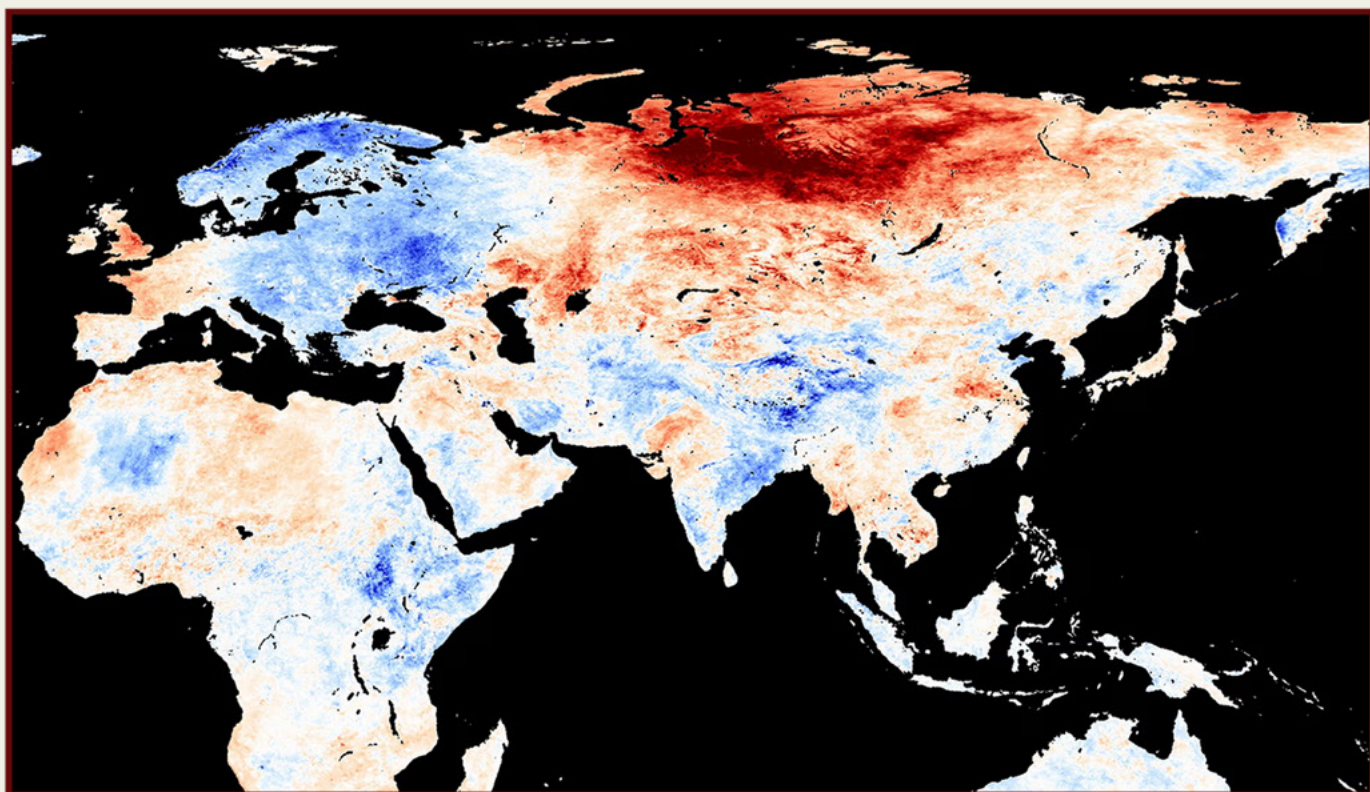


მაგმის ამოფრქვევის შესახებ ციმბირში და ამ საკითხების მოგვარების სტრატეგიები



**მაგმის ამოფრქვევის შესახებ ციმბირში
და ამ საკითხების მოგვარების სტრატეგიები**

შინაარსი

დედამიწაზე კლიმატის ცვლილების გეოდინამიკური მოდელის მოკლე აღწერა დროის მიმდინარე პერიოდში	5
ბირთვის გადაადგილება ციმბირისკენ 1998 წელს	17
ციმბირი და ციმბირის არქტიკა 3-4-ჯერ უფრო სწრაფად თბება, ვიდრე დანარჩენი მსოფლიო	23
ციმბირის პლუმის აწევის არაპირდაპირი ნიშნები	28
მუდმივი ყინულოვანი საფარის დნობა	30
ტალახის ვულკანიზმის გამოვლინებები	32
ნიადაგის გათბობა	34
ჰაერის ზედაპირის ტემპერატურა	35
ელვის დარტყმების ზრდა	37
ოზონის შრის დაშლა	39
მაგმატური პლუმის სტრუქტურა, შესაძლო ზომები და ლოკალიზაცია ლიტერატურულ და დაკვირვებულ მონაცემებზე დაყრდნობით	41
მაგმატური პლუმის ლოკალიზაცია	47
გაზრდილი სეისმური აქტივობა, როგორც ტექტონიკური ფილების დესტაბილიზაციის ნიშანი	51
ციმბირის პლუმის ამოფრქვევის გარდაუვალობის დასაბუთება	75
სცენარი 1. ციმბირის პლუმის ერთჯერადი ამოფრქვევა	77
სუპერვულკანების და ვულკანური სისტემების გააქტიურება	84
მჟავე წვიმები	86
ვულკანური ზამთარი	87
სცენარი 2. ციმბირის პლუმის თანდათანობითი ამოფრქვევა	90
ციმბირის პლუმის თანდათანობითი გარღვევის შედეგები რუსეთისთვის	95
ციმბირის პლუმის თანდათანობითი გარღვევის შედეგები მთელი მსოფლიოსთვის	97
ციმბირის პლუმის თანდათანობითი გარღვევის გრძელვადიანი შედეგები პლანეტაზე	98
სცენარი 3. დაგეგმილი კონტროლირებადი დეგაზაცია	99
ვულკანური გეოინჟინერიის არსებული მეთოდები	99
ციმბირის პლუმის დაგეგმილი დეგაზირების პროგრამის მაგალითი	106
კვლევითი ჭაბურღილების ადგილმდებარეობის არჩევის დასაბუთება ციმბირის თანამედროვე მაგმატური პლუმის დინამიკის მონიტორინგისთვის	108
ბურღვისა და მაგმატური არხების ბლოკირების მახასიათებლები დაგეგმილი დეგაზაციის დროს	111

შინაარსი

ჭაბურღილების ბურღვისთვის ოპტიმალური დროის შერჩევა დაგეგმილი დეგაზაციის დროს	113
დასკვნები	116
დანართი 1	117
ლიტერატურის სია	119

დედამიწაზე კლიმატის ცვლილების გეოდინამიკური მოდელის მოკლე აღწერა დროის მიმდინარე პერიოდში

ბოლო 30 წლის განმავლობაში დედამიწამ განიცადა კლიმატის ცვლილების, ანომალიებისა და ექსტრემალური მოვლენების უპრეცედენტო და სინქრონული ზრდა პლანეტის ყველა ფენაში და მის გეოფიზიკურ პარამეტრებში. ამ ცვლილებების პროგრესი ექსპონენტურად ჩქარდება. მეცნიერული მონაცემების ყოვლისმომცველი ანალიზი აჩვენებს, რომ დედამიწის ყველა გარსში ანომალიების ზრდის ძირითადი მიზეზებია ასტრონომიული ციკლები, რომლებიც ხდება მზის სისტემაში ყოველ 12000 წელიწადში ერთხელ.

გარე ასტრონომიული გავლენის ჰიპოთეზა დასტურდება მზის სისტემის სხვა პლანეტებზე და მათ თანამგზავრებზე მსგავსი კლიმატური, გეოდინამიკური და მაგნიტური ანომალიების დაკვირვებით, რომლებიც ხდება დროის მიმდინარე პერიოდში დედამიწაზე სინქრონულად ცვლილებებთან. მაგალითად, ურანზე, იუპიტერსა და ვენერაზე დაფიქსირდა ქარის სიჩქარის ზრდა და ქარიშხლების

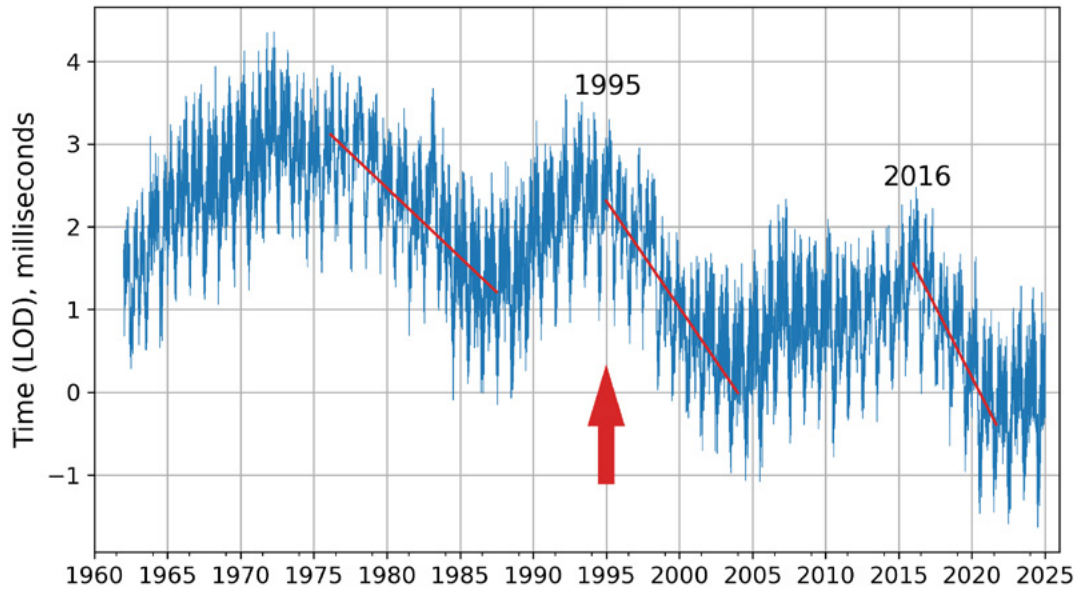
ზომა. ამავდროულად, მარსზე შეინიშნება პოლარული ყინულის დნობა, ხოლო ვულკანური აქტივობა აგრძელებს მატებას ვენერასა და მარსზე. გარდა ამისა, მარსზე სეისმური აქტივობა იზრდება, რაც მიუთითებს ანომალური გეოდინამიკური აქტივობის გაჩენაზე.

მიმდინარე ციკლში 12 000 წლიანი ასტრონომიული ციკლორობის შედეგად დედამიწის სისტემაში კრიტიკული ცვლილებები 1995 წელს დაიწყო, როდესაც მნიშვნელოვანი გეოფიზიკური ანომალიები დაფიქსირდა, მათ შორის დედამიწის ბრუნვის მკვეთრი აჩქარება (სურ. 1) და მისი ღერძის გადაადგილება¹ (სურ. 2), რაც ჩრდილოეთ მაგნიტური პოლუსის მკვეთრი დრიფტის დასაწყისია² (სურ. 3). ეს ცვლილებები დედამიწის ბირთვში მნიშვნელოვან ცვლილებებზე მიუთითებს.

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

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

დღის სანგრძლივობის გადახრა

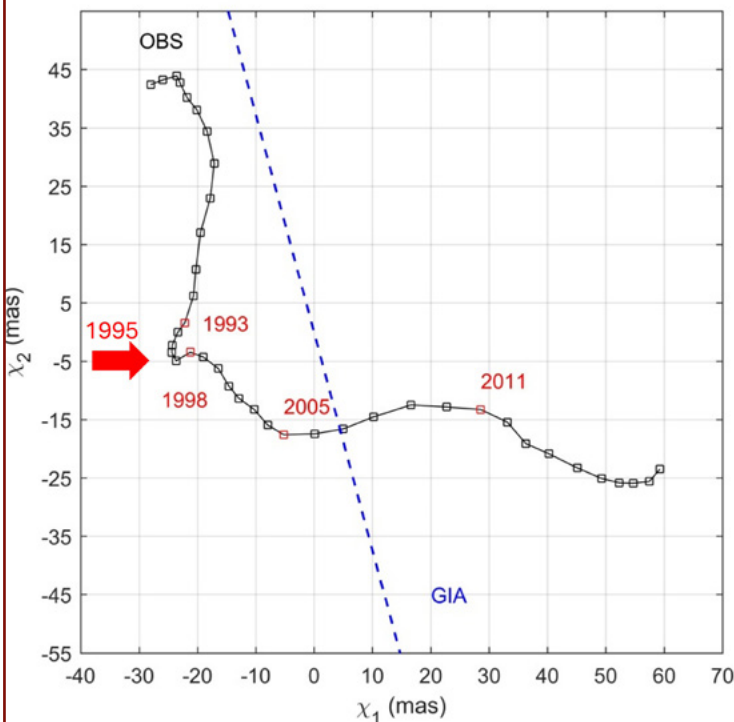


ნახ. 1.

დღის სანგრძლივობის გადახრა მილიწამებში 1962 წლიდან 2023 წლამდე პერიოდისთვის. მონაცემთა წყარო: პარიზის ობსერვატორიის IERS დედამიწის ორიენტაციის ცენტრი. დღის სანგრძლივობა - დედამიწის ორიენტაციის პარამეტრები:

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

ნახატზე წითელი ხაზები არის ტრენდული ხაზები, რომლებიც აჩვენებენ რამდენად სწრაფად მცირდება დღეები. მაგალითად, მარცხნივ ხაზი უფრო ბრტყელია, ხოლო მარჯვენა ხაზი, აჩქარების ხაზი 2016 წლიდან, უკვე თითქმის ვერტიკალურია, ანუ დღეები ბევრჯერ მცირდება, რაც იმას ნიშნავს, რომ პლანეტა უფრო სწრაფად ბრუნავს.



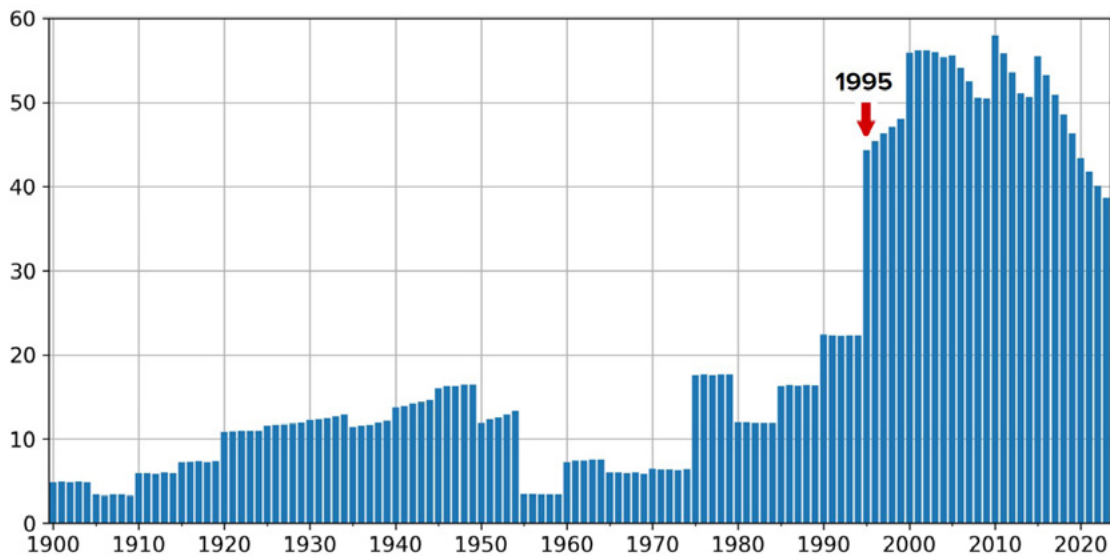
ნახ. 2.

