

zöld színnel ábrázoljuk. A térképen a zöld zónák azt mutatják, hogy a földkérget felemésztő magma hogyan alakított ki töréseket, és hogyan hatolt be ezeken a meggyengült zónákon. Az ilyen megnövekedett magmnyomás képes arra, hogy ismét hasonló folyamatot idézzon elő.



85. ábra.

Jobbra: A szibériai-trappok tartomány áttekintő térképe (egyszerűsítve és módosítva: Svensen et al., 2009). Az áttekintő térképen a fő geológiai struktúrák különböző színekkel vannak jelölve: rózsaszínűvel a lávafolyások, zölddel az intruzív testek és sárgával az üledéktakaró. Balra: az ábra bal oldalán található részletes térkép a csapdamagmatizmus eloszlását mutatja: a lávák és tufák lila színűvel, a szillák és gócek zölddel vannak jelölve.

Forrás: Konstantinov, K. M., Bazhenov, M. L., Fetisova, A. M., & Khutorskoy, M. D. (2014). Csapdás intrúziók paleomagnetizmusa, Kelet-Szibéria: Implikációk az árvízi bazaltkiemelkedésre és a perm-triász bioszféra válságára. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 242-253.

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

A fokozatos kitörés forgatókönyve a szibériai köpenycsóva egylépcsős robbanásához hasonlítható, de időben kitolódik. Úgy képzelhető el, mint hetente kitörő vulkánok egymásutánja, valamint olyan hirtelen hasadékok, amelyeken keresztül bazaltos lávák áramlanának át egész Nyugat-Szibériában. A térképen (86. ábra) a lávafolyások területei lilával vannak jelölve. A Kelet-szibériai Platform sűrűbb és stabilabb kérgének területén a lávák szétterültek a területen, míg Nyugat-Szibériában, amelyet vékonyabb, fiatalabb és heterogénebb kéreg jellemez, a kitörések hosszúkas hasadékok vagy hasadékok mentén történtek. A térképen a piros

szín a cementált piroklasztikus törmelékből és hamuból álló tufaövezeteket jelöli.

Meg kell jegyezni, hogy a kelet- és nyugat-szibériai kitörések eltérőek lesznek. Kelet-Szibéria alatt a magma a sűrű archaikus kráterbe ütközik, amely jelentős akadályt képez. Ahogy a magma felemelkedik, „beágyazódik” a befogadó kőzetekbe, lehűl és telítődik illékony komponensekkel, ami robbanásszerű kitörésekhez vezethet, nagy hamukibocsátással és esetlegesen savas, viszkózus magma kialakulásával.



86. ábra.

A szibériai trappok térképe. A térkép a főbb geológiai struktúrákat mutatja, beleértve a lávafolyások (lila) és tufák tufitokkal (magenta) borított területeit. A kék vonalak a Szibériai csapdaprovincia határait jelölik.

Forrás: wikipedia.org, Masaitis, 1983 szerint.

Míg Nyugat-Szibéria alatt, ahol a kéreg vékony és fiatal, várhatóan a folyékony bazaltos láva kiömlései lesznek túlsúlyban.

A lávafolyások és tufák által borított terület várhatóan mintegy 7 millió négyzetkilométert tesz ki Nyugat- és Kelet-Szibériában, ami a mai Ausztrália területéhez hasonlítható. A degradációnak kitett területek azonban valószínűleg meghaladják a több tízmillió négyzetkilométert. Ezeket a területeket nagy kiterjedésű tüzek, savas eső okozta erózió, hamu, földcsuszamlások és a vulkáni csapadékot hordozó sáracsuszamlások fogják érinteni. Szibéria teljes permafrosztja pusztulásnak lesz kitéve.

Érdemes megjegyezni, hogy a Putorana-fennsíktól nyugatra fekvő Taymyr-félszigeten található a világ legnagyobb nikkel-, réz- és platinacsoportú fémekből álló

lelőhelyei, amelyeket a Norinickel fejlesztett ki. Ezek a lelőhelyek magmás eredetűek, és körülbelül 250 millió évvel ezelőtt alakultak ki a szibériai csapdás magmás tartomány kitörései során, amelyek hozzájárultak az egyedülálló ércgumók kialakulásához. Az akkori magmák magas nikkelkoncentrációja valószínűleg a földmagból a felszínre történő anyagszállítással függött össze. Jelenleg Szibériában köpenycsóva emelkedik, amelynek felgyorsulását a mag 1998-ban a Taymyr-félsziget irányába történt elmozdulása okozta, amelyet Dr. Jurij Barkin állapított meg. A közeljövőben nagy a kockázata annak, hogy a szibériai köpenycsóva Norilszk városának közelében, ugyanazon a helyen, ahol 250 millió évvel ezelőtt történt, kitörhet.

Az alábbiakban ennek a forgatókönyvnek a következményeit vizsgáljuk Oroszország és a világ számára.

A szibériai köpenycsóva fokozatos kitörésének következményei Oroszországra nézve

Vannak tanulmányok, amelyek pontosan meghatározzák az asztenoszférikus olvadt lencsék helyét a dél-szibériai litoszférában, ami e régió vékony kérgének köszönhető. Szibéria északi része azonban a szeizmikus térképeken gyakorlatilag feltáratlan marad, ami az alsó kéreg és köpeny tanulmányozásában „fehér foltot” jelent. Ez lehetetlenné teszi az első lávatörések és a gázzal telített magmák kitöréseinek helyének előrejelzését, különösen a szibériai köpenycsóva övezetben a felszín alatti rétegek teljes körű megfigyelésének hiánya miatt.

Ismeretes, hogy a közelgő katasztrófa első jelei a földkéreg szibériai tömbjének peremén gyakori földrengések és lokális gázkibocsátások lesznek. Ahogy a magma a felszín felé halad, a permafroszt gyorsan olvadni kezd, ami a permafroszt talajon lévő infrastruktúra pusztulásához vezethet. A talaj felmelegedésével a gázhidrátok (a jég szerkezetében lévő metán) is felrobbanhatnak, ami nagy víznyelőket okozhat és településeket pusztíthat el. A metán felszabadulása, a talaj túlmelegedése és a vulkáni gázok felszabadulása miatt elkerülhetetlenek lesznek a tömegtüzek. A szibériai mezők és szénmedencék, mint például a Kuzbassz, szénhidrogének kigyulladhatnak, ahogy ez már megtörtént a perm-triász időszakban⁵⁴, amikor a szénlelőhelyek akár 600 °C-os hőhatásnak is ki voltak téve.

A kitörések hirtelen kezdődhetnek, és nagy területen, sok helyen jelentkeznek. A 7-8-as erősségű földrengések, repedések és törések miatt több százezer négyzetkilométeren fog

láva ömleni. A láva kitörések körüli területeken tömeges lesz a növények, állatok és emberek pusztulása a mérgező kibocsátások miatt, amelyek mérgező „koktélt” alkotnak a légkörben. Az első napokban emberek milliói fognak meghalni, a vulkáni hamu pedig tönkreteszi a közlekedési kapcsolatokat, mivel az utakra és sínekre rakódik, csökkenti a látási viszonyokat és tönkreteszi az infrastruktúrát. A légi közlekedés is teljesen le fog állni, mivel a hamu veszélyt jelent a repülőgépek és helikopterek motorjaira.

A felolvadó permafroszt tovább súlyosbítja a helyzetet: a kommunikációs útvonalak, a csővezetékek, az épületek és a kommunikáció elkezd összeomlani. Sok város víz, élelmiszer és áram nélkül marad, ami humanitárius válságot okoz. A kitörési terület nagy részén lehetetlen lesz a tömeges evakuálás, mivel a láva, a gázok, a tüzek és a savas eső használhatatlanná teszik a közlekedési útvonalakat. A pánik emberek millióira terjedne át; Szibériában több millió ember evakuálása társadalmi instabilitáshoz és zavargásokhoz vezetne.

Az ország gazdasága katasztrofális veszteségeket szenvedne el: az infrastruktúra fizikai pusztulása miatt megszűnne az olaj-, gáz-, szén-, gyémánt- és fémtermelés, ami üzemek leállításához, nyersanyag- és áramhiányhoz vezetne. A vulkanikus tevékenység elpusztítaná a régió természeti kincseit, beleértve az olajat és a szenet is, tönkretéve az ország kulcsfontosságú gazdasági eszközeit.

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>

Évtizedekkel a kitörés után Szibéria ökológiai katasztrófaövezet marad. Ez a katasztrófa visszafordíthatatlanul megváltoztatja Oroszország földrajzát, gazdaságát és társadalmát. Az országnak csak 25%-a marad lakható, de a környezeti és társadalmi válságok miatt óriási

nyomás nehezedik majd rá.