დაკვირვებული აგზნების გრძელვადიანი ტრაექტორია წლიური და ჩენდლერის ციკლების ამოღების შემდეგ მოძრავი საშუალო მეთოდის გამოყენებით (შავი ხაზი კვადრატებით) და პოლარული დრიფტის მიმართულება GIA-ს გამო (ლურჯი წყვეტილი ხაზი). მოძრავი საშუალო ქვეჯგუფის ზომა აღებულია 84 თვედ, რომლისთვისაც ყველაზე ნაკლებად საერთო ჯერადი არის 12 თვე (წლიური ციკლი) და 14 თვე (ჩენდლერის ციკლი), ლიუს და სხვების კვლევის მიხედვით. (2017).

წყარო: Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). პოლარული დრიფტი 1990-იან წლებში აიხსნება ხმელეთის წყლის შენახვის ცვლილებებით. გეოფიზიკური კვლევის წერილები, 48(7).

<https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

ჩრდილოეთ მაგნიტური პოლუსის სიჩქარე (კმ/წელიწადში)



ნახ. 3.

ჩრდილოეთ მაგნიტური პოლუსის მოძრაობის სიჩქარე (კმ/წელი)

წყარო: NOAA ჩრდილოეთ მაგნიტური პოლუსის პოზიციის მონაცემები

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

ჰიპოთეზის მიხედვით, ამ მომენტში მზის სისტემამ დაიწყო შესვლა ზონაში, რომელშიც გარე კოსმოსური ზეგავლენამ დაიწყო მნიშვნელოვანი ზემოქმედება პლანეტებზე, კერძოდ მათ ბირთვებზე. 1995 წელს დედამიწის ბირთვში მომხდარი ცვლილებები მიუთითებს გარე ბირთვის გაცხელების ზრდაზე, რაც იმაზე მეტყველებს, რომ დედამიწის ბირთვში დაიწყო დამატებითი ენერგიის შესვლა. დედამიწის ბირთვში ასეთი ღრმა ცვლილებები მოითხოვს კვადრილიონჯერ მეტ ენერგიას, ვიდრე კაცობრიობამ გამოიმუშავა ცივილიზაციის მთელი ცხოვრების განმავლობაში.

დედამიწის ბირთვში გარე გავლენის შემოსვლამ გამოიწვია მანტიის დნობა და მაგმის ზედაპირზე აწევასთან დაკავშირებული პროცესების გააქტიურება, რამაც გამოიწვია სეისმური და ვულკანური აქტივობის ჯაჭვური რეაქცია და ასევე ხელი შეუწყო სიღრმიდან გათბობის ზრდას

და კლიმატური კატაკლიზმების ზრდას მთელს მსოფლიოში.

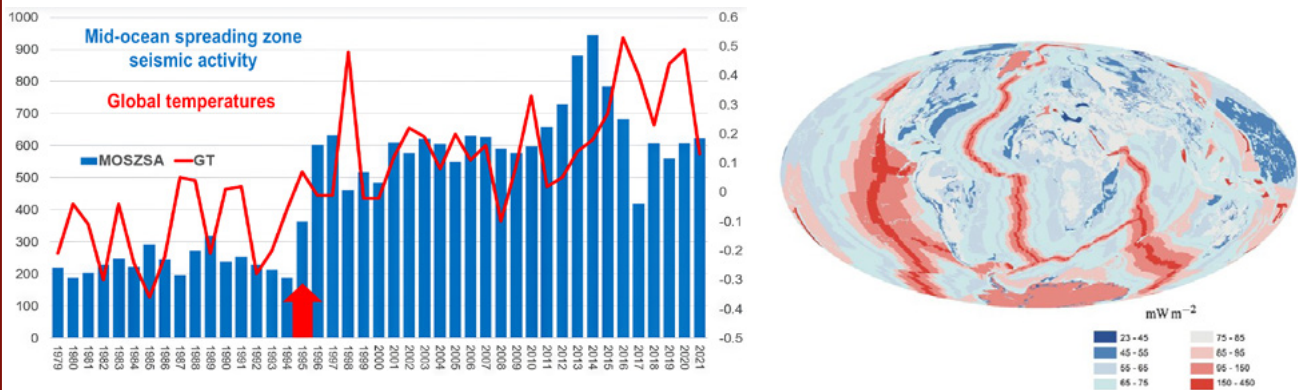
მაგალითად, 1995 წლიდან შეინიშნება სეისმური აქტივობის მნიშვნელოვანი ზრდა, რაც გამოიხატება მიწისძვრების სიხშირის, სიდიდისა და ენერგიის მატებაში. ეს ტენდენცია შეიმჩნევა როგორც კონტინენტებზე, ასევე ოკეანის ფსკერზე (ნახ. 4) და მოიცავს რეგიონებს, რომლებსაც აქამდე არ ჰქონდათ სეისმური აქტივობა, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ ცვლილებები გლობალური ხასიათისაა.

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ 5.0 და მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების რაოდენობის ზრდა არ არის დაკავშირებული სეისმური მონიტორინგის ტექნოლოგიების გაუმჯობესებასთან (ნახ. 5), მაგრამ ასახავს რეალურ ცვლილებებს დედამიწის გეოდინამიკურ სისტემაში. საერთაშორისო სეისმოლოგიური ცენტრის შემაჯამებელი მონაცემები ადასტურებს, რომ მიწისძვრების

რაოდენობა მნიშვნელოვნად გაიზარდა
ბოლო 25 წლის განმავლობაში და

აგრძელებს ზრდას (სურათი 6).

მიწისძვრების რაოდენობის ზრდა ოკეანის ფსკერზე შუა ოკეანის ქედების გასწვრივ



ნახ. 4.

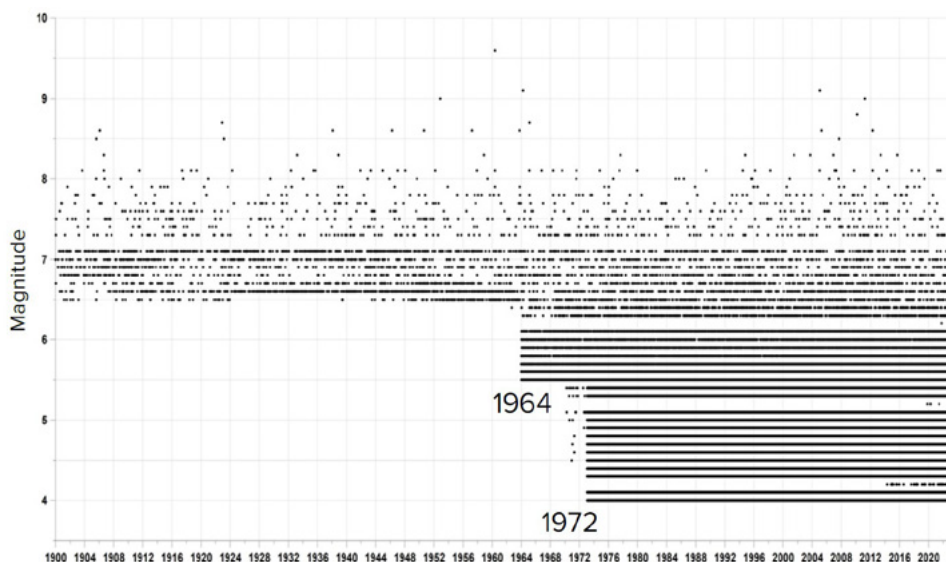
ოკეანის ფსკერზე მიწისძვრების და
გლობალური ატმოსფერული ტემპერატურის
ერთდროული ზრდა (მარცხნივ). შუა ოკეანის
ქედების გეოთერმული გათბობა (მარჯვნივ),
Davies & Davies, 2010 წ.

წყარო: Viterito, A. (2022). 1995: მნიშვნელოვანი
გადახრის წერტილი უახლეს გეოფიზიკურ
ისტორიაში. გარემოსდაცვითი მეცნიერებებისა
და ბუნებრივი რესურსების საერთაშორისო

ჟურნალი, 29 (5)

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

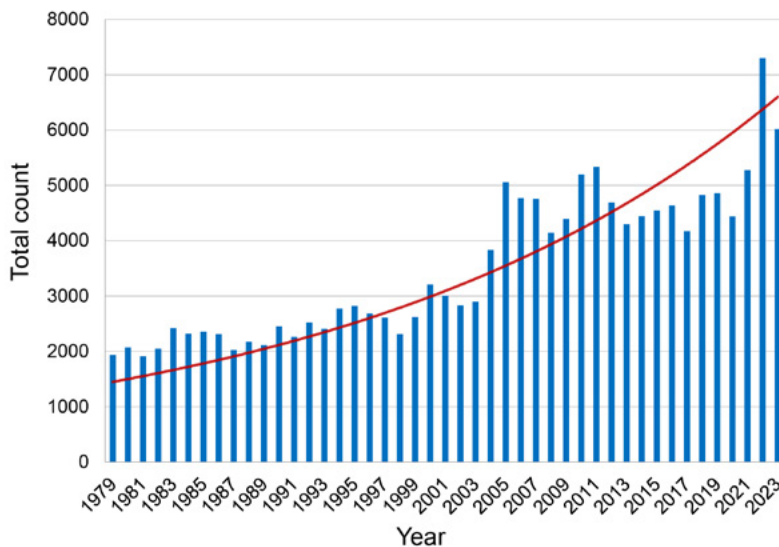
დიაგრამა ასახავს მიწისძვრების რაოდენობის
მკვეთრ ზრდას 1995 წელს ოკეანის ფსკერზე
შუა ოკეანის ქედების გასწვრივ და ოკეანის
ფსკერის სეისმურობის მჭიდრო კორელაციას
ატმოსფერულ ტემპერატურასთან, რაც
მიუთითებს როგორც ოკეანის, ასევე ატმოსფეროს
გათბობას დამატებით ღრმა წყაროზე.



ნახ. 5.

გრაფიკზე ნაჩვენებია სხვადასხვა სიძლიერის მიწისძვრები ცალკეულ წლებში შავი წერტილების სახით.
1964 წლამდე დაფიქსირდა მხოლოდ 6,5 მაგნიტუდის და მეტი სიმძლავრის მიწისძვრები. 1964 წლიდან
(უფრო მგრძნობიარე სენსორების დაყენებით) - 5.5-დან და უფრო მაღალი. 1972 წლიდან - 4.0-დან და
ზემოთ, ადგილმდებარეობის მიუხედავად.

ISC M5+ მიწისძვრები 1979–2023 წლებში



ნახ. 6. 5.0 ან მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრები 1979 წლიდან 2023 წლამდე, ISC მონაცემთა ბაზის მიხედვით.

მონაცემების ნიმუში იქნა აღებული მაქსიმალური სიდიდის მნიშვნელობების ალგორითმის გამოყენებით, რომელიც შეიცავს ISC მონაცემთა ბაზაში თითოეული მოვლენისთვის (იხ. დანართი 1).

გარდა ამისა, გაიზარდა სეისმური აქტივობა ვულკანების მახლობლად, ისევე როგორც სუპერვულკანებზე, როგორიცაა Yellowstone აშშ-ში, Campi Flegrei იტალიაში, Taupo ახალ ზელანდიაში და სხვა ვულკანებზე, რომლებიც ამოიფრქვა 12 000 წლის წარსულ ციკლებში. ვულკანური ამოფრქვევის დღეების საერთო რაოდენობაც იზრდება, რასაც თან ახლავს ანომალიური ამოფრქვევები, რომლებშიც ამოფრქვეული ლავა ზედმეტად თბება და აქვს ატიპიური შემადგენლობა, დამახასიათებელი მაგმისთვის მანტიის ღრმა ფენებიდან.^{3,4,5,6,7}

განსაკუთრებით აღსანიშნავია ღრმა ფოკუსის მიწისძვრების რაოდენობის ზრდა, რომლებიც ხდება 300 კმ-ზე მეტ სიღრმეზე, ზოგჯერ კი დედამიწის

ზედაპირიდან 750 კმ-ს აღწევს. ეს ფენომენი ხდება არა დედამიწის ქერქში, არამედ მანტიაში, სადაც მანტიის მასალა, როგორც წესი, ელასტიურად დეფორმირდება, და არ იშლება, რაც უჩვეულოს ხდის ასეთი მიწისძვრების ბუნებას.

ვინაიდან ეს მიწისძვრები ხდება ექსტრემალური წნევისა და მაღალი ტემპერატურის პირობებში, შეიძლება დავასკვნათ, რომ ეს ძლიერი აფეთქებები ენერგიით შედარებულია დედამიწის მანტიის შიგნით მრავალი ატომური ბომბის ერთდროულ აფეთქებასთან. გარდა ამისა, ღრმა ფოკუსის მიწისძვრები ხშირად იწვევს ძლიერ მიწისძვრებს დედამიწის ქერქში, რაც ზრდის მათ დესტრუქციულ გავლენას.^{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>

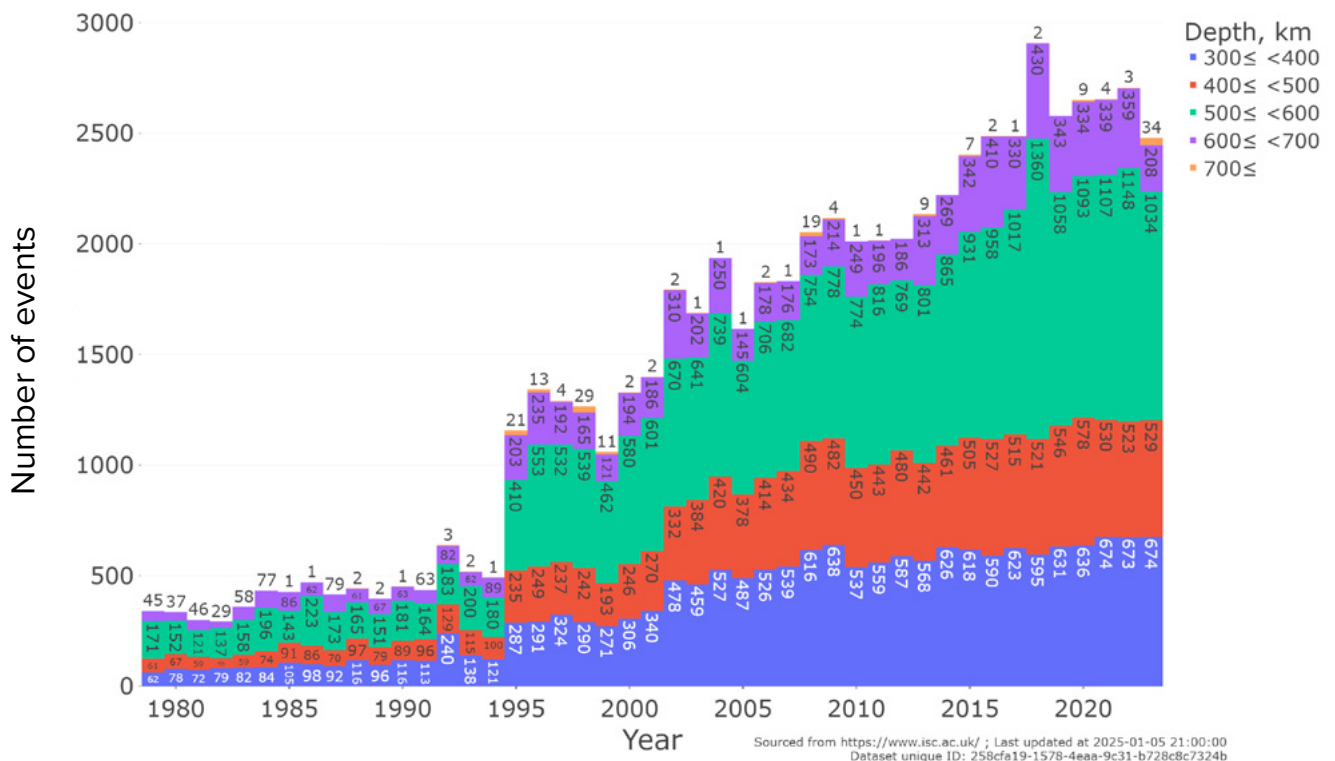
⁸Mikhailova, R. S. (2014). Strong earthquakes in the mantle and their influence in the near and far zone. *Geophysical Survey RAS*. <http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mihaylova.pdf>

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 წლიდან დაფიქსირდა ასეთი ღრმა მიწისძვრების რაოდენობის სწრაფი ექსპონენციალური ზრდა (ნახ. 7, 8), რაც ემთხვევა იმავე პერიოდში დაწყებულ სხვა გეოდინამიკურ ანომალიებს. ამ მანტიის

შიგნით აფეთქებების ზრდა მიუთითებს ენერგიის ზრდაზე პლანეტის სიღრმეში და მანტიის ინტენსიურ დნობაზე, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ვულკანის ფართომასშტაბიანი ამოფრქვევები.

ღრმა ფოკუსური მიწისძვრები M3+-ის სიმძლავრით

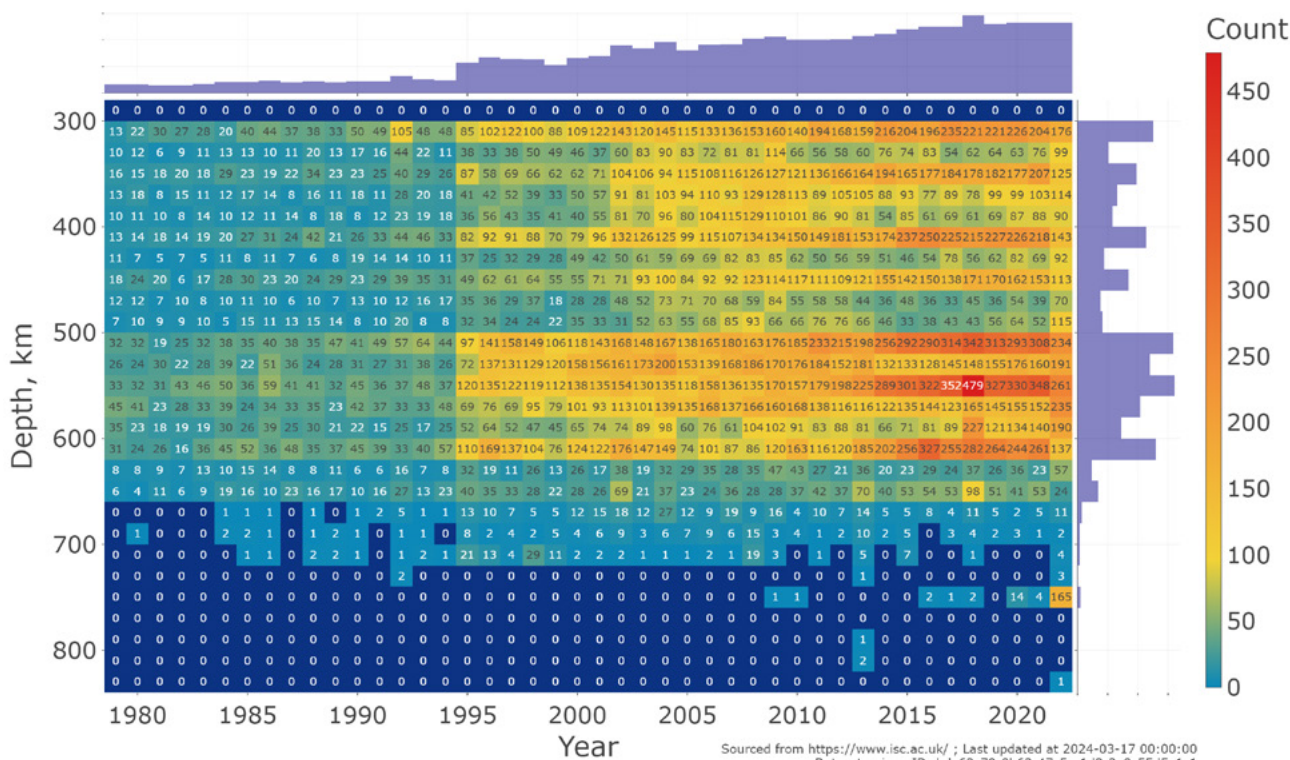


ნახ. 7. 1979 წლიდან პლანეტაზე ღრმა ფოკუსის მიწისძვრების რაოდენობის ექსპონენციალური ზრდა 3.0 მაგნიტუდაზე მეტი. გრაფიკი აგებულია მონაცემთა ნიმუშის საფუძველზე, მედიანური სიდიდის მნიშვნელობების სპეციალური ალგორითმის გამოყენებით (იხ. დანართი 1), რომელიც შეიცავს ISC მონაცემთა ბაზაში თითოეული მოვლენისთვის.

მონაცემთა ბაზა: ISC.

გრაფიკი გვიჩვენებს მიწისძვრების ზრდის გეომეტრიულ პროგრესს დედამიწის ზედა მანტიაში 300 კმ-ზე მეტ სიღრმეზე, სადაც გარემო ითვლება პლასტიურად და არ შეუძლია დაბზარვა. მნიშვნელოვანი ნახტომი დაფიქსირდა 1995 წელს და ისევე როგორც მრავალი სხვა გეოდინამიკური ანომალიის ზრდის ტემპები. ღრმა ფოკუსის მიწისძვრების რაოდენობის ზრდა არ არის დაკავშირებული სენსორების რაოდენობის ზრდასთან.

ღრმა ფოკუსური მიწისძვრები M3+-ის სიმძლავრით



ნახ. 8.

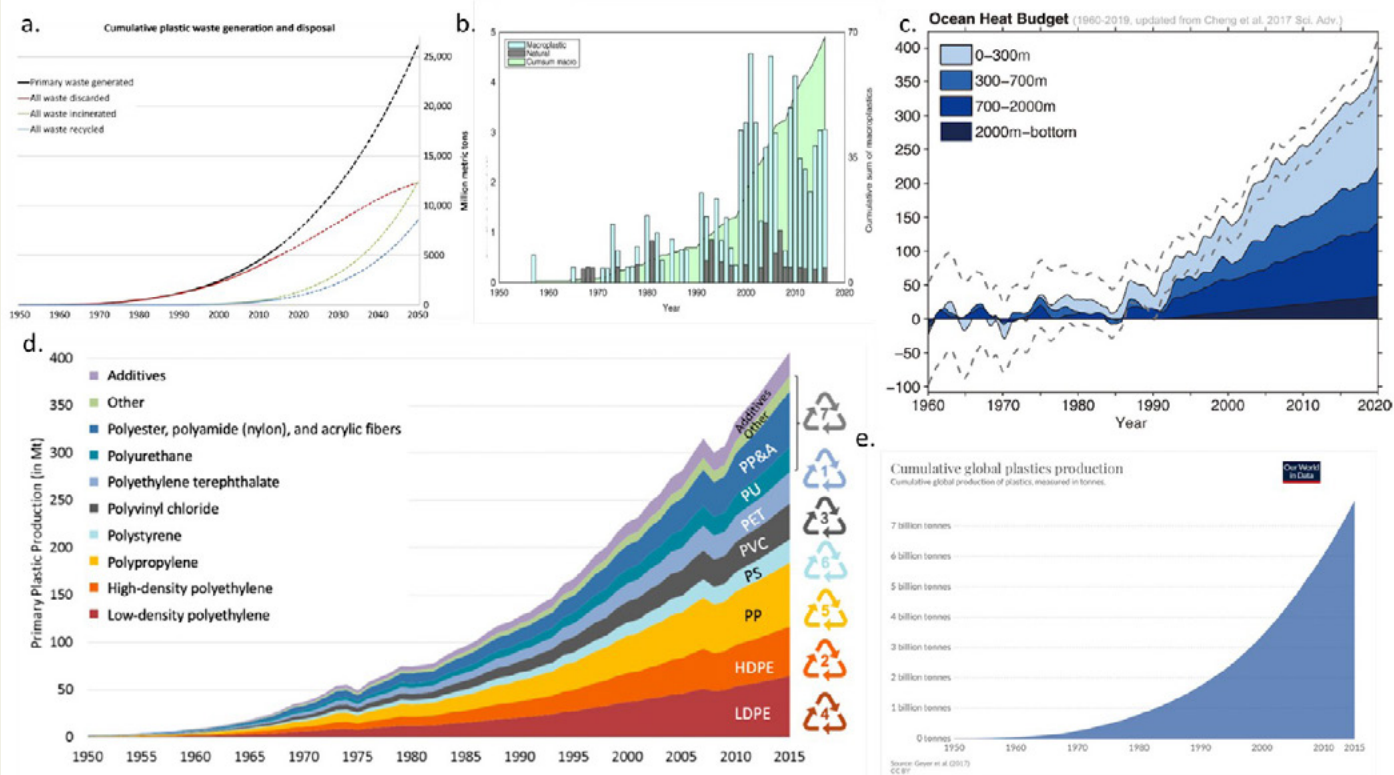
ღრმა ფოკუსირებული მიწისძვრების რაოდენობის დიაგრამა წლებისა და სიღრმის მიხედვით 3,0 მაგნიტუდაზე მეტი.

მონაცემთა ბაზა: ISC.

ღრმა ფოკუსის მიწისძვრების ზრდა მიუთითებს მანტიის დნობაზე, რომელიც გაცხელებულია ბირთვიდან. ცენტრიდანული ძალების გამო, მანტიაში მდნარი მაგმა მკვეთრად იწყებს ასვლას დედამიწის ზედაპირზე, რეცხავს და აცხელებს ლითოსფეროს შიგნიდან ჩვეულებრივზე მეტად. სწორედ მაგმის აწევა იწვევს გეოთერმული ნაკადის ზრდას სიღრმეებიდან, დასავლეთ ანტარქტიდისა და ცენტრალური გრენლანდიის მყინვარების ქვეშ მაგმატური პლუმის გააქტიურებას, რაც აჩქარებს მყინვარებისა და მუდმივი ყინვების დნობას ქვემოდან ზევით.

ოკეანე ამჟამად თბება ისე, როგორც

არასდროს, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის ექსტრემალურ ამინდს, როგორიცაა წყალდიდობა, ქარიშხალი და ტროპიკული ციკლონები. ოკეანე თამაშობს მთავარ როლს პლანეტაზე სითბოს რეგულირებაში, რადგან მას შეუძლია ზედმეტი სითბოს შთანთქმა და გადანაწილება, კატასტროფული შედეგების თავიდან აცილება. თუმცა, ახლა, როცა დედამიწა თბება ასტრონომიული ციკლებით გამოწვეული გეოდინამიკური აქტივობის გამო, ოკეანემ დაკარგა შიგნიდან სითბოს ამოღების ფუნქცია. ეს მოხდა ოკეანის ანთროპოგენური დაბინძურების გამო. პლასტმასის ნარჩენები იშლება მიკრო და ნანოპლასტიკებად, ამცირებს წყლის თბოგამტარობას (სურ. 9).



ნახ. 9.

ოკეანის ტემპერატურის ცვლილების გრაფიკი 1960–2019 წლებში. და მისი შედარება სინთეზური პოლიმერების წარმოების ზრდის გრაფიკებთან, მათ გამოყენებასთან ეკონომიკის სხვადასხვა სექტორში და პლასტმასის ნარჩენების ოკეანეში განთავსებასთან (სხვადასხვა წყაროდან).

ა წარმოებული და უტილიზირებული პლასტმასის ნარჩენების მთლიანი რაოდენობა

წყარო: Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). ოდესმე დამზადებული პლასტმასის წარმოება, გამოყენება და ბედი. *Science Advances*, 3 (7).
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

ბ) მაკროპლასტიკების მთლიანი რაოდენობა ოკეანეში და წლიური მაჩვენებლები

წყარო: Ostle, C., Thompson, R. C., Broughton, D., Gregory, L., Wootton, M., & Johns, D. G. (2019). ოკეანის პლასტმასის ზრდას მოწმობს 60-წლიანი დროის სერია. *Nature Communications*, 10 (1622).

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

გ) მსოფლიო ოკეანის ტემპერატურის ცვლილება 1960–2019 წლებში. (Purkey and Johnson, 2010; updated from Cheng et al., 2017) წყარო: 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). ოკეანის სითბოს რეკორდული დამყარება გაგრძელდა 2019 წელს. *მიღწევები ატმოსფერულ მეცნიერებებში*, 37, 137–142.
<https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

დ) პირველადი პლასტმასის მსოფლიო წარმოება ტიპების მიხედვით

წყარო: Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). ოდესმე დამზადებული პლასტმასის წარმოება, გამოყენება და ბედი. *Science Advances*, 3 (7).
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

ე) 1950 წლიდან წარმოებული პლასტმასის მთლიანი რაოდენობა

მონაცემთა წყარო: Plastic Marine Pollution Global Dataset

წყლის ტემპერატურის მატება ხდება არა მხოლოდ ზედაპირზე, არამედ მთელ სისქეზე, ასევე ოკეანის ფსკერზე. ოკეანე თბება ამომავალი მაგმით, რომელიც განსაკუთრებით ათბობს ოკეანის ქერქს, რომელიც უფრო თხელი და დაუცველია ვიდრე კონტინენტური ქერქი.