Gazdasági pozíciók, történelmi emlékek és a természeti kincsek nagy része elveszik, és Szibéria alkalmatlanná válik a modern civilizáció létezésére.

A szibériai köpenycsóva fokozatos áttörésének következményei az egész világra nézve

A szibériai köpenycsóva kitörésének globális következményei az egész világot érintik majd, és ez több szakaszban fog bekövetkezni.

Az első napokban az Európát és Ázsiát átszelő szibériai közlekedési kapcsolatok leállnak, és a légkörben lévő vulkáni hamu miatt a légi közlekedés is leáll. Ezek a folyamatok megzavarják a globális logisztikát, ami hatalmas élelmiszerválságot okoz, mivel Oroszország, mint az egyik vezető élelmiszerexportőr, leállítja a búza és más termékek szállítását. Oroszország olaj-, gáz- és egyéb nyersanyag-exportjának megszakadása számos országban áremelkedéshez, energiaválsághoz és gazdasági instabilitáshoz fog vezetni. A világ gazdaságot pénzügyi és társadalmi zavarok láncreakciója fogja sújtani.

A hamu és a kén aeroszolok felhői globális elsötétedést okoznak, csökkentve a napfényt. Ez „vulkanikus télhez” vezet, a hőmérséklet 2-3 °C-kal csökken. A savas eső és a talajszennyezés nemcsak Oroszországban, hanem világszerte károsítja majd a mezőgazdaságot. A tömeges éhezés, a vízhiány, a mérgező levegő és az éghajlati rendszer összeomlása emberek és állatok milliárdjainak fokozatos pusztulásához fog vezetni. Néhány éven belül a társadalmi rendszerek összeomlanak.

Végül a vulkáni hamu elkezd ülepedni, de drámai klímaváltozás következik be. A metán és a szén-dioxid felszabadulása az olvadó permafrosztból növelni fogja az üvegházhatást. A hőmérséklet fokozatosan 5-10 °C-kal emelkedik, ami egy instabil, hirtelen hőmérsékletváltozásokkal jellemezhető éghajlathoz vezet. Az ózonréteg csökkenése az ultraibolya sugárzás szintjének növekedéséhez vezet az északi féltekén, ami súlyosbítja a kitörések hatásait.

A Szibériától való távolsága ellenére Európának súlyos következményekkel kell szembenéznie a szibériai kitörés következtében: a hamu beborítja Észak- és Kelet-Európát, és számos légzőszervi megbetegedést okoz a lakosság körében. A savas eső el fogja pusztítani az erdőket, a városi infrastruktúrát és a mezőgazdasági területeket. Egy átmeneti lehűlési fázis után hirtelen felmelegedés kezdődik, amelyet délen aszályok, Közép- és Észak-Európában pedig áradások kísérnek. Az Oroszországból, Ázsiából és a Közel-Keletről érkező tömeges migráció demográfiai válságot okoz és fokozza az erőforrásokért folytatott versenyt. Az európai országok folyamatos környezeti, gazdasági és társadalmi kihívásokkal küzdenek majd.

Ázsia, amely a legközelebb van a kitörések epicentrumához, fogja elszenvedni a hatások legnagyobb részét. A por és a hamu okozta légszennyezés fulladást és savas esőt fog okozni, különösen Kínában, Mongóliában és Kazahsztánban. Észak-Kínában, a kulcsfontosságú élelmiszertermelő régióban a mezőgazdaságot megtizedeli a napfény hiánya és a talajminőség romlása. A szélsőséges hőmérsékleti viszonyok az egész kontinensen tönkreteszik az infrastruktúrát és a mezőgazdasági rendszereket. Az óceánok

hőmérsékletének fokozatos emelkedése a víz oxigénhiányosodását fogja okozni, ami tönkretesz a tengeri ökoszisztémákat és a halászat összeomlásához vezet.

Idővel a folyamatos kitörések hatásai csak még pusztítóbbak lesznek. Az éghajlati és környezeti válságok súlyosbodni fognak, az emberiség elveszíti jelenlegi technológiájának és tudásának nagy részét, és mélyreható visszaesésen megy keresztül a fejlődésben. A világ civilizációja az összeomlás szélére kerül.

A szibériai köpenycsóva fokozatos áttörésének hosszú távú következményei a bolygóra nézve

A szibériai köpenycsóva fokozatos kitörése nagyszabású hosszú távú következményeket fog okozni, amelyek évmilliókra gyökeresen megváltoztatják a bolygót. A légkör globálisan mérgező anyagokkal lesz szennyezve, ami bolygóméretű savas esőt és ózonpusztulást eredményez. Az óceánok elsavasodnak, ami a tengeri élőlények tömeges pusztulását fogja okozni. Ezek a folyamatok a tengeri ökoszisztémák összeomlásához, a globális táplálékláncok megszakadásához és a tengeri biodiverzitás összeomlásához vezetnek.

A szárazföldön elkerülhetetlenné válik a tömeges kihalás a légkörbe kerülő mérgező anyagok kibocsátása, a talajökoszisztémák pusztulása és a legtöbb növény eltűnése miatt. A beporzók elvesztése a szárazföldi ökoszisztémák összeomlásához fog vezetni. A kihalás várhatóan

az összes létező faj 75-95%-át érinti.

A kitörés összetett éghajlati, biológiai és geológiai válságot fog eredményezni, amely teljesen átalakítja a Föld bioszféráját. Ez a folyamat az emberi civilizáció összeomlásához, emberek milliárdjainak halálához és a megmaradt, széttagolt embercsoportok kőkorszaki fejlettségi szintre való visszagurulásához vezet. E katasztrófa mértéke a Föld történelmének legnagyobb tömeges kihalásaihoz fog hasonlítani, amely legalább évmilliók alatt a bioszféra új evolúciós szakaszát nyitja meg.

3. forgatókönyv.

Tervezett ellenőrzött gázmentesítés

Meglévő vulkanikus geomérnöki technikák

Tekintettel a Nyugat-szibériai-lemez és a Kelet-szibériai-kraton alatti növekvő feszültségre, amely a Szibériai-lemez felemelkedéséhez kapcsolódik, sürgős intézkedéseket kell hozni a lehetséges katasztrofális következmények minimalizálása érdekében. Az egyik ilyen megoldás a másodlagos magmás forrásokból származó nyomás, láva és gázok ellenőrzött kibocsátása, azaz a tervezett ellenőrzött gázmentesítés.