გეოლოგიური და ყინულის ბირთვის კვლევების ისტორიული მონაცემები ვარაუდობს, რომ დედამიწა ყოველ 12000 წელიწადში ერთხელ განიცდიდა მსგავს კატასტროფულ ციკლებს¹⁰. და ყოველ 24000 წელიწადში პლანეტარული კატასტროფები მრავალჯერ უფრო ძლიერი იყო, რასაც მოწმობს ყინულის ბირთვებში ვულკანური ამოფრქვევის შედეგად მიღებული ფერფლის ფენების კვლევები¹¹ (ნახ. 10) და სხვა გეოქრონოლოგიური კვლევები. ეს არის ზუსტად ის ციკლი, რომელშიც დედამიწა ახლა შედის. თუმცა, მიმდინარე ციკლს ამდაფრებს ანთროპოგენური ფაქტორები, როგორიცაა ოკეანის დაბინძურება, რამაც კიდევ უფრო გააუარესა ოკეანის ფუნქცია დედამიწის ენერგეტიკული ბალანსის რეგულირებისთვის.

ოკეანეს გათბობასთან ერთად, პლასტმასის ნარჩენები იშლება მიკრო და ნანოპლასტიკებად, რაც კიდევ უფრო ამცირებს ოკეანის თბოგამტარობას. თბოგამტარობის ეს დაკარგვა კრიტიკულია ასტრონომიული ციკლებით გამოწვეული გეოდინამიკური აქტივობის გაზრდის პერიოდებში. დედამიწის წიაღში ჭარბი ენერგიის დაგროვებამ გამოიწვია

ღრმა ფოკუსირებული მიწისძვრების რაოდენობის ზრდა და ახალი მაგმა კამერების სწრაფი ფორმირება, რაც კიდევ უფრო ამდაფრებს პლანეტის არასტაბილურობას. ეს მანკიერი ციკლი აჩქარებს პლანეტის გათბობას და დესტაბილიზაციას, რაც დედამიწას აახლოვებს გარდაუვალ სიკვდილთან.

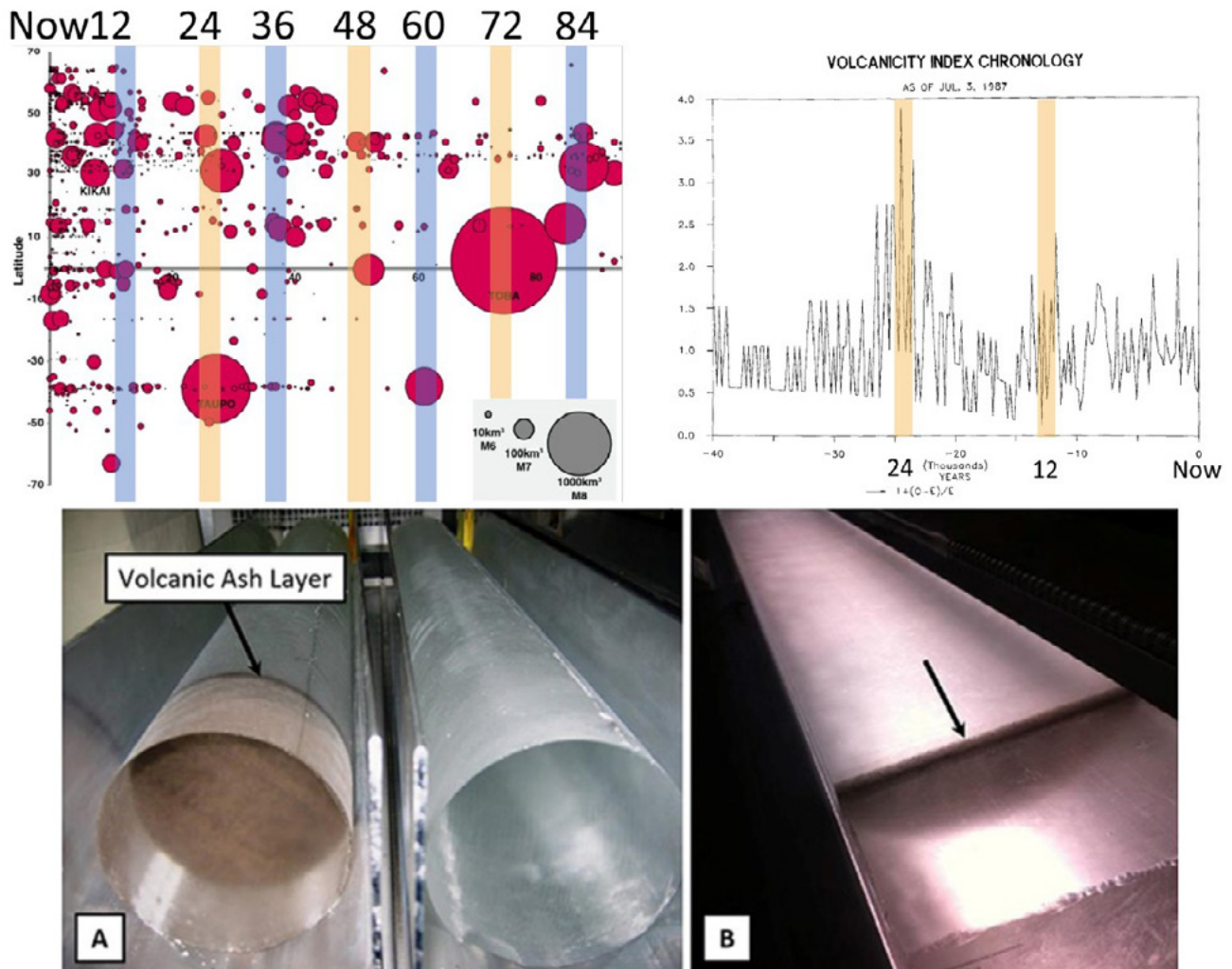
მათემატიკური მოდელირება გვიჩვენებს, რომ მსოფლიოს ეკონომიკური და სოციალური სისტემები შეიძლება დაიშალოს მომდევნო 4-6 წლის განმავლობაში კლიმატის კატასტროფების მზარდი ზარალის გამო. კატასტროფული მოვლენების რაოდენობის ექსპონენციალური ზრდა საფრთხეს უქმნის დედამიწას საცხოვრებლად უვარგისი გახდეს მომდევნო ათწლეულის განმავლობაში (სურ.11).

წინა ციკლებისგან განსხვავებით, პლანეტის ამჟამინდელ მდგომარეობას აუარესებს ადამიანის მიერ გამოწვეული დაბინძურება, რაც მცირე იმედს ტოვებს ეკოსისტემების და თავად პლანეტა დედამიწის გადარჩენაზე. მნიშვნელოვანია გვესმოდეს, რომ ოკეანის დაბინძურებისა და დათბობის პრობლემის მოგვარებამ შეიძლება შეანელოს კატასტროფების განვითარება, მაგრამ ვერ შეაჩერებს მათ.

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

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

კატასტროფული ვულკანური ამოფრქვევები



ნახ. 10.

ანტარქტიდისა და არქტიკის ყინულის ბირთვებში ბოლო 100 000 წლის განმავლობაში ვულკანური ამოფრქვევის ფერფლის ფენების კვლევების მონაცემები სხვადასხვა ავტორის ნაშრომებიდან.

წყარო: Brown, S. K., Croswell, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). მეოთხეული ამოფრქვევის ჩანაწერის დახასიათება: ანალიზი დიდი მაგნიტუდის ფეთქებადი ვულკანური ამოფრქვევების (LaMEVE) მონაცემთა ბაზა. *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,

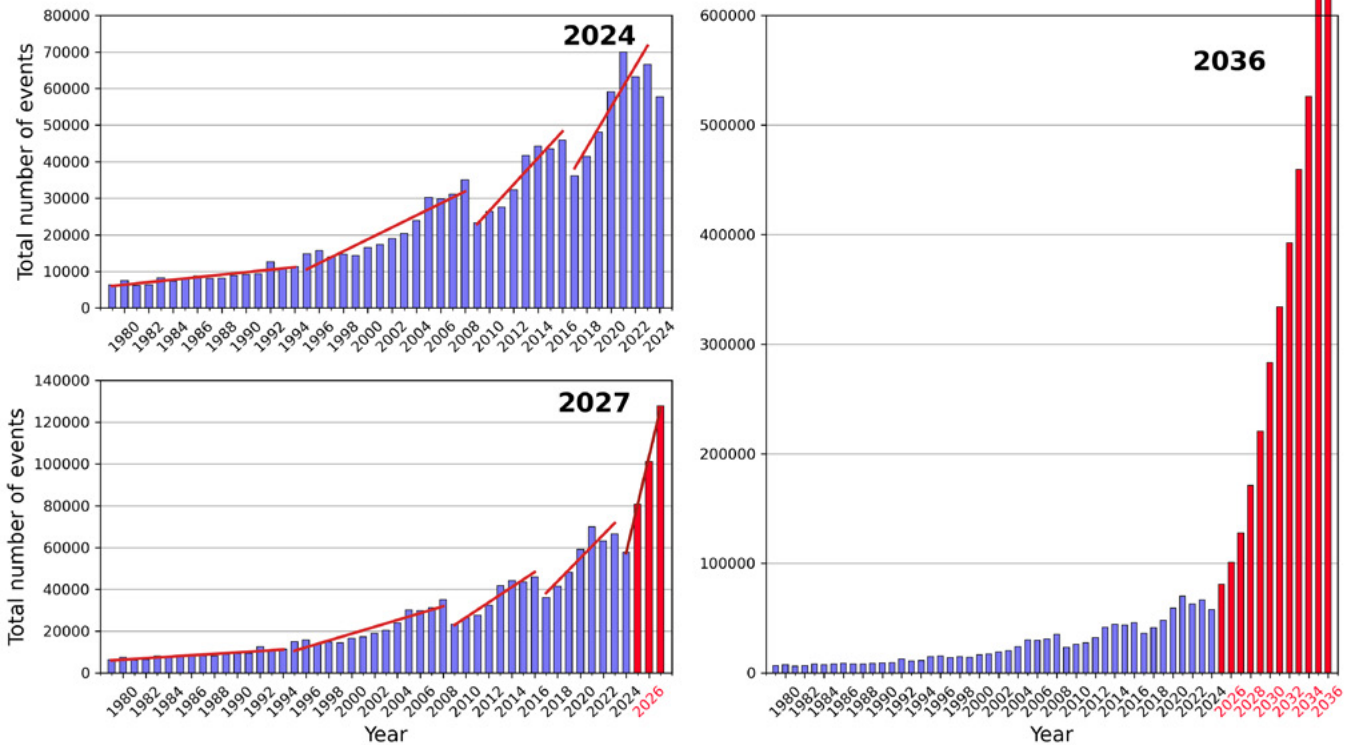
39, 115–125. <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

გრაფიკები ასახავს კატასტროფულ ვულკანურ აქტივობას ყოველ 12 000 წელიწადში ერთხელ და კიდევ უფრო მძიმეს ყოველ 24 000 წელიწადში (ასაკობრივი განსაზღვრების შეცდომის გათვალისწინებით). ასეთმა კატასტროფულმა მოვლენებმა გამოიწვია ტემპერატურის მკვეთრი ცვლილებები, ბუნებრივი კატასტროფები, ვულკანური ზამთარი და სახეობების მასობრივი გადაშენება. ბევრმა სუპერვულკანმა, რომლებიც ამოიფრქვა წარსულ ციკლებში, დაიწყო არანორმალური აქტივობის ჩვენება თანამედროვე დროში, განსაკუთრებით 1995 წლიდან.

მიწისძვრების მაგალითზე კატაკლიზმების

M3+ Earthquakes Globally 1979-2024

volcanodiscovery.com



ნახ. 11.

სტიქიური უბედურებების რაოდენობის ექსპონენციალური ზრდის მოდელი მიწისძვრების მაგალითით 2036 წლამდე.

გრაფიკები გვიჩვენებს გეომეტრიულ პროგრესს პლანეტაზე მიწისძვრების რაოდენობისა და სიძლიერის ზრდაში, მიმდინარე ტენდენციის გათვალისწინებით. ყოველ მომდევნო ეტაპზე მიწისძვრების

რაოდენობა 3-ჯერ იზრდება. 2028 წლისთვის დედამიწაზე დღეში 1000 მიწისძვრა იქნება 3.0 მაგნიტუდაზე მეტი, მაშინ როცა დღეს უკვე 125 მიწისძვრა ხდება 3.0 მაგნიტუდაზე მეტი. დიდია ალბათობა იმისა, რომ სულ რაღაც 6 წელიწადში დედამიწაზე ყოველდღე მოხდება მიწისძვრები, რომლებიც ისეთივე დამანგრეველი იქნება, როგორც 2023 წლის 6 თებერვალს თურქეთსა და სირიაში მომხდარი მიწისძვრა.

ეს მოხსენება ყურადღებას ამახვილებს დამატებით საფრთხეზე, რომელიც გამოწვეულია ბირთვში შემავალი დამატებითი ენერგიის შედეგად. 1997-1998 წლებში მეცნიერებმა, დედამიწის მასის ცენტრის კვლევების სატელიტური მონაცემების გამოყენებით, დააფიქსირეს უპრეცედენტო ფენომენი: ნახტომი დედამიწის შიდა ბირთვში. ამ მოვლენის შედეგად, პლანეტის ბირთვმა გადაინაცვლა ჩრდილოეთით, ხაზის გასწვრივ დასავლეთ ანტარქტიდიდან აღმოსავლეთ ციმბირში და ტაიმირის ნახევარკუნძულისკენ რუსეთის ფედერაციაში. ამ ძირითადი ცვლის შედეგად, მაგმის უკონტროლო ზრდა მოხდა ამ მიმართულებით, რის გამოც უზარმაზარმა მაგმატურმა პლუმმა სწრაფად დაიწყო აწევა ციმბირის ქვეშ.

ამ დროისთვის, ციმბირის პლუმმა უკვე მიაღწია დედამიწის ქერქს აღმოსავლეთ ციმბირის კრატონის ჩრდილოეთ რეგიონში და დაიწყო ფირფიტის

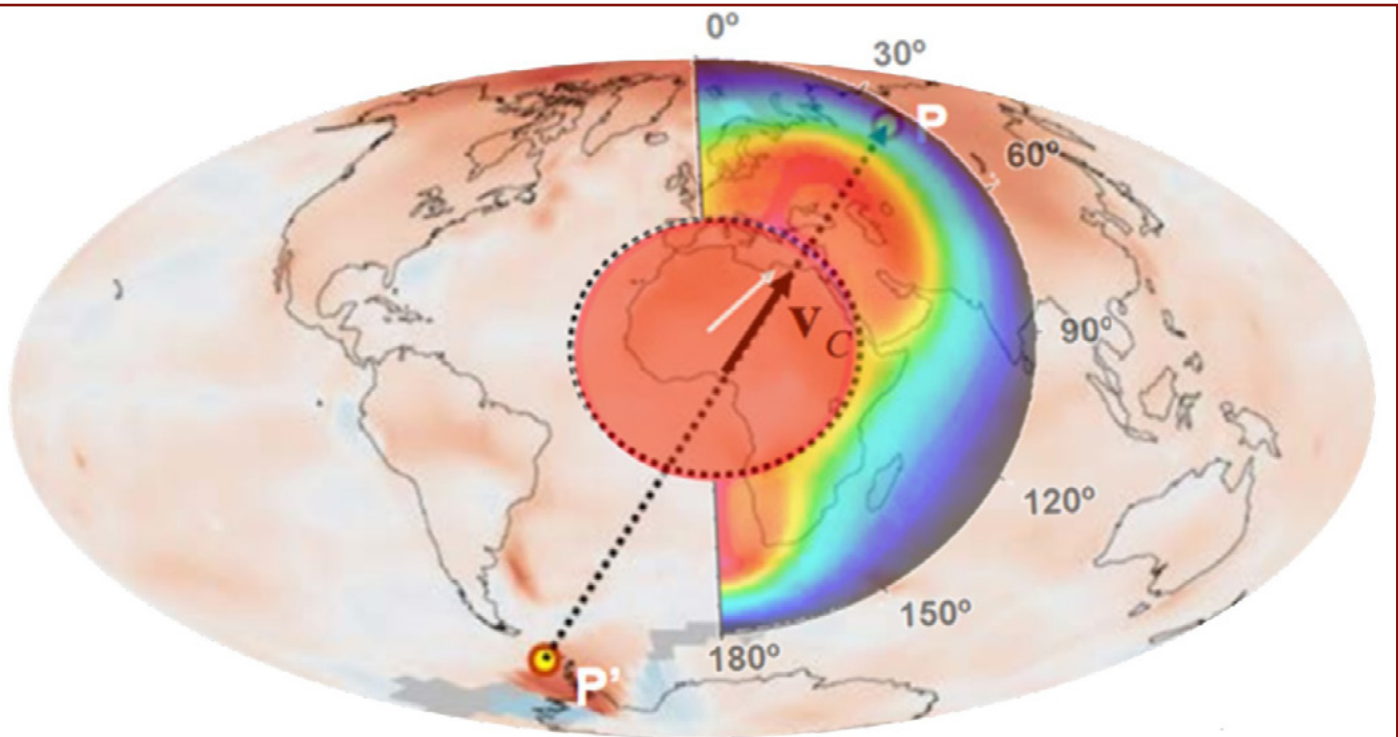
აწევა, რაც ნიშნავს, რომ ცხელმა მაგმამ უკვე დაიწყო ზედაპირისკენ მიმავალი გზა. ციმბირის პლუმის უკონტროლო ამოფრქვევამ შეიძლება გამოიწვიოს გლობალური გადაშენება, რაც კაცობრიობას არ დაუტოვებს გადარჩენის შანსს, რადგან, გათვლებით, ასეთი ამოფრქვევა 1000-ჯერ უფრო ძლიერი იქნება, ვიდრე იელოუსტონის სუპერვულკანის ყველაზე ძლიერი ამოფრქვევა. მსგავსი მაგმატური პლუმის ამოფრქვევები ციმბირში მოხდა 250 მილიონი წლის წინ და გამოიწვია პერმის დიდი გადაშენება. შემდგომი განვითარების სამი შესაძლო სცენარია, რომლებიც აღწერილია ამ ანგარიშში.

მოხსენებაში ასევე არის შემოთავაზებული ნაბიჯები ციმბირის პლუმის აწევის პრობლემის გადასაჭრელად და მისი უკონტროლო გარღვევის რისკების მინიმუმამდე დასაყვანად.

ბირთვის გადაადგილება ციმბირის მიმართულებით 1998 წელს

1997-1998 წლებში მეცნიერებმა, დედამიწის მასის ცენტრის კვლევების სატელიტური მონაცემების გამოყენებით, დააფიქსირეს უპრეცედენტო ფენომენი: ნახტომი დედამიწის შიდა ბირთვში^{12,13}. ამ მოვლენის შედეგად, პლანეტის ბირთვმა

გადინაცვლა ჩრდილოეთით, ხაზის გასწვრივ დასავლეთ ანტარქტიდიდან ტაიმირის ნახევარკუნძულამდე ჩრდილოეთ აღმოსავლეთ ციმბირში (სურ. 12).



ნახ. 12.

ძირითადი ნახტომი 1997–1998 წლებში. და თერმული ტალღები მაგმაში, რომელიც გამოწვეულია ბირთვის გადაადგილებით. იუ ვ.ბარკინი.

რუკა ასახავს შიდა ბირთვის გადაადგილების ვექტორს დასავლეთ ანტარქტიდიდან აღმოსავლეთ ციმბირის, ნახევარკუნძულ ტაიმირამდე. დიაგრამა გამოსახულია ატმოსფერული თერმული ანომალიების რუკაზე.

წყარო: დედამიწის ბირთვისა და მანტიის შედარებითი გადაადგილებისა და რხევების გეოფიზიკური შედეგები. პრეზენტაცია Yu V. Barkin, მოსკოვი, IFZ, OMTS. 2014 წლის 16 სექტემბერი.

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

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

ამავდროულად, ოთხმა სხვადასხვა სამეცნიერო ჯგუფმა, ერთმანეთისგან დამოუკიდებლად, დააფიქსირა ანომალური ცვლილებები დედამიწის სხვადასხვა გეოფიზიკურ პარამეტრებში. სატელიტური მონაცემების საფუძველზე, მოსკოვის ლომონოსოვის სახელობის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ავტორთა ჯგუფის და რუსეთის მეცნიერებათა აკადემიის დედამიწის ფიზიკის ინსტიტუტმა დაადგინეს ნახტომი დედამიწის მასის ცენტრში 1998 წელს¹⁴ (სურ. 13).

ამავე პერიოდში დედამიწის ბრუნვის საერთაშორისო სამსახურმა (IERS) დააფიქსირა პლანეტის ბრუნვის მკვეთრი აჩქარება. ამ დროს იტალიაში, მედიცინას სადგურზე, მეცნიერებმა გრავიტაციაში

ნახტომი დააფიქსირეს¹⁵ ამავდროულად, დაფიქსირდა დედამიწის ფორმის მკვეთრი ცვლილება¹⁶ w, რომელიც დაფიქსირდა აშშ-ს თანამგზავრების ლაზერული დისტანციური სისტემის გამოყენებით.

ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორ ვ.ბარკინის, ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორ გ.სმოლკოვის¹⁷, გეოგრაფიულ მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორ მ. ლ. არუშანოვა¹⁸. ლომონოსოვის ინსტიტუტის, გეოლოგიური და მინერალოგიის მეცნიერებათა დოქტორი ვ.ე.ხაინი¹⁹ და მრავალი სხვა მეცნიერი, ბირთვის ნახტომმა გამოიწვია ცვლილებები დედამიწის ყველა ფენაში.

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

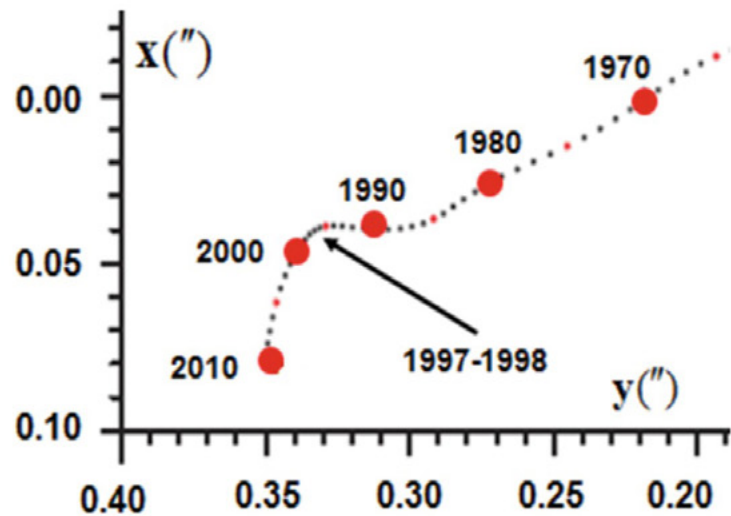
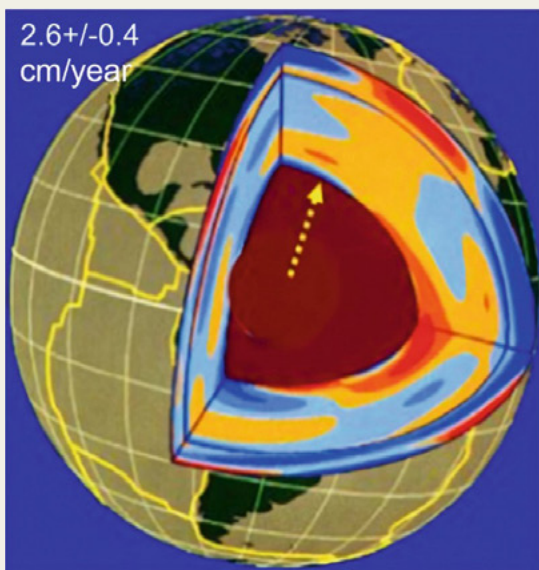
¹⁵ Romagnoli, C., Zerbini, S., Lago, L., Richter, B., Simon, D., Domenichini, F., Elmi, C., & Ghirotti, M. (2003). Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations. *Journal of Geodynamics*, 35(4-5), 521-539. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00012-7)

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

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

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

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



ნახ. 13.

დედამიწის შიდა სტრუქტურა, დედამიწის მასის ცენტრის სეკულარული დრიფტის მიმართულება და მისი პოლუსის ტრაექტორია დედამიწის ზედაპირზე 1990–2010 წლებში, ბრუნვით თითქმის 90° 1997–1998 წლებში. ტაიმირის ნახევარკუნძულის მიმართულებით.

წყარო: G. Ya. Smolkov // ჰელიოგეოფიზიკური კვლევები. გამოცემა 25, 14–29, 2020 წ. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569> (წვდომის თარიღი: 02/01/2024)

გრაფიკის წყარო: Yu V. Barkin, R. K. Klige, 2012 წ.

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ სწორედ ამ მიმართულებით დაიწყო ჩრდილოეთ მაგნიტურმა პოლუსმა მკვეთრი დრიფტი 1995 წელს. გასული საუკუნის დასაწყისიდან ის საშუალოდ 10 კმ/წელი სიჩქარით მოძრაობდა, შემდეგ კი უეცრად გაზარდა სიჩქარე, მიაღწია მაქსიმუმ 57 კმ/წელი და ტრაექტორია შეცვალა, ციმბირისა და ტაიმირის ნახევარკუნძულისკენ მიემართებოდა²⁰ (სურ. 3, 14).

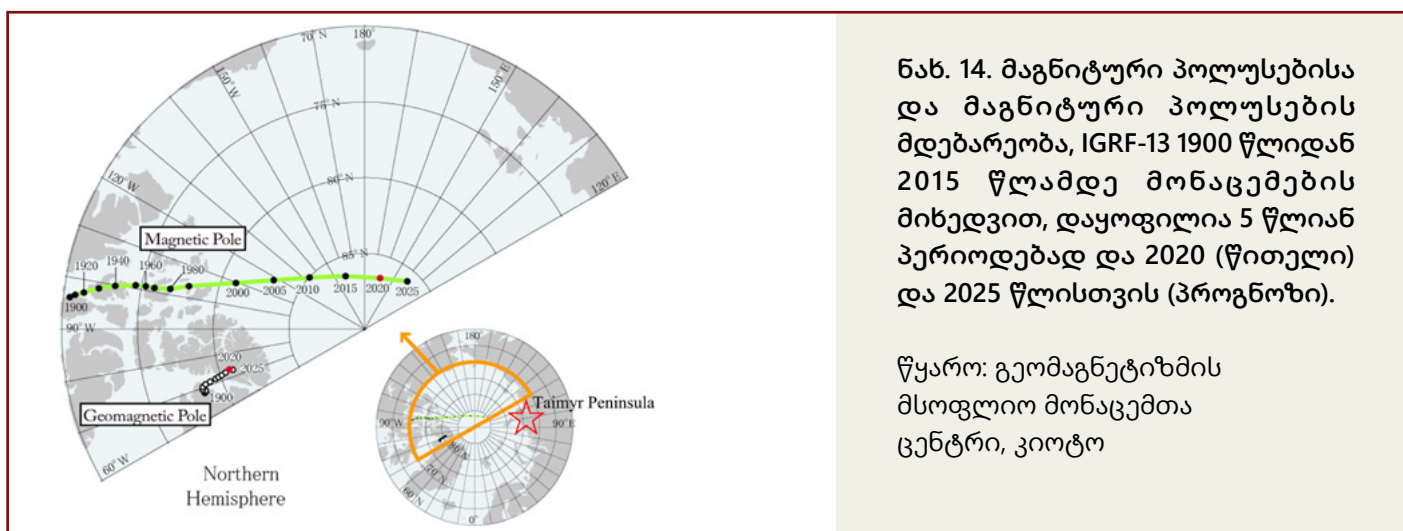
ეს იმაზე მეტყველებს, რომ ტაიმირის ნახევარკუნძულის მიმართულებით ბირთვის ცვლის პირობები შეიქმნა ჯერ კიდევ 1995 წელს, დედამიწის გარე თხევადი ბირთვის გათხევადების გამო. 2013 წელს ლიდსის უნივერსიტეტის მეცნიერებმა დაადგინეს, რომ მაგნიტურ

ველში ეს ცვლილებები დაიწყო დედამიწის²¹ გარე ბირთვში თხევადი რკინის ნაკადის აჩქარების გამო (ნახ. 15), რომელიც სავარაუდოდ 1995 წელს დაიწყო.