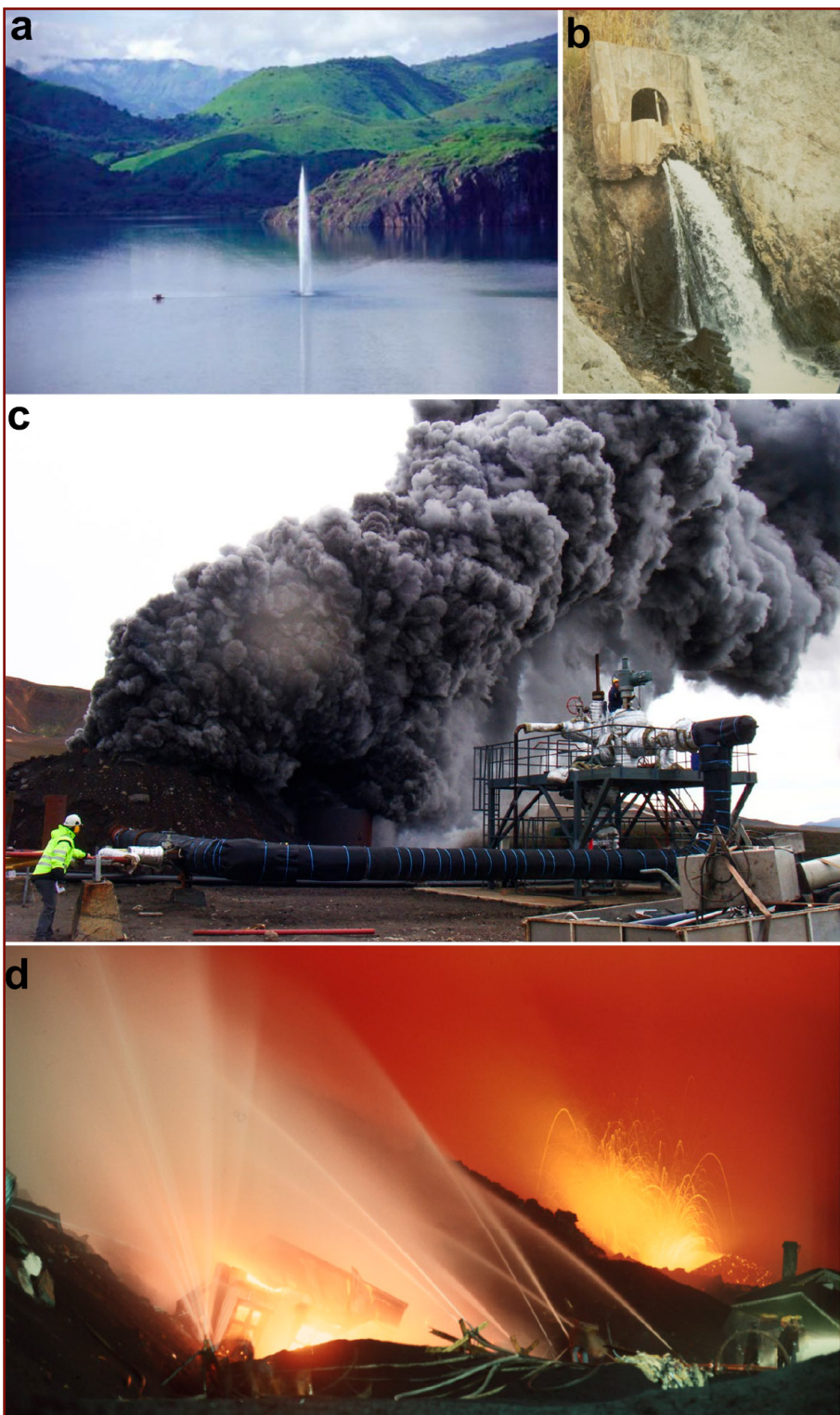
A modern tudományos kutatások a magmakamrák gázmentesítését ígéretes módszernek tartják a nagyszabású kitörések megelőzésére. Ez a megközelítés megalapozza a vulkáni geomérnökségi technológiák alkalmazását nemcsak a vulkánokon vagy szupervulkánokon, hanem a köpenycsókák aktivitásának szabályozására is. A szabályozott gáztalanítás koncepciója számos tudományos publikációban és szabadalomban tükröződik, amelyeket különböző országok szakemberei dolgoztak ki.

A vulkanikus geomérnökség elméleti alapjait a 20. század óta lefektették, és az elmúlt évszázadban gyakorlati kísérleteket is végeztek. A vulkáni beavatkozás módszerei közé tartozott a kráterek fúrása, vulkáni tavak lecsapolása, lávaelvezető csatornák létrehozása,

lávafolyamok tengervízzel történő hűtése, lávafolyamok bombázása és üvegházhatású gázok (szén-dioxid és metán) szivattyúzása (87. ábra).

Az 1960-as évek óta az Egyesült Államok Geológiai Szolgálat (USGS) a hawaii Kilauea vulkán lávatóinak területére fúrásokat végez a láva elvezetése érdekében. Hasonló kezdeményezések vannak folyamatban Japánban, Izlandon és Olaszországban. Japánban például olyan technológiákat tesztelnek, amelyekkel csökkenthető a magmakamrák nyomása, Izland pedig sikeres tapasztalatokat szerzett a láva elterelésével a Heimaey-szigeten, ahol vízágyúkkal hűtötték az áramlásokat. Olaszországban korai figyelmeztető rendszereket, valamint a lávafolyások ellenőrzésére szolgáló módszereket fejlesztenek; erre példa az Etnánál 1983-ban a lávaakadályok robbanásszerű összeomlása.

Napjainkban nemzetközi tudományos konferenciákat és szimpóziumokat tartanak a vulkanikus és geotermikus aktivitási zónák mélyfúrásairól, így bővülnek a vulkanikus geomérnökség alkalmazásának lehetőségei a kitörések megelőzésére és enyhítésére globális szinten.



87. ábra.

(a) A kameruni Nios-tó szén-dioxid-ki-bocsátása Halbwachs et al. (2020) szerint.

(b) Vízelvezető alagút a Kelud vulkán kráterfalában, Indonézia (Global Volcanism Programme, GVP-01120 kép).

(c) Opportunista fúrás egy köpenycsónában az izlandi Kraflánál 2009-ben (kép: GO Friðleifsson/IDDP).

(d) Lávafolyamok hűtése szivattyúzott tengervízzel az izlandi Heimaey-nél 1973-ban, Tristinn H. Benediktsson.

Forrás: Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). A vulkáni geomérnökség etikája. *Earth's Future*, 11(10), e2023EF003714.

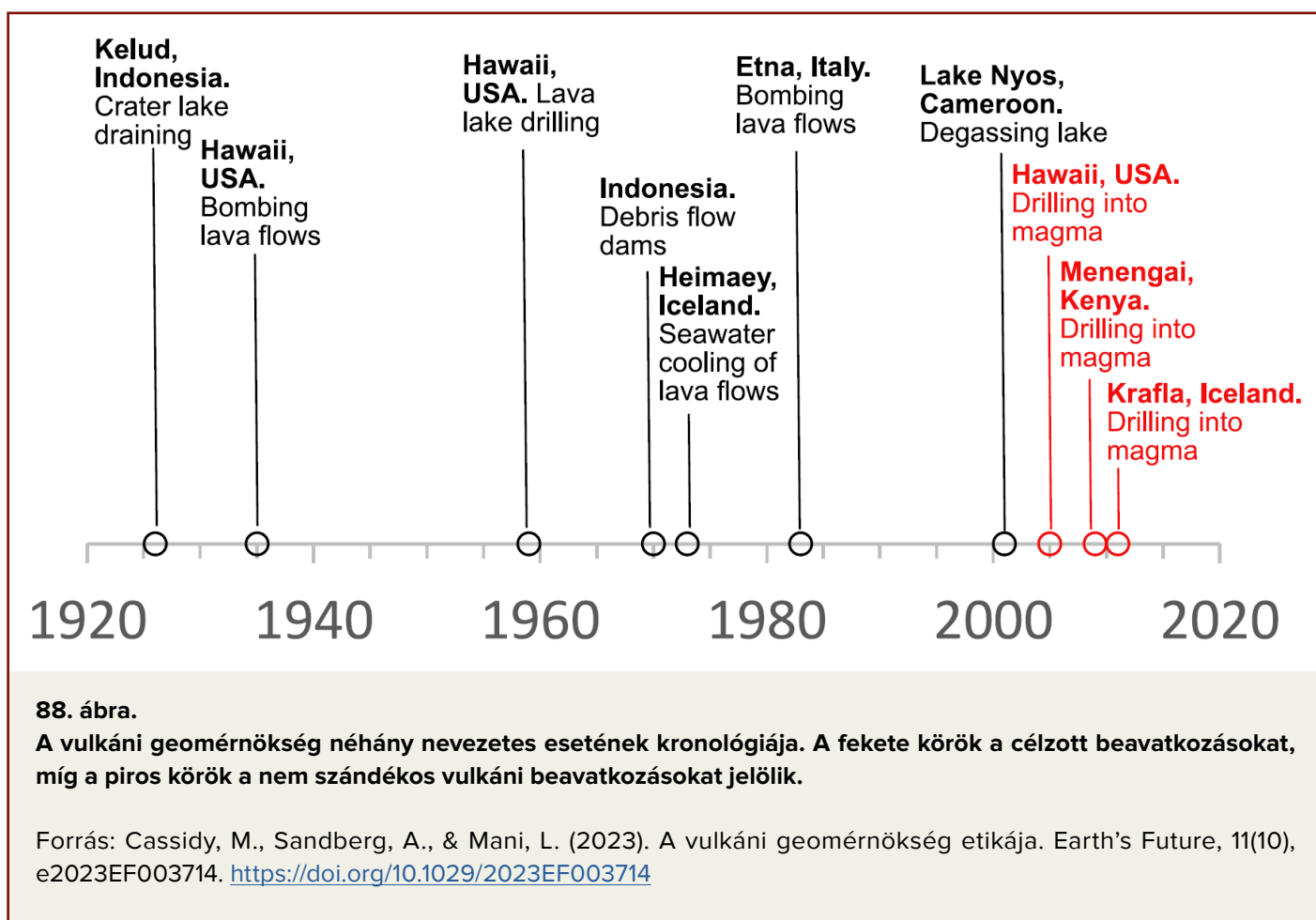
<https://doi.org/10.1029/2023EF003714>

A diagram (88. ábra) a vulkáni geomérnökség legjelentősebb eseteinek kronológiáját mutatja be. A fekete körök a célzott beavatkozásokat, a piros körök pedig a vulkáni tevékenységre gyakorolt nem szándékos hatásokat jelölik.