ლიტერატურული მონაცემებით, აღმოჩენილია კორელაცია მაგნიტური ველის შებრუნების სიხშირესა და მანტიის მაგმატიზმის ინტენსივობას შორის.^{22,23,24} ცნობილია, რომ მაგნიტური ველის შებრუნება, სავარაუდოდ, დაკავშირებულია პროცესებთან, რომლებიც ხდება გარე ბირთვში ბირთვი-მანტიის²⁵ საზღვართან ახლოს. მანტიის მაგმატიზმის ინტენსივობის ცვლილებასა და დედამიწის მაგნიტური ველის შებრუნების სიხშირეს შორის კორელაცია მიუთითებს იმაზე,

რომ დედამიწის მაგნიტური ველის დარღვევები წარმოიქმნება გარე ბირთვში სითბოს გადაცემის ინტენსივობის ცვლილების გამო ბირთვ-მანტიის საზღვარზე მდებარე პლუმის ფუძეებზე. პლუმის მთლიანი თერმული სიმძლავრის მატება ხდება როგორც ახალი პლუმის გაჩენის, ასევე უკვე აქტიური პლუმის თერმული სიმძლავრის

ზრდის შედეგად. შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ გეოდინამიკური დარღვევები გარე ბირთვსა და მანტიაში ხდება პლუმის წარმოქმნისა და ზედაპირზე გადმოსვლის პერიოდებში.²⁶



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

²¹Livmore, 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>

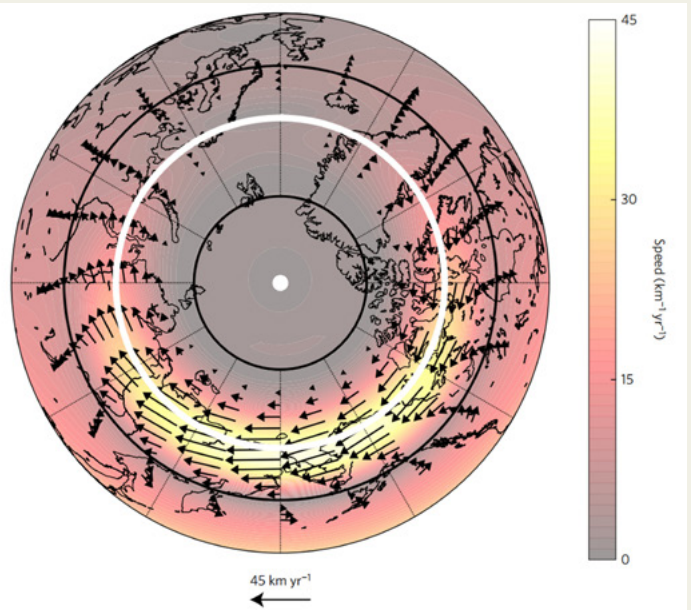
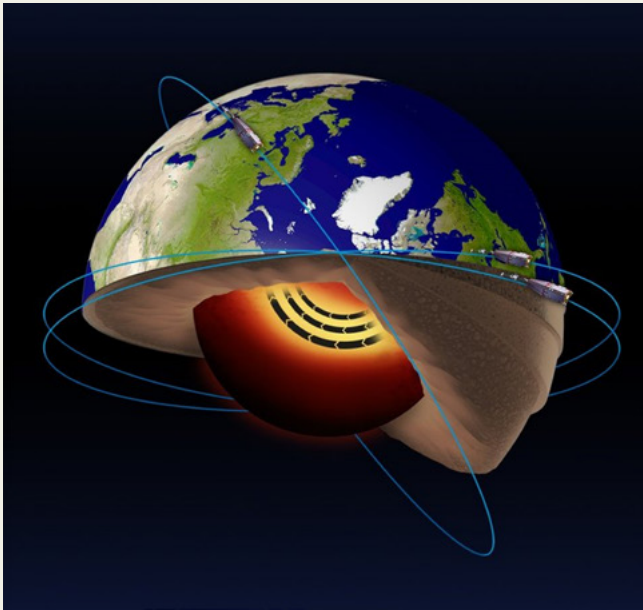
²²Alain Mazaud, Carlo Laj, The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test, *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 107, Issues 3–4, 1991, Pages 689–696, ISSN 012-821X, [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90111-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T)

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.



ნახ. 15.

ESA-ს Swarm-ის სატელიტური მონაცემების ანალიზმა აჩვენა ჭავჭავი ნაკადის არსებობა დედამიწის ბირთვის თხევადი რკინის ნაწილში ზედაპირის ქვემოთ 3000 კმ-ზე და რომ ეს რეაქტიული ნაკადი ჩქარდება.

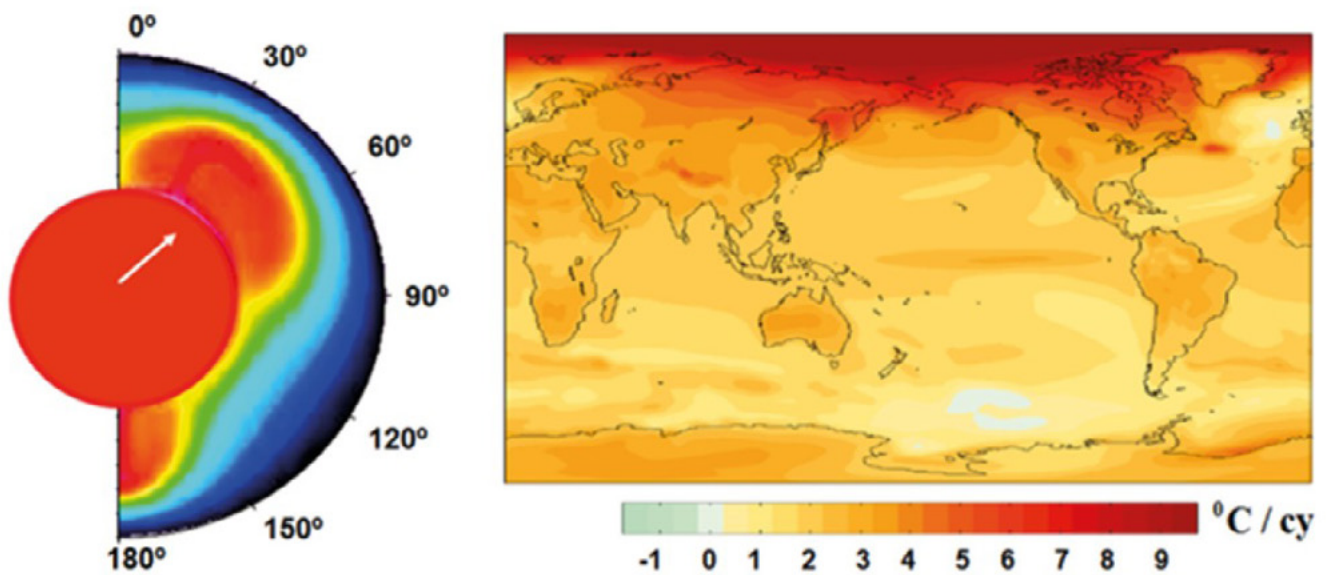
წყარო: ESA

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>

ამრიგად, ჩრდილოეთ მაგნიტური პოლუსის თანამედროვე დრეიფი ტაიმირის ნახევარკუნძულისკენ შეიძლება იყოს დამატებითი მტკიცებულება, რომელიც მიუთითებს დედამიწის გარე თხევადი ბირთვის ცვლილებებზე და ციმბირის ქვეშ მდებარე ბირთვის მანტიის საზღვრიდან პლუმის მკვეთრ აწევაზე.

ამრიგად, 1995 წელს დედამიწის ბირთვზე გარეგანი კოსმოსური გავლენის შედეგად, შიდა ბირთვმა დაიწყო გათბობა და გარე ბირთვის დნობა, რამაც გამოიწვია ჩრდილოეთ მაგნიტური პოლუსის დრეიფის მკვეთრი დაჩქარება. გარე ბირთვის გათხევადება გახდა მიზეზი, რამაც გამოიწვია

1997-1998 წწ ბირთვის გადაადგილება ციმბირის მიმართულებით, ტაიმირის ნახევარკუნძულისკენ. მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორ იური ბარკინის მიერ წამოყენებული ჰიპოთეზის მიხედვით, ბირთვის გადაადგილებამ გამოიწვია სითბოს ასიმეტრიული ნაკადი ციმბირის მიმართულებით (სურ. 16). მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ მანტიაში სითბოს გადაცემა ძირითადად ხდება კონვექციური შერევით. ანუ შეიძლება ითქვას, რომ ბირთვის ნახტომმა უპირველეს ყოვლისა გამოიწვია მაგმის აწევა ციმბირის მიმართულებით. მოგვიანებით ციმბირის ამ რეგიონში ატმოსფეროს არანორმალური გათბობა შეინიშნებოდა და ეს გათბობა ყოველწლიურად იზრდება.



ნახ. 16.

ბირთვისა და მანტიის იძულებითი ფარდობითი რხევა და მანტიის ზედა ფენების ასიმეტრიული სითბოს მიწოდების დიაგრამა (მარცხნივ). ზედაპირის დათბობის საზოგადო ტენდენციები ($^{\circ}\text{C}$ -ში საუკუნეში) NCAR CCSM3-დან საშუალოდ განსაზღვრულ სცენარზე http://www.realclimate.org/bitz_fig3.png (მარჯვნივ).

წყარო: Barkin Yu. V. ციკლური ინვერსიული კლიმატის ცვლილებები დედამიწის ჩრდილოეთ და სამხრეთ ნახევარსფეროებში // ზღვების და ოკეანეების გეოლოგია: საზღვაო გეოლოგიის XVIII საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციის მასალები. T.III. - M.: GEOS. 2009. გვ. 4–8.

ციმბირი და ციმბირის არქტიკა 3-4-ჯერ უფრო სწრაფად თბება, ვიდრე დანარჩენი მსოფლიო

სხვადასხვა ორგანიზაციების ცნობით, რუსეთის ტერიტორიაზე, კერძოდ, არქტიკული რეგიონი ექსტრემალურად თბება.

მეცნიერთა მონაცემებით, კლიმატის ცვლილების მთავრობათაშორისო ჯგუფის ექსპერტების (IPCC) 2021 წელს, რუსეთი სამჯერ უფრო სწრაფად თბება, ვიდრე დანარჩენი მსოფლიო, ხოლო მისი არქტიკისა და ციმბირის რეგიონები ოთხჯერ უფრო სწრაფად თბება, ვიდრე საშუალოდ მსოფლიო.

2022 წელს როსჰიდრომეტის ხელმძღვანელმა იგორ შუმაკოვმა მსოფლიო მეტეოროლოგიური ორგანიზაციის²⁷ მონაცემებზე დაყრდნობით განაცხადა, რომ რუსეთის ტერიტორია 2,5-ჯერ უფრო სწრაფად თბება, ვიდრე დანარჩენი პლანეტა, ხოლო ქვეყნის ჩრდილოეთ პოლარული რეგიონის ტემპერატურა ყველაზე სწრაფად იზრდება, განსაკუთრებით

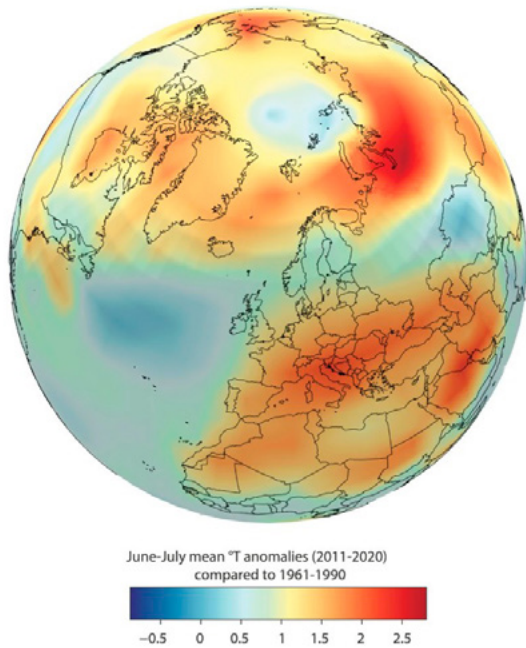
ბოლოათწლეულებში. ციმბირი ერთ-ერთი ყველაზე თბილ რეგიონებს შორისაა მსოფლიოში (ნახ. 17), რაც უპრეცედენტოა ბოლო 7000 წლის განმავლობაში, ხეების რგოლების კვლევების შედეგად რეკონსტრუირებული კლიმატური პირობების საფუძველზე.²⁸

ამერიკულმა ვუდველის კლიმატის კვლევის ცენტრმა (WCRC)²⁹ ჩაატარა ფართომასშტაბიანი კვლევა იმის შესაფასებლად, თუ როგორ იმოქმედა კლიმატის ცვლილებამ ტემპერატურაზე, ნიადაგის ტენიანობაზე, თოვლის სიღრმეზე, ნალექებსა და სხვა კრიტიკულ კლიმატურ პარამეტრებზე არქტიკის სხვადასხვა რეგიონში. ამისათვის მეცნიერებმა გააერთიანეს და სისტემატიზაცია მოახდინეს სატელიტების, თვითმფრინავების, დრონების და ხმელეთის მეტეოსადგურების მიერ ბოლო 40 წლის განმავლობაში.

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

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

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



ნახ.17.

საშუალო ტემპერატურული ანომალიები ივნის-ივლისში ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში (იამალის ნახევარკუნძული და ტაიმირის ნახევარკუნძული) დაკვირვებების ბოლო ათწლეულის განმავლობაში (2011–2020). ტემპერატურა გამოიხატება, როგორც ანომალიები 1961-1990 წლების საბაზისო კლიმატთან შედარებით. HadCRUT.5 მონაცემთა ნაკრების გამოყენებით.

წყარო: 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>

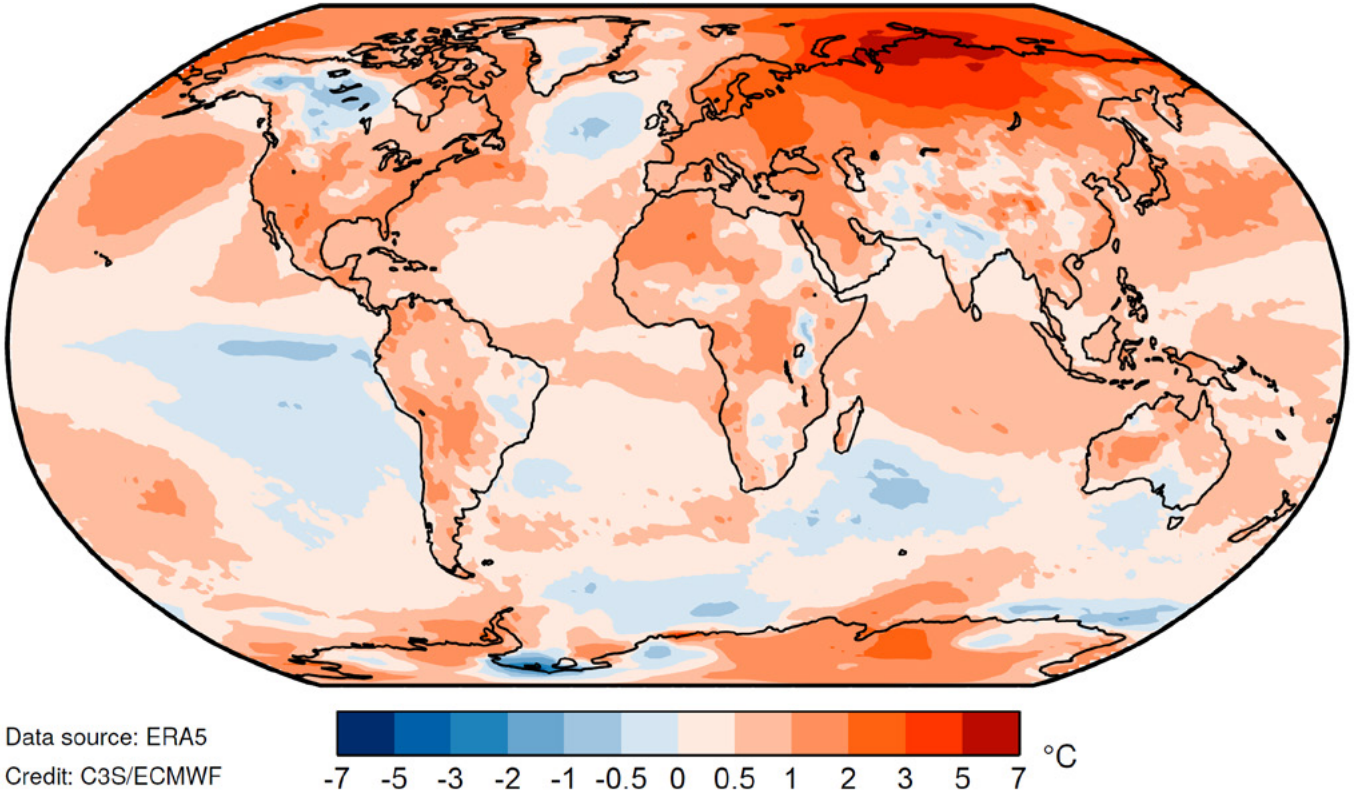
ამ მონაცემების შემდგომმა ანალიზმა მკვლევარებს საშუალება მისცა გამოეყოთ დაახლოებით ორი ათეული კლიმატური „ცხელი წერტილი“. დათბობა ყველაზე მეტად აღმოსავლეთ ციმბირის პოლარულ და ცენტრალურ რეგიონებს შეეხო, სადაც საშუალო წლიური ტემპერატურა ყოველ ათწლეულში 1,1 გრადუსით იზრდებოდა, რაც რამდენჯერმე აღემატება გლობალური დათბობის მაჩვენებელს. ტემპერატურა კიდევ უფრო სწრაფად გაიზარდა ტაიმირში: 1,7 გრადუსი ათწლეულში. ანალოგიურად, ციმბირის ტაიგაში ტემპერატურა იზრდება 1980-იანი წლების ბოლოდან 0,6 გრადუსით ათწლეულში.