Vannak szabadalmaztatott technikák is a vulkáni és szupervulkánkitörési kockázatok

tervezett gázmentesítésére és mérséklésére.

A két orosz szakember által szabadalmaztatott egyik technológia elve például az, hogy ferde kútfúrással és a magmakamrák nyomásszabályozásával megakadályozzák az ellenőrizetlen, lavinaszerű vulkánkitöréseket (89. ábra).





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.

89. ábra.

Szabadalom: Módszer a vulkánok lavinaszerű kitörésének megakadályozására.

A találmány a vulkánok ellenőrizetlen, lavinaszerű kitöréseinek megelőzésére és a magma építésben való felhasználására szolgáló, ellenőrzött szállításának megszervezésére szolgáló módszerekre vonatkozik.

Növeli a megközelítés hatékonyságát.

A találmány lényege: a módszer szerint a szolfatikus aktivitást mutató vulkánok alatti másodlagos magmaközpontokban a nyomást szabályozzák. Ennek érdekében a másodlagos magmatikus központ aljába ferde csatornák fúrását végzik. Ebben a magmaközpontba sűrített gázt vezetnek be. A másodlagos magmatikus központban megnő a nyomás, és az elsődleges központból származó magma lelassul. Ezzel egyidejűleg a másodlagos magmaközpontban felhalmozódott magmát kivonják és a lefúrt csatornákon keresztül elszállítják. Ugyanakkor nem engedik, hogy elérje azt a kritikus nyomásértéket, amelynél lavinaszerű kitörés következik be.

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

Egy másik technológiát egy amerikai feltaláló fejlesztett ki (90. ábra). Ez a technológia olyan módszereket ír le, amelyekkel a vulkáni magmakamrákból - mint például a Yellowstone szupervulkánban lévő kamrából - szivattyúzzák ki a magmát egy esetleges katasztrofális

kitörés megelőzése érdekében. Az alapötlet az, hogy mesterséges csatornákat (csöveket) hoznak létre a magma felszínre juttatására, ahol az feldolgozható és felhasználható például energiatermelésre.

(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

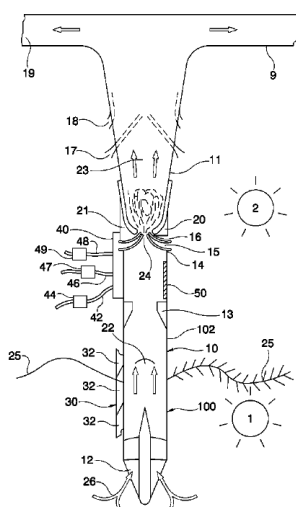
* cited by examiner

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



90. ábra.

Szabadalom: Magmaelszívó rendszerek a szupervulkán-robbanások megelőzésére.

A készülék a vulkáni magma kiürítését szabályozza a robbanások megelőzése érdekében. A magmát egyetlen kiürítő csövön keresztül szivattyúzzák ki, amelyben a magmaáramot melegítik, hogy megakadályozzák a magma megtapadását a csőben. A fűtéshez kis égőkamrák használhatók, amelyek gőzt szolgáltatnak, ami viszont felmelegíti és stabilizálja a magmaáramot. Szükség esetén a stabilitást a cső falán elhelyezett köpenycsövából indított vízszugarakkal történő központi hűtéssel tartják fenn.

Forrás:

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

A sikeres gázmentesítésre szintén példa a japán [“Unzen Scientific Drilling Project”](https://www.icdp-online.org/projects/by-continent/asia/usdp-japan/gallery/) (USDP). Ez egy 1999 áprilisában indult 6 éves kezdeményezés, amelynek célja az Undzen vulkán növekedési történetének, felszín alatti szerkezetének és magmaemelkedési folyamatainak tanulmányozása (91. ábra). Az első fázisban két fúrást végeztek a vulkán lejtőin, és felépítették a vulkán szerkezetének modelljét.

A második fázis az 1990-1995-ös kitörések magmacsatornájának fúrására összpontosított, hogy elemezze a gázmentesítési mechanizmust. A sikeres fúrás érdekében egy olyan stratégiát dolgoztak ki, amely függőleges fúrást, majd a fúrólyuk dőlésszögének növelését tartalmazta (92. ábra).

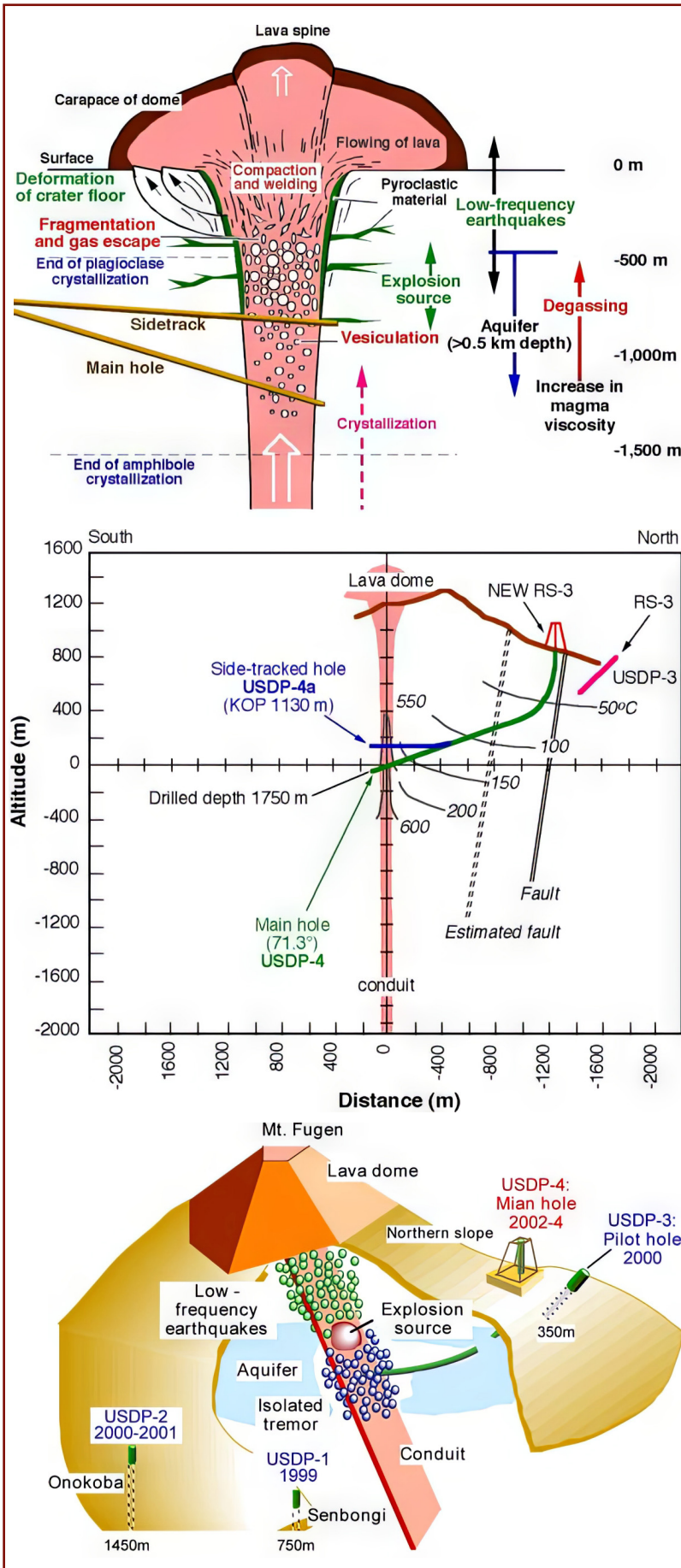


91. ábra.

Az Undzen vulkán 1995-ös fúrásához használt fúróberendezés.

Forrás:

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



92. ábra.

(A)

Az Undzen vulkán lávakupolájának és aknájának felső részének képe. A habosított magmából hatékony gáztalanítás történt, amikor az akna felső részén hasadt és kalcinálódott. A bányaalapokat a főakna (USDP-4) 2003-as fúrása során vizsgálták, 2004-ben pedig folyamatos magmintavételt végeztek az oldalakna (USDP-4a) fúrása során.

Forrás: USDP projekt. Földrengéskutató Intézet, Tokiói Egyetem. Hozzáférési mód: december 31. 2024 <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20>

(B)

Bányafúrasi pályák. Az új RS-3 és RS-3 pontokból a főakna, a mellékvágat és a kísérleti lyuk fúrását feltételezzük.

Forrás: USDP projekt. Földrengéskutató Intézet, Tokiói Egyetem. Az adatok 2024. december 31-én a <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20> weboldaltól származnak.

(C)

A bányafúrás háromdimenziós diagramja

Forrás: Vulkáni Folyadékok Kutatóközpontja. Az Undzen vulkán bányarendszerének áttekintése. Földrengéskutató Intézet, Tokiói Egyetem. Az adatok 2024. december 31-én származnak a <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/vrc/usdp/conduit.html>

Az emberiség ma már elegendő technológiai és mérnöki képességgel rendelkezik a vulkáni rendszerekben történő megvalósításhoz, de a tervezett gázmentesítés minden egyes esete a leggondosabb előkészítést, nagy mennyiségű adat elemzését és pontos számításokat igényel. Még így is maradnak kockázatok.

Ezeket a példákat hétköznapi vulkánokon tesztelték, amelyek méretükben minden bizonnyal eltérnek a szibériai óriási magmatikus fúvókától. Ez köpenycsóva olyan veszélyt jelent, amely messze meghaladja még egyetlen szupervulkán erejét is, és ezer Yellowstone-kaldera robbanási energiájához hasonlítható. Ennek ellenére a probléma megvitatása éppen azért vált aktuálissá, mert vannak lehetséges megközelítések a

megoldására.

Megfelelő megközelítéssel az emberiség globális szakértelemre alapozva kidolgozhat egy köpenycsóva-gázmentesítési programot. Ennek fő feladata az lenne, hogy a másodlagos magmaforrásokban lévő láva és gázok nyomásának csökkentésével minimalizálja a szibériai köpenycsóva emelkedésének következményeit, ami megakadályozná a nagyszabású, ellenőrizetlen kitöréseket.

Egy ilyen program megvalósításához szoros nemzetközi együttműködésre és a világ minden tájáról érkező tudósok és mérnökök erőfeszítéseinek egyesítésére lesz szükség. Csak egységes megközelítéssel lehet hatékony megoldásokat kidolgozni, amelyek célja az

Példa a szibériai köpenycsóva tervezett gázmentesítési programjára

A program több irányzat egyidejű fejlesztését is magában foglalhatja:

1. Megfigyelőhálózat kiépítése

1.1. Nagy érzékenységgű érzékelők és műholdas megfigyelés hálózatát kell létrehozni a régió szeizmikus és termikus aktivitásának megfigyelésére. Ez lehetővé teszi a másodlagos forrászónák időben történő észlelését.

1.2. A másodlagos magmás források részletes feltérképezését szeizmikus technikákkal kell elvégezni. Fontos lesz az egyes másodlagos forrásokban lévő magma nyomásának és térfogatának előzetes becslése.

1.3. Ezt követően kutatási, megfigyelő kutak fúrására, valamint nyomás-, hőmérséklet- és szeizmikus aktivitásérzékelők telepítésére lesz

szükség az anomáliás zónákban.

2. A magmacsatornák ellenőrzött gázmentesítésére és elzárására szolgáló technológia kifejlesztése.

2.1. Tervet kell kidolgozni a biztonságos zónákban ferde mélységű (akár 8 kilométer mélységig) kutak fúrására. Szükség lesz a másodlagos központok eléréséhez szükséges irányított fúrások pályáinak részletes kiszámítására. Olyan fúrási technológiákat kell alkalmazni, amelyek ellenállnak a magas hőmérsékletnek és nyomásnak, azaz hőálló anyagokat kell használni a kutak falainak megerősítésére, és ki kell alakítani egy rendszert a kútban lévő nyomás és hőmérséklet ellenőrzésére.

2.2. Ki kell majd dolgozni egy eljárást a gázok és a hosszúfalú fűrófal szellőztetésére a másodlagos kályhák szakaszos nyomásszabályozásán keresztül, egy rendszer segítségével. Ehhez a hirtelen nyomáscsökkenések elkerülése érdekében a gázmentesítés sebességének szabályozására, valamint a gáznyomás szabályozására szolgáló kompresszorrendszer használatára lesz szükség. Szűrő- és hűtőrendszer használatára lesz szükség a mérgező anyagok légkörbe jutásának megakadályozása érdekében. A láva és a gázok kivonását addig kell végezni, amíg a nyomás az egyes kályhákban stabilizálódik.

2.3. Ezután ki kell dolgozni egy tervet a meghatározott fűrásokban történő irányított nukleáris robbantásra, hogy a másodlagos magmaközpont feletti rétegeket lefedjék. Ez megakadályozza a túlzott magma felszínre szökését, és minimalizálja a hamu felszabadulását.

A fokozatos nyomáscsökkenés biztosítja majd Szibéria stabilitását, és megvédi a főbb lakossági központokat, kivéve esetleg Norilszk és a környező településeket.

2.4. A láva kiömlését lehetőség szerint a forrásokból történő lávaelvonás folyamata során kell majd megfékezni. Törekedni kell arra, hogy azt speciálisan előkészített csatornákon keresztül a sarkvidéki tengerek felé vezessék.

Ki kell dolgozni egy programot a magma építési célú felhasználására (pl. mesterséges szigetek vagy partvonal-megerősítés).

3. A lakosság evakuálása

Korai figyelmeztető rendszert és vészhelyzeti evakuálási terveket kell bevezetni. Szükség lesz továbbá a lakosság biztonságos evakuálásának tervszerű megszervezésére a kockázati területekről és alkalmazkodására, szociális biztonságára, figyelembe véve a hosszú távú áttelepítés lehetőségét.

4. Az infrastruktúra megőrzése:

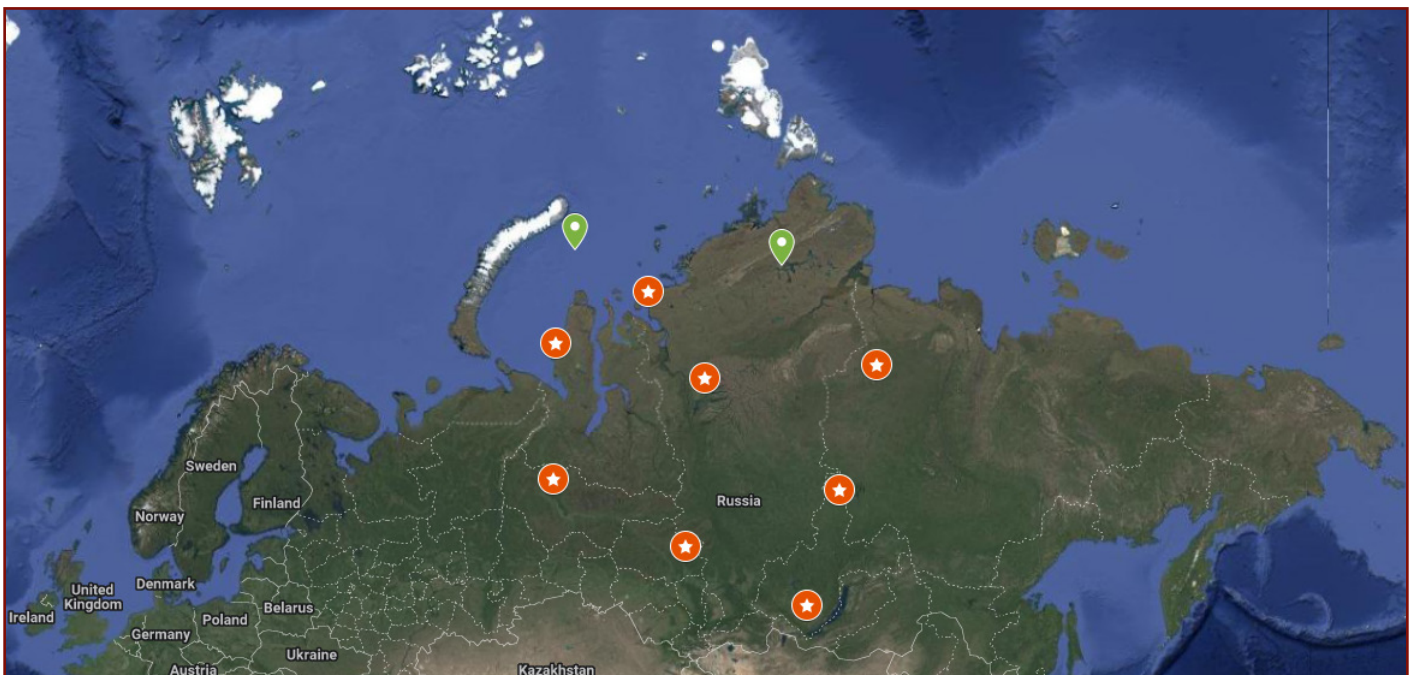
Terveket kell kidolgozni a stratégiai létesítmények védelmére és evakuálására a láva előntésének veszélyeztetett területekről. A régió evakuált stratégiai erőforrásai, például olaj, gáz, nemes- és nemesfémek, ércek, műtrágyák, élelmiszerek, víz, gyógyszerek számára biztonságos területeken tartaléktároló létesítményeket kell létrehozni.