ციმბირში ტემპერატურა იანვრიდან ივნისამდე 5°C-ზე მეტი იყო საშუალოზე,

ხოლო ივნისში 10°C-მდე (1981-2010 წლების დონეებთან შედარებით). ამ უკიდურესად ცხელმა პერიოდმა გამოიწვია ადგილობრივი სითბური რეკორდების გადაჭარბება, მათ შორის ვერხოიანსკის მეტეოსადგურზე, რომელმაც 20 ივნისს დააფიქსირა აბსოლუტური რეკორდი +38 °C (ნახ. 19).

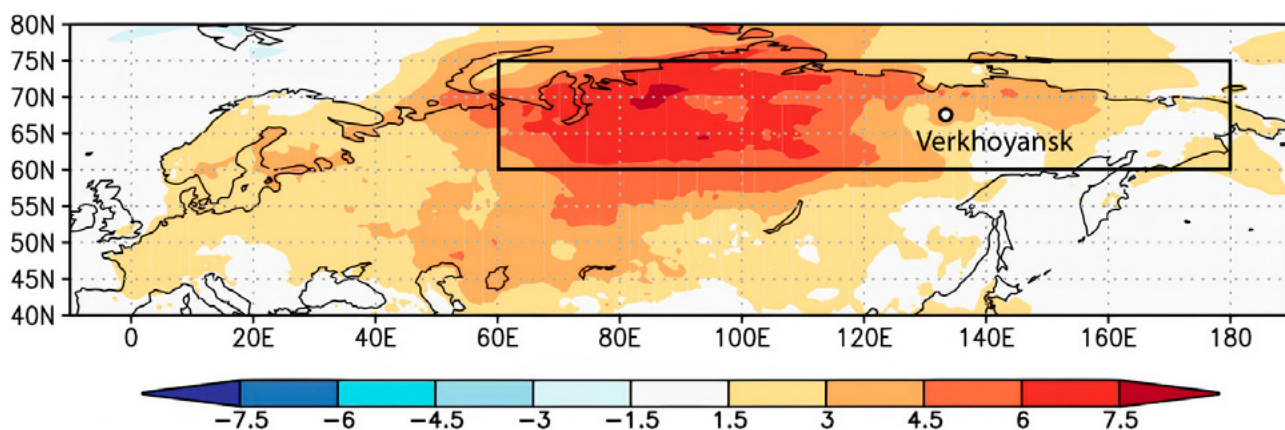
რუსეთის მეტეოროლოგიურმა სამსახურმა განაცხადა, რომ გაზომილი ტემპერატურა იყო ყველაზე მაღალი, რაც კი ოდესმე დაფიქსირებულა არქტიკული წრის ზემოთ.

ზედაპირის ჰაერის ტემპერატურის ანომალია 2020 წ
საანგარიშო პერიოდი: 1981-2010 წწ



ნახ. 18.

ტემპერატურების გადახრა 2020 წელს 1981–2010 წლების საშუალო მნიშვნელობებისგან.
წყარო: კოპერნიკის კლიმატის ცვლილების სამსახური საშუალო დიაპაზონის ამინდის
პროგნოზის ევროპულ ცენტრში (ECMWF)



ნახ. 19.

ხანგრძლივი ციმბირული სიცხე: საშუალო ტემპერატურა 2020 წლის იანვარ-ივნისისთვის ნორმასთან შედარებით (1981-2010) ციმბირის რეგიონში და ქალაქ ვერხოიანსკის მდებარეობაში, სადაც ივნისში დაფიქსირდა არქტიკული წრის ზემოთ $+38^{\circ}\text{C}$ დღიური ტემპერატურა.

წყარო: Ciavarella, A., Cotterill, D., Stott, P. et al. 2020 წლის ციმბირის ხანგრძლივი სიცხე თითქმის შეუძლებელია ადამიანის გავლენის გარეშე. კლიმატის ცვლილება 166, 9 (2021)

<https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>

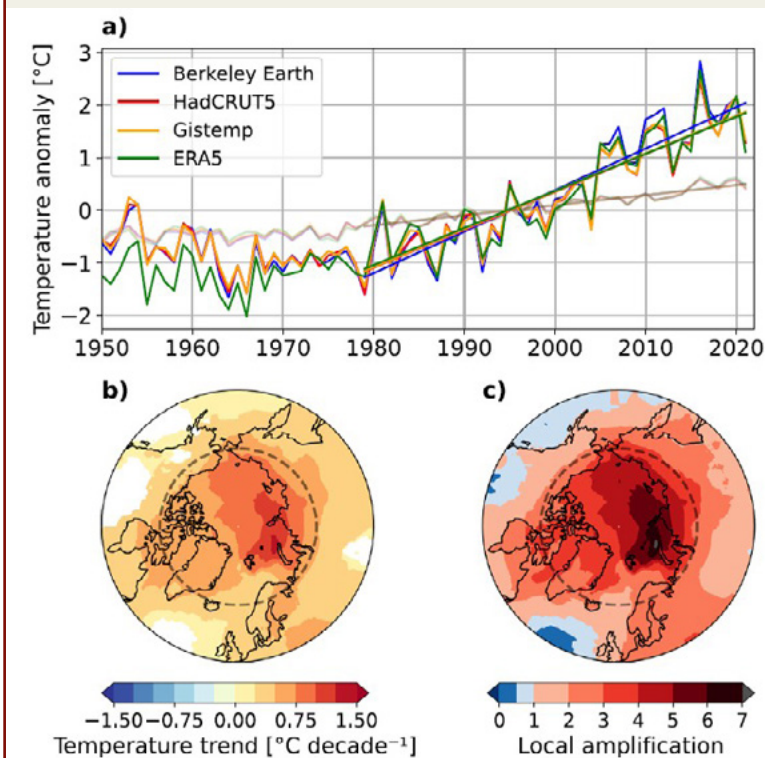
ეს სიცხის ტალღები მუდმივად არ არის ციმბირზე, მაგრამ აქვს პულსირებული რყევების ხასიათი. ეს გამოწვეულია იმით, რომ მაგმას შეღწევა, რომლებიც იწვევენ ამ სითბოს ტალღებს, ტალღის მსგავსი ხასიათი აქვთ. ატმოსფეროში, სადაც ჰაერის მასები თავისუფლად მოძრაობს და ერევა, სიცხის ტალღები შეიძლება დაიწიოს რამდენიმე თვის შემდეგ, როგორც ეს მოხდა 2020 წელს, განსხვავებით წყლის გარემოში არსებული სიცხისგან.

2022 წლის კვლევის მიხედვით, ციმბირის არქტიკა თბება თითქმის 4-ჯერ უფრო სწრაფად, ვიდრე დედამიწა, რაც უფრო მაღალი შეფარდებაა, ვიდრე ადრე აღინიშნებოდა კლიმატის

მოდელებში, რაც მეცნიერებისთვის ძალზე მოულოდნელია³⁰ (სურათი 20).

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ არქტიკის რეგიონის ეს დათბობა ხდება ზუსტად ტაიმირის ნახევარკუნძულის მიდამოში. ციმბირის წყლის ზონაში ეს ანომალია შეიძლება აიხსნას იმით, რომ ოკეანის ქერქი უფრო თხელია და სითბოს უფრო სწრაფად ატარებს, ხოლო წყალს უფრო დიდი სითბოს ტევადობა აქვს ვიდრე ატმოსფეროს. მაშასადამე, სწორედ ოკეანის წყალი ინტენსიურად აგროვებს და ინარჩუნებს სითბოს ამომავალი მაგმატური პლუმიდან, მიუხედავად იმისა, რომ პლუმის აწევა ხდება კონტინენტური ქერქის ქვეშ, სანაპიროდან შედარებით შორ მანძილზე.

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>



ნახ. 20.

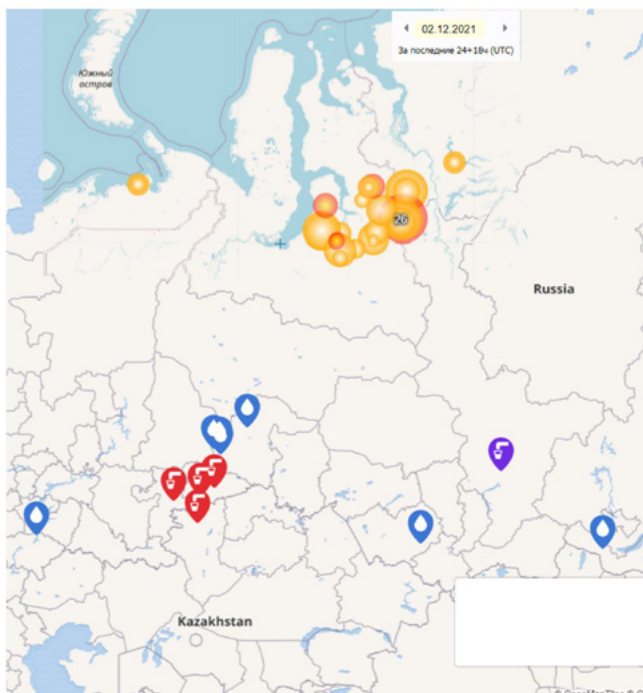
საშუალო წლიური ტემპერატურის დინამიკა არქტიკაში. ა) არქტიკა ($66,5^{\circ}\text{N}$ - 90°N) (მუქი ფერები) და მსოფლიო (ღია ფერები) საშუალო წლიური ტემპერატურის ანომალიებს 1950-2021 წლებისთვის, რომელიც მიღებულია სხვადასხვა დაკვირვების მონაცემთა ნაკრებიდან. ტემპერატურის ანომალიები გამოითვლება საშუალო მნიშვნელობებთან შედარებით 30 წლის განმავლობაში, 1981-2010 წლებში. წერტილოვანი ხაზი (b) და (c) წარმოადგენს არქტიკულ წრეს ($66,5^{\circ}$ ჩრდილო).

წყარო: 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>

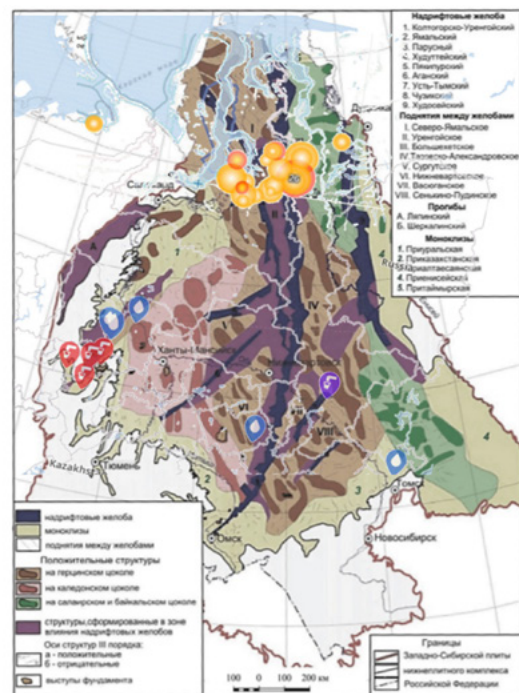
ციმბირის პლუმის აწევის ირიბი ნიშნები

ციმბირის ქვეშ დედამიწის ქერქში მაგმატური ცენტრის შეყვანის შედეგად არა მხოლოდ ატმოსფერო თბება, არამედ ხდება სხვა ანომალიების მთელი სერია: მუდმივი ყინვის დნობა ქვემოდან ზემოთ რეგიონში სეისმური აქტივობის გაზრდა, ცხელი წყლის ზედაპირზე აწევის გამოც წყლები დუღდება ჭაბურღილებში, უპრეცედენტო ტყის ხანძრები, მთელ ციმბირში, მათ შორის თოვლის საფარის ქვეშ ხანძრები. მაქსიმალური

ლოკალიზაცია ხანძრების თოვლის ქვეშ ბოლო წლებში დაიწყო პოლარული რეგიონების ტაიმირის, იამალისა და გიდანის ნახევარკუნძულების სამხრეთით. მნიშვნელოვანი ფაქტორია ის, რომ თოვლის ქვეშ ხანძრის გამოვლინებები („ზომბი ხანძარი“) - ჭებში მდუღარე წყალი - შეიმჩნევა ღრმა რღვევების ზონების ზემოთ (სურ. 21).



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



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

ნახ. 21.