A szibériai modern köpenycsóva dinamikájának megfigyelésére szolgáló tudományos kutatófúrások helyszínválasztásának indoklása

Ahhoz, hogy megértsük, milyen gyorsan és milyen irányban ágyazódik be és terjeszkedik a köpenycsóva, és milyen gyorsan hatol be a földkéreg repedéseibe, a legelső lépés a geotermikus és geofizikai paraméterek megfigyelése a mélyben. Az ilyen vizsgálatokhoz új kutak fúrására, valamint a hőmérséklet, a

nyomás, a gázösszetétel mintavételezésére, a magmás intenzitást jelző markerek, a szeizmikus zaj és más paraméterek rendszeres mérésére van szükség.

E tanulmányok esetében 10 pontot céloztak meg kutatófúrások fúrására (93., 94. ábra).



93. ábra.

A kutatófúrások fúrásához ajánlott 10 pont előzetes elhelyezkedése.

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. ábra.

A szibériai köpenycsóva előrehaladásának megfigyelésére ajánlott fúrások 10. táblázata, beleértve a fúrás nevét, koordinátáit, a közelben lévő települést vagy infrastruktúrát és a szakasz geológiai szerkezetét.

E kutak kiválasztási kritériumai a következő elveken alapultak:

1. A kutak elhelyezkedése a köpenycsóvafej behatolásával és terjedésével kapcsolatos termikus és geodinamikai anomáliák legnagyobb metszéspontjához képest. Ezen elv alapján egy kút a javasolt köpenycsóvafej felszínre emelkedés központi részének közelében, 7 kút pedig a javasolt magma szétterjedésének peremén helyezkedett el. Még egy kutat terveztek a Bajkál térségében, a kelet-szibériai kráter lábfala alatti feltételezett aktív magmafeltörés irányában. És még egy kutat terveztek a Kara-tenger térségében, hogy nyomon kövessék a köpenycsóva előrehaladását a sarkvidéki talapzat óceáni kérge alatt.

2. A kutak helyét optimálisan választották ki a további szeizmikus tomográfiai munkákhoz, hogy a kutak szeizmikus érzékelőinek információi a későbbi átalakítás során a lehető legtisztább 3D-képet adják. Vagyis a fúrásokban lévő szeizmikus érzékelők rácshálóját a felszín alatti szeizmikus tomográfia szempontjából optimálisan helyezték el.

3. A kutak helyét a fúróberendezések és a megközelítési utak szállítási lehetőségeinek (közlekedési megközelíthetőség) figyelembevételével választották ki. Mivel Nyugat- és Kelet-Szibéria északi része rendkívül nehéz terepviszonyokkal, mocsaras tájakkal, kevés úttal és szélsőséges éghajlati viszonyokkal rendelkezik, a fúrási helyek kiválasztásánál a tudományos kutatáshoz szükséges meglévő infrastruktúra - utak, települések és aktív fúróhelyek - elhelyezkedését vették alapul. Két helyszínt a Gazprom és a Rosneft tulajdonában lévő, jelenleg is aktív olajmezőkön választottak ki, míg a többi helyszínt olaj-, gáz- és egyéb ásványi lelőhelyek közelében lévő területeken jelölték ki. Meg kell jegyezni, hogy ha a megadott koordinátákon nem lehet fúrni, a kutak 10-20 kilométerrel eltolhatók

bármely irányba.

Ajánlott kutatási módszerek fúrólyukakban :

A köpeny fúvókájának átfogó megfigyelése és tanulmányozása a következő paraméterek gyűjtését igényli a kutatófúrásokban elhelyezett érzékelőkkel.

1. Hőmérséklet-megfigyelés:

hőmérsékletmérések különböző mélységekben a termikus anomáliák és a geotermikus áramlás fokozódásának elemzése érdekében a magma előrehaladása következtében a köpenycsóva terjedési régiójában.

2. Nyomás: a fúrólyuknyomás meghatározása a hidrodinamikai viszonyokban a magma és a fluidfázisok aktivitása következtében bekövetkező változások értékelésére.

3. Gázmintavétel: gázminták gyűjtése a mélységi tározókból, hogy tanulmányozhassuk azok összetételét és a magma aktivitásának lehetséges hatását.

4. Szeizmikus felmérések: standard és szélessávú szeizmikus érzékelők telepítése a szeizmikus aktivitás rögzítésére, hogy a kéreg és a köpeny részletes szeizmikus tomográfiáját hozzák létre a köpenycsóva állapotának folyamatos nyomon követése érdekében

5. Formációs folyadékok összetétele: a formációs folyadékok összetételének vizsgálata a lehetséges termikus vagy magmás feltöltődés azonosítása érdekében.

6. Geomechanikai vizsgálatok: a kőzetfeszültségek mérése a köpenycsóva behatolásából eredő deformációnak kitett litoszféra feszültségi állapotának elemzése céljából.

7. Elektromágneses módszerek:

elektromágneses vizsgálatok végzése a magma behatolásával összefüggő közegek elektromos tulajdonságaiban bekövetkező változások rögzítésére.

Az összegyűjtött adatok alapul szolgálnak majd a köpenycsóva dinamikájának átfogó modelljének felépítéséhez, valamint a szibériai geológiai folyamatokra gyakorolt hatásának értékeléséhez.

A magmás csatornák fúrásának és elzárásának sajátosságai a tervezett gáztalanítás során

A tervezett gázmentesítés során a fúrások fő célja a másodlagos magmás köpenycsónák nyomásának csökkentése, a magmarobbanások megelőzése, valamint az ellenőrzött gáz- és lávaelvonás megszervezése.

A kezdeti szakaszban a fúrást az üzemeltetők részvételével végzik, mivel a sekély mélységben a folyamat szabványosított technológiai feladatot jelent, amely minimális kockázatot jelent a személyzet számára. A hőmérséklet- és nyomásfigyelő rendszerekkel felszerelt hagyományos fúrótoronyokat használnak majd a folyamat ellenőrzésére és a normálistól való eltérésekre való azonnali reagálásra.

A kritikus mélység elérésekor és a magmarendszer aktív zónáihoz közeledve az embereket fenyegető kockázat jelentősen megnő. Ebben a szakaszban a műveleteket teljesen automatizált üzemmódba kell helyezni. Speciális, automatikus vezérlésű fúrótoronyokat fognak használni. A fúrási folyamatot távolról szabályozzák majd egy olyan szoftver segítségével, amely valós időben elemzi a beérkező adatokat, és korrigálja a berendezés műveleteit. A vezérlés pontosságának javítása érdekében a kezelők virtuális valóság technológiát használnak majd, amely a berendezés részletes vezérlését teszi lehetővé anélkül, hogy fizikailag a veszélyes zónában tartózkodnának. Ez csökkenti a nagynyomású gázok felszabadulásával vagy a berendezések lökéshullámok általi megsemmisülésével járó balesetek valószínűségét.

A fúrókomplexumot és a környezetet drónok és robotok segítségével fogják felügyelni. A kamerákkal, hőkamerákkal és érzékelőkkel felszerelt drónok rögzítik majd a gázszivárgásokat, a termikus anomáliákat és

a szeizmikus aktivitást. A közvetlenül a fúrási zónában dolgozó robotok adatokat gyűjtenek majd a környezet hőmérsékletéről, nyomásáról és kémiai összetételéről, és továbbítják azokat az automatizált irányítóközpontoknak. Ezek a technológiák minimalizálják az emberek jelenlétét a nagy kockázatú területen, és magas szintű pontosságot és biztonságot biztosítanak.

A fúrás befejezése után a projekt következő szakasza az ellenőrzött gázmentesítés - a nagy mennyiségű láva fokozatos nyomáscsökkentése és kivonása - lesz. A végső fázisban, miután a magma és a gázok mennyisége jelentősen lecsökkent, szükség lehet egy ellenőrzött robbantásra a magma feláramlási útvonalainak lezárása érdekében. Az egyik javasolt módszer a fúrólyukban történő irányított nukleáris robbantás. Célja a tektonikus feszültségek enyhítése és a magmacsatornákat elzáró stabil szerkezeti akadályok létrehozása.

Ez a megközelítés magában foglalja a kőzetek törését a nagy feszültségű zónákban, majd a termikus energia hatására történő olvasztását és hűtését. Ez egy olyan monolitikus gát kialakítására szolgálna, amely teljesen vagy részben megakadályozná, hogy a magma a felszínre jusson. A termodinamikai hatások csökkenthetik a tektonikus feszültséget is, csökkentve ezzel a további kitörések valószínűségét.

A nukleáris robbanások megvalósítása nagyfokú pontosságot igényel a számítások során, beleértve a litosztatikus nyomás, a kőzetkeménység és sűrűség, valamint a magmás olvadék jellemzőinek becslését. Ezeket a tényezőket figyelembe kell venni a módszer hatékonyságának maximalizálása és a lehetséges kockázatok minimalizálása érdekében.

A fúrások optimális időpontjának kiválasztása a tervezett gázmentesítési műveletek során

Jelenleg szakembereink a tervezett gázmentesítés optimális fúrási időkereteinek tanulmányozására összpontosítanak. Bár még korai lenne végleges következtetéseket levonni, az előzetes számítások már most azt mutatják, hogy pontosan ki lehet választani a legkedvezőbb időpontot a gázmentesítés megkezdésére. Az eredmények azt mutatják, hogy megfelelő időzítés esetén az esetleges komplikációk kockázata többszörösére csökkenthető.

A fúrási folyamatnak nemcsak a kőzetek fizikai és mechanikai jellemzőit kell figyelembe vennie, beleértve a kőzetek szilárdságát és törését, hanem az égi mechanikához kapcsolódó időbeli paramétereket is. A számításokat a

Földnek az ekliptikán elfoglalt helyzete, a Hold fázisa, a nagyobb bolygók, például a Jupiter helyzete és a naptevékenység aktuális szintje alapján kell elvégezni. Emellett fontos tényező a mélyfókuszú földrengések megfigyelése a jövőbeli fúrások térségében, mivel ezek jelentősen növelhetik a helyi szeizmikus aktivitást.

Eddig kialakult egy általános kép a folyamat mechanizmusáról és főbb szabályszerűségeiről, de ezek az adatok további többszörös ellenőrzést igényelnek. A kapott eredményeket nemcsak a mi tudományos csapatunknak kell alaposan ellenőriznie, hanem más szakemberek független tanulmányaival és modelljeivel is meg kell erősíteni.

A szibériai köpenycsóva tervezett gázmentesítésének eredményeit bemutató forgatókönyvek

A szibériai köpenycsóva tervezett gáztalanítása során három fő forgatókönyv lehetséges, amelyek a projekt két szakaszán alapulnak: a korai és a későbbi szakaszon. Tekintsük át ezeket részletesen.

1. Minimális kár Oroszország területén

Ha a másodlagos magmás forrásokból származó láva gáztalanításának és a felesleges láva kibocsátásának folyamatát nemzetközi szakértői csoport modellezi, és a számításokat gondosan és pontosan végzik el, figyelembe véve minden geológiai sajátosságot, a gáztalanítás mindkét szakasza baleset és

komplikációk nélkül fog lezajlani. Ezután az Oroszország területét érő károk minimálisra csökkennek: a veszteség az ország területének 5-7%-a, szélsőséges esetben akár 10%-a is lehet (a becsapódás sugara kb. 500-600 km). E forgatókönyv keretében biztosítható Krasznojarszk régió nagyvárosainak védelme, és elkerülhető lesz az emberéletek elvesztése. Továbbá feltételezhető, hogy az események kedvező alakulása esetén a lávaáramlás az Északi-sarkvidéki tengerek felé terelődhet, ami lehetővé tenné Oroszország számára, hogy a partvonalának bővítésével növelje területét.

2. Átlagos kár Oroszország területén

Ez a forgatókönyv feltételezi, hogy a gázmentesítés korai szakasza sikeres, de a későbbi szakaszokban előre nem látható nehézségek merülhetnek fel, például hirtelen gázrobbanás vagy lávakibocsátás. Mivel a gázok és a láva egy része ekkorra már kiszellőzik, a következmények kevésbé lennének pusztítóak. Előfordulhat az Izlandra vagy Hawaiiira jellemző folyékony bazaltos láva kitörése, vagy mérsékelt robbanékonyságú kitörés. Ebben az esetben a lehetséges területvesztés 25-30%-ra (kb. 4-5 millió km²) nőne. A következmények a magtól 1000 km-es körzetben lévő városokat is érinthetnék. Ez a forgatókönyv azonban nem vezetne globális katasztrófához a civilizáció számára vagy visszafordíthatatlan pusztuláshoz Oroszország területén. Az emberiség képes lesz megbirkózni a felmerült éghajlati és környezeti kihívásokkal.

3. Maximális kár Oroszországnak és a világnak

Ez a forgatókönyv feltételezi, hogy a késői kezdeményezés vagy a nem megfelelően képzett szakemberek komoly problémákhoz vezetnek. A kutatás hiánya, egy téves számítás, vagy a puha vagy töredezett kőzetben történő fúrás megzavarhatja a műveletet. Ha a komplikáció a gázmentesítés korai szakaszában következik be, amikor a nyomás a legnagyobb, az két katasztrófális kimenetel egyikét okozhatja: az egész szibériai köpenycsóvarendszer azonnali robbanását vagy lassú, de nagyméretű láva kitörését, hasonlóan a szibériai csapdák kialakulásához. A potenciális kockázatok ellenére egy ilyen esemény valószínűsége rendkívül alacsony, mivel nehéz elképzelni egy ilyen összetett projekt megvalósítását megfelelő nemzetközi előkészítés nélkül.

Az optimista és legvalószínűbb változat

Oroszország területének csak 5-7%-ának elvesztését feltételezi minimális károkkal. Még a későbbi szakaszok komplikációi esetén is 25-30%-ra nőhet a kár, ami még mindig sokkal kedvezőbb, mint a tétlenség következményei. A tervezett gázmentesítés során bekövetkező súlyosabb károk kockázata Oroszország és az egész világ számára elhanyagolható.

A tervezett gázmentesítés megvalósítása egyedülálló tapasztalatokkal fogja ellátni Oroszországot a globális geodinamikai kockázatok kezelésében, ami megerősíti nemzetközi tudományos és technológiai vezető szerepét. A projekt sikeres megvalósítása bizonyítani fogja az ország képességét a bolygó méretű kihívásokkal való megbirkózásra, hozzájárulva a globális együttműködés erősítéséhez a természeti katasztrófák megelőzése terén. Ez nemcsak a hazai politikai és társadalmi környezetet fogja stabilizálni, hanem a globális kihívások kezelése érdekében a nemzetközi együttműködést is erősíteni fogja.

A szibériai köpenycsóva szabályozott gáztalanítása nemcsak a helyi zónára, hanem más vulkáni rendszerekre, például a Yellowstone-ra és a világ sztratóvulkánjaira is hatással lehet. A magmatározók és dinamikájuk egyetlen összekapcsolt globális hálózatot alkotnak, amely egyetlen geomechanikai mechanizmusként működik. Az egyik szegmensben történő ellenőrzött nyomáscsökkentés csökkentheti a magmatározókban lévő feszültségrendszert, megakadályozva ezzel a láncreakciókat és a kitöréseket. Ezt úgy lehet elképzelni, mint egy autógumi nyomáscsökkentését: a gumibroncs egy részének nyomáscsökkentése újra eloszthatja a terhelést, és elkerülheti a szakadást a kritikusan feszült területeken. A gázmentesítés hasonló megközelítése globális szinten segíthet a magmás rendszerek stabilizálásában.

Így a tervezett, ellenőrzött gázmentesítés végrehajtása minden esetben az egyetlen esély Oroszország és az egész emberiség megmentésére, ami összehasonlíthatatlanul kifizetődőbb és ésszerűbb, mint a tétlenség. Ez a forgatókönyv elkerüli a globális katasztrófát, és időt ad az emberiségnek további megoldások kidolgozására.

A jelentős kilátások ellenére azonban még egy optimista forgatókönyv sikeres megvalósítása

is lenyűgöző méretű kihívást jelent. Most kell cselekedni, mivel a késlekedés növeli a katasztrófális események valószínűségét. Meglepő módon egy ilyen projekt megvalósítása Oroszországon belül ellenvetésekbe ütközhet, tekintettel az infrastruktúra tönkretételének és a stratégiai erőforrások feletti ellenőrzés meggyengülésének lehetséges kockázataira.



Következtetések

A szibériai köpenycsóva olyan globális geodinamikai fenyegetést jelent, amely méretét tekintve a nagy szupervulkánok ezer katasztrofális kitöréséhez hasonlítható. Ellenőrizetlen kitörés esetén bolygó méretű következményekkel járhat, beleértve a jégkorszak kialakulását, az ökoszisztémák pusztulását, az infrastruktúra pusztulását és az emberiség elvesztését. Ezek a kockázatok azt diktálják, hogy megelőző intézkedéseket kell hozni a szibériai köpenycsóva magmás rendszerének tervezett gázmentesítésével.

A tétlenség spontán, ellenőrizetlen kitörések veszélyét teremti meg, amelyek következményei nemcsak Oroszország, hanem az egész bolygó számára katasztrofálisak lennének. A magmás forró pontok ellenőrzött nyomáscsökkentése segít elkerülni a legrosszabb forgatókönyveket, és időt ad az emberiségnek a hosszú távú megoldások kidolgozására.

Ezen túlmenően a légköri vízgenerátor-technológia mindennapi használatba való integrálása, valamint a szibériai füstgázmentesítés új lehetőségeket teremt az ökológiai egyensúly helyreállítására. Ez megtisztítja az óceánokat a műanyagtól, erősíti a vízkörforgást, és helyreállítja a bolygó hőegyensúlyát. Az ilyen megoldások integrált megvalósítása

stabilizálhatja az éghajlati helyzetet és biztosíthatja az egész emberiség jövőjét, időt nyerve arra, hogy megoldást találjunk a 12 000 éves ciklus során katasztrofális eseményeket okozó külső kozmikus kényszer problémájára.

Ezek a kihívások sürgős nemzetközi együttműködést igényelnek a különböző tudományágak tudósai között, beleértve a kvantumfizikusokat is, hogy átfogó megoldásokat dolgozzanak ki és hajtsanak végre. A geopolitikai és katonai konfliktusok azonban megakadályozzák ezt az együttműködést. Ezért globális moratóriumra van szükség a háborúkra és a katonai erőforrások átirányítására a katasztrófacsökkentésre és a humanitárius erőfeszítésekre. Az emberiségnek már csak 4-6 év viszonylag stabil idő áll rendelkezésére a szükséges intézkedések megtételére.

Ha megteremtődnek a nyílt együttműködés feltételei, a tudósok nem kezdenek mindent elölről, mivel már van valós tapasztalat és megértés az ok-okozati összefüggésekről ebben az irányban. Ha az emberiség nem helyezi előtérbe a globális egységet és a tudományos együttműködést, az visszafordíthatatlan következményekkel jár a földi életre nézve.

■ 1. Függelék

A szeizmikus aktivitás elemzésének módszertana magában foglalta a Nemzetközi Szeizmológiai Központ (ISC) honlapjáról kapott adatok letöltését és speciális feldolgozását. Mivel az adatok különböző országokból és kutatóintézetekből származó különböző forrásokat és különböző nagyságrendeket (Mw, Ms, Mb, ML, MD stb.) tartalmaznak, egy speciális adatfeldolgozási algoritmust hajtottak végre a különböző forrásokból a megfelelő nagyságrendtípus kiválasztására. Két különböző megközelítést használtunk:

1. Az egyiket a szövegben **specifikus medián magnitúdó algoritmusnak nevezzük**. A módszer lényege, hogy kiválasztunk egy preferált magnitúdóbecslést, és az eseményt akkor vesszük fel a mintába, ha a preferált becslés a kívánt magnitúdótartományon belül van. A preferált magnitúdóbecslést úgy választjuk ki, hogy a becslések között a következő típusú magnitúdókra keresünk (a preferencia sorrendjében): Mw, ML, MS, MS, MS, Mb, MD, MV. Ha egy eseményre vonatkozóan egy preferált típushoz tartozó magnitúdókból van minta, akkor a medián kiszámításához a kiválasztott típushoz tartozó összes magnitúdóbecslést vesszük az adott eseményre vonatkozóan. Ezután a mediánt találjuk meg számukra. Ha egy adott eseményre nincs becslés a fenti preferált típusok egyikéből sem (ami ritka, a teljes adatbázisban az eseményeknek csak néhány százaléka), akkor bármely olyan magnitúdóbecslés kiválasztásra kerül, amelynek értéke megegyezik az adott

esemény összes magnitúdótípusából számított mediánnal.

2. A szövegben **maximális magnitúdó algoritmusnak** nevezik. Az adott eseményre vonatkozó összes magnitúdóbecslés közül a maximális értékkel rendelkező magnitúdóbecslést választja ki.

Az első algoritmus átlagosan enyhe magnitúdócsökkenést eredményez a maximálisan átvitt értékhez képest, de a tapasztalatok szerint a medián algoritmus a Gutenberg-Richter-törvény és más szabályszerűségek megfelelő viselkedését adja, és meglehetősen jól egyezik más szeizmológiai bázisok, például az Egyesült Államok Geológiai Intézetének (USGS) és az Integrált Szeizmológiai Kutatóintézeteknek (IRIS) az adataival.

A második algoritmus a kiválasztott értéknél magasabb értékkel rendelkező, bármelyik kutatóintézet által rögzített földrengések számát becsüli meg. Ez a megfontolás lehetővé teszi, hogy lássuk a kiválasztott nagyságtartományba eső földrengések számának tendenciáját.

A „A szeizmikus aktivitás növekedése, mint a szibériai magmás köpenycsóva aktivitása következtében bekövetkező lemezdestabilizáció jele” című **részben bemutatott összes grafikon az első algoritmus** - a medián magnitúdóértékek speciális algoritmus - segítségével került ábrázolásra (44-75. ábra).

A magnitúdó kiválasztása után a kapott adatokat az ISC adatbázisban szereplő eseménytípusok szerint szűrtük, hogy kizárjuk a bányászati műveletek során az emberi tevékenység által okozott eseményeket: robbanások, lehetséges robbanások, bányacsapások stb. A kizárt eseménytípusok a következők voltak:

km = ismert bányarobbanás

sm = feltételezett bányarobbanás

kh = ismert kémiai robbanás (nem szabványos IMS)

sh = feltételezett kémiai robbanás (nem szabványos IMS)

kx = ismert kísérleti robbanás

sx = feltételezett kísérleti robbanás

kn = ismert nukleáris robbanás

sn = feltételezett nukleáris robbanás

Mivel Oroszországban sok bányászati tevékenység folyik, az ISC-adatbázist az Orosz Tudományos Akadémia 2025. januári egységes geofizikai felmérésével hasonlították össze, amely az összes ismert robbanást és bányacsapást felsorolja Oroszországban. Ezeket az eseményeket is kizárták, hogy a kapott adatokban ne maradjanak robbanásoknak megfelelő események.

Hivatkozások listája

- 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-Issledovatel'skie Publikatsii.
- Cox, C., & Chao, B. F. (2002). Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998. *Science*, 297(5582), 831–833. <https://doi.org/10.1126/science.1072188>
- Davydova, V.O., Shcherbakov, V.D., Plechov, P.Yu., Koulakov, I.Yu., 2022. Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezymianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 421, 107422. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107422>
- D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports*, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>
- Dannberg, J., & Sobolev, S. (2015). Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept. *Nature Communications*, 6, 6960. <https://doi.org/10.1038/ncomms7960>
- Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48(7). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>
- Dobretsov, N.L., Kirdyashkin, A.G. & Kirdyashkin, A.A., 2001. *Deep Geodynamics*. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, GEO Branch, 408 p.
- Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism. *Earth-Science Reviews*, 247, 104595. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>
- Dyachenko, A. I. (2003). Earth's magnetic poles. MCCME.
- Elkins-Tanton, L. T., Grasby, S. E., Black, B. A., Veselovskiy, R. V., Ardakani, O. H., & Goodarzi, F. (2020). Field evidence for coal combustion links the 252 Ma Siberian Traps with global carbon disruption. *Geology*, 48(10), 986-991. <https://doi.org/10.1130/G47365.1>
- Ernst, R. E., & Buchan, K. L. (2002). Maximum size and distribution in time and space of mantle plumes: evidence from large igneous provinces. *Journal of Geodynamics*, 34, 309-342.
- Federal Research Center, Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, n.d. Available at: <http://www.ceme.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.