2021 წელს არქტიკული წრის მიღმა თოვლის ქვეშ ზამთრის ხანძრების ლოკალიზაციის რუკა



სვერდლოვსკის რეგიონში თოვლის ქვეშ ხანძრის ფოტოები

ჩრდილოეთ განედებში იზრდება მეთანისა და წყალბადის გამონაბოლქვი წიაღიდან, იზრდება ბუნებრივი აირის აფეთქების შედეგად კრატერების რაოდენობა, არქტიკულ შლეიფზე კი ტალახის ვულკანიზმი ძლიერდება. ქვემოდან გათბობა იწვევს მუდმივი ყინვაგამძლე ნიადაგის დეგრადაციას და გაზის ჰიდრატების განადგურებას,

რაც იწვევს აირების გათავისუფლებას, აფეთქების კრატერებს და ტალახის ვულკანიზმის ზრდას. სიღრმიდან გამოთავისუფლებული აირი გავლენას ახდენს ატმოსფეროს მდგომარეობაზე, იწვევს დამატებით თერმულ, გეოქიმიურ და ელექტრომაგნიტურ ანომალიებს. მოდით განვიხილოთ ეს პროცესები უფრო დეტალურად.

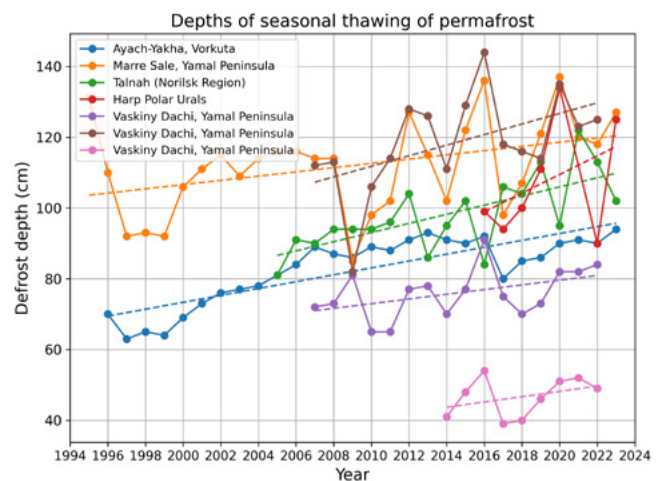
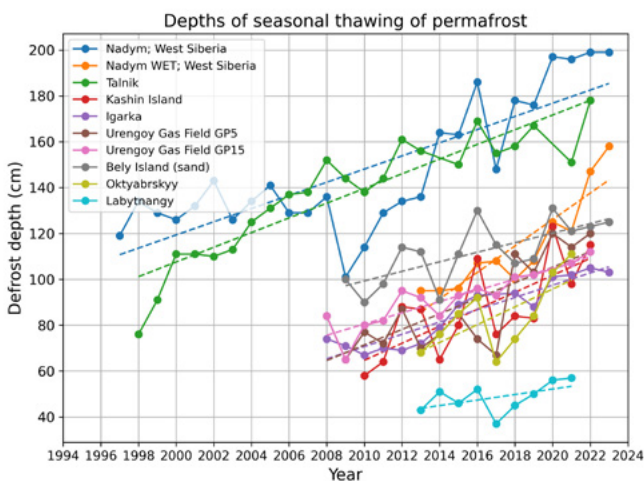
მუდმივი მყინვარების დნობა

მანტიის პლუმიდან მომდინარე დამატებითი გეოთერმული სითბოს კიდევ ერთი მარკერი არის მუდმივი ყინვის მდგომარეობა. მოხსენების ავტორებმა გაანალიზეს მონაცემები რუსეთში 1994 წლიდან 2023 წლამდე სეზონური დათბობის სიღრმის შესახებ. მონაცემთა ბაზა შედგენილია საერთაშორისო Circumpolar Active Layer and Near-Surface Permafrost Monitoring პროგრამის (CALM) ფარგლებში განხორციელებული გაზომვების საფუძველზე და ხელმისაწვდომია ვებგვერდზე permafrost.su.

ამჟამად რუსეთში 58 ადგილია, რომლებიც აკვირდებიან მუდმივ ყინვას სტანდარტიზებული მეთოდების გამოყენებით და მათგან 46 ატარებს

გაზომვებს 10 წელზე მეტი ხნის განმავლობაში, რაც საშუალებას იძლევა გრძელვადიანი ტენდენციების იდენტიფიცირების. მონაცემთა მასივის ანალიზმა შესაძლებელი გახადა ტერიტორიების იდენტიფიცირება, სადაც შეინიშნება დათბობის სიღრმის ზრდის სტაბილური ტენდენცია, რაც მიუთითებს ამ ზონის დამატებით გათბობაზე.

გამოვლინდა მონაცემების ორი ჯგუფი: 40 სმ-დან 200 სმ-მდე სიღრმეზე დათბობის სიღრმის გაზრდის უფრო აშკარა ტენდენციით (ნახ. 22, ა) და 40 სმ-დან 140 სმ-მდე სიღრმეზე მუდმივი ნიადაგის დათბობის ნაკლებად ინტენსიური ტემპით (ნახ. 22, ბ).



ნახ. 22.

პერმაფროსტის სეზონური დათბობის სიღრმის დინამიკა სხვადასხვა რეგიონში სხვადასხვა ინტენსივობით: ა) დათბობის სიღრმის უფრო გამოხატული ზრდით; ბ) დათბობის სიღრმის ნაკლებად გამოხატული ზრდით.

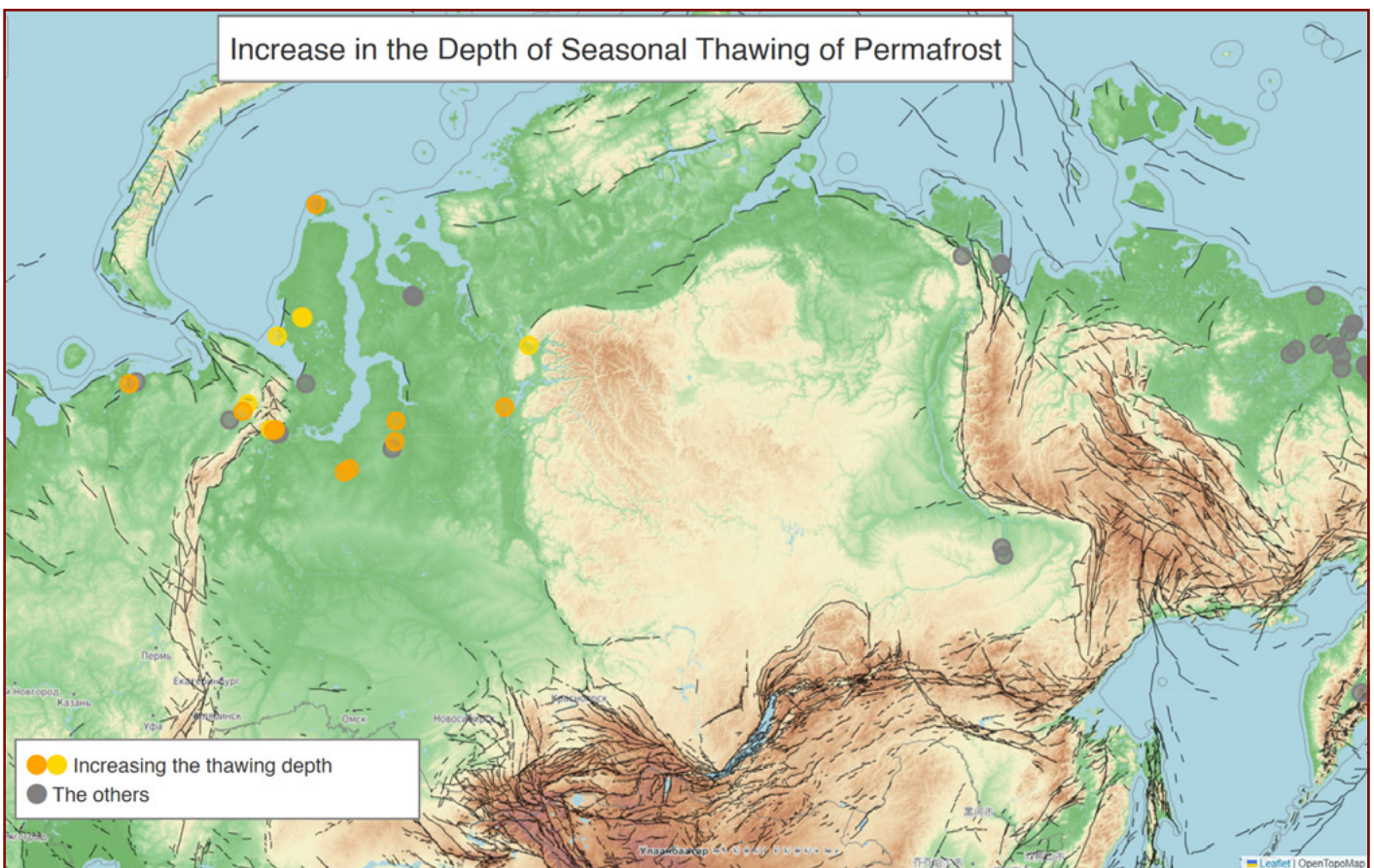
მონაცემთა წყარო: <https://permafrost.su>

გაზომვები ხორციელდება საერთაშორისო ცირკულარული მონიტორინგის (CALM) პროგრამის ფარგლებში.

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

სიცხადისთვის, ყველა შესწავლილი წერტილი გამოსახული იყო რუკაზე და მონიშნული იყო, შესაბამისად, ნარინჯისფერ და ყვითლად (სურ. 23). მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ეს პუნქტები ძირითადად კონცენტრირებულია გარკვეულ არეალში: დასავლეთ ციმბირის ჩრდილოეთით, იამალის ნახევარკუნძულზე და გიდანისა და ტაიმირის ნახევარკუნძულების სამხრეთით.

მუდმივი ყინვის მაქსიმალური დათბობის უბნების ეს ლოკალიზაცია შეესაბამება მანტიაში შემცირებული სეისმური ტალღების სიჩქარის ზონას, მაგმატური პლუმის თავის გავრცელების სავარაუდო ზონაში. ეს, თავის მხრივ, არის ნიადაგის ტემპერატურის მატების მიზეზი, მათ შორის გაყინული ფენის ფარგლებში.



ნახ. 23.

მუდმივი ყინვის ფენის სეზონური დათბობის მზარდი სიღრმის ადგილები. გაზომვის ადგილები მონიშნულია წერტილებით: ნაცრისფერი – ადგილები, სადაც სეზონური დათბობის შესამჩნევი ზრდა არ შეინიშნება; ყვითელი - ადგილები, სადაც დათბობის სიღრმე იზრდება.

მონაცემთა წყარო: <https://permafrost.su>

გაზომვები ხორციელდება საერთაშორისო ცირკულარული მონიტორინგის (CALM) პროგრამის ფარგლებში.

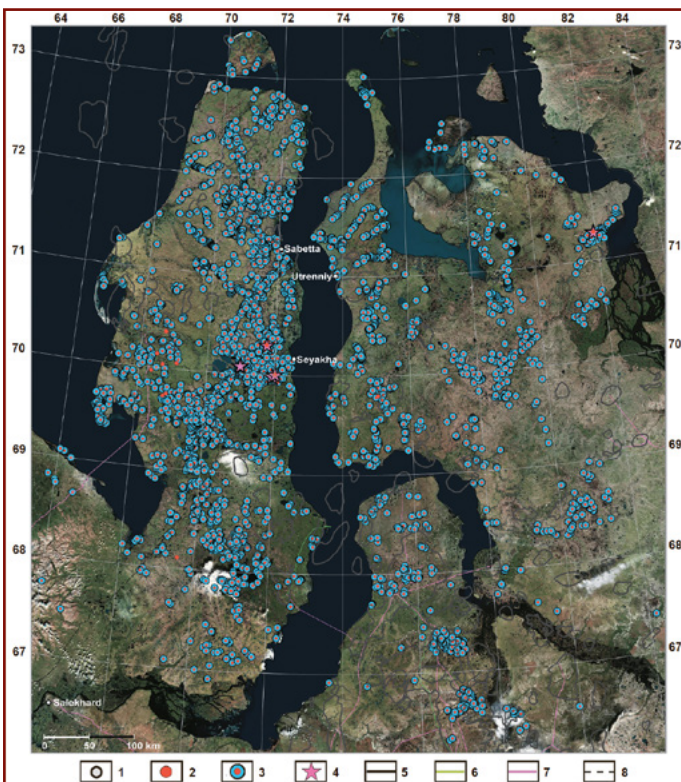
<https://www2.gwu.edu/~calm>

ტალახის ვულკანიზმის გამოვლინებები

ამომავალი მაგმისგან დამატებითი გათბობა იწვევს მუდმივი ყინვის დეგრადაციას და გავლენას ახდენს ამ ნიადაგებში დაცულ გაზის ჰიდრატებზე, ათავისუფლებს მათში შემავალი გაზების დიდ რაოდენობას. ამას გარდა, გაზი მიგრირებს გაზის საბადოებიდან და უაღრესად გაზით გაჯერებული ფორმირების წყლებიდან, რაც ამცირებს ნიადაგის ელასტიურ-გამძლე თვისებებს და ხელს უწყობს თიხების გათხევადებას, რაც იწვევს ტალახის ვულკანიზმის შესაძლო პროცესებს. ტალახის ვულკანიზმი არის გეოლოგიური პროცესი, რომლის დროსაც აირის, წყლისა და ნამსხვრევების ნარევი გამოიდევენება დედამიწის

ქერქში არსებული ბზარებიდან შიდა გეოსტატიკური წნევის გავლენის ქვეშ.

ეს სწორედ ის პროცესებია, რომლებიც რუსეთის მეცნიერებათა აკადემიის (RAS) მეცნიერებმა აღმოაჩინეს არქტიკულ იამალის ნახევარკუნძულზე.³¹ გეოლოგიური და გეოფიზიკური კვლევების კომპლექსის შედეგად, დედამიწის დისტანციური ზონდირების მონაცემების გამოყენებით 2014 წლიდან 2022 წლამდე, გამოვლინდა 3000-ზე მეტი ძლიერი გაზის ემისიების ზონა კრატერების ფორმირებით თერმოკარსტული ტბების, მდინარეების და ყარას ზღვის სანაპირო ნაწილზე (ნახ.24)



ნახ.24.

დასავლეთ ციმბირის ჩრდილოეთით მძლავრი გაზის გამოყოფის ზონების განაწილება. აღნიშვნები: 1 - დასახლებული პუნქტები, 2 - იზოლირებული გაზის ემისიის კრატერები, 3 - გაზის ემისიის კრატერები წყალსაცავების ფსკერზე, 4 - ტალახის ვულკანიური გამოვლინებები, 5 - ნავთობისა და გაზის საბადოების კონტურები, 6 - ნავთობსადენები, 7 - გაზსადენები, 8 - რკინიგზა. რუკა ეფუძნება სატელიტური სურათების მოზაიკას ESRI მონაცემთა ბაზიდან.

წყარო: Bogoyavlensky V.I., Nikonov R.A., Bogoyavlensky I.V. ახალი მონაცემები არქტიკაში დასავლეთ ციმბირის ჩრდილოეთით მდებარე მიწის ინტენსიური დეგაზაციის შესახებ: თერმოკარსტული ტბები გაზის ემისიის კრატერებით და ტალახის ვულკანებით. Arctic: Ecology and Economy 13, 353–368 (2023).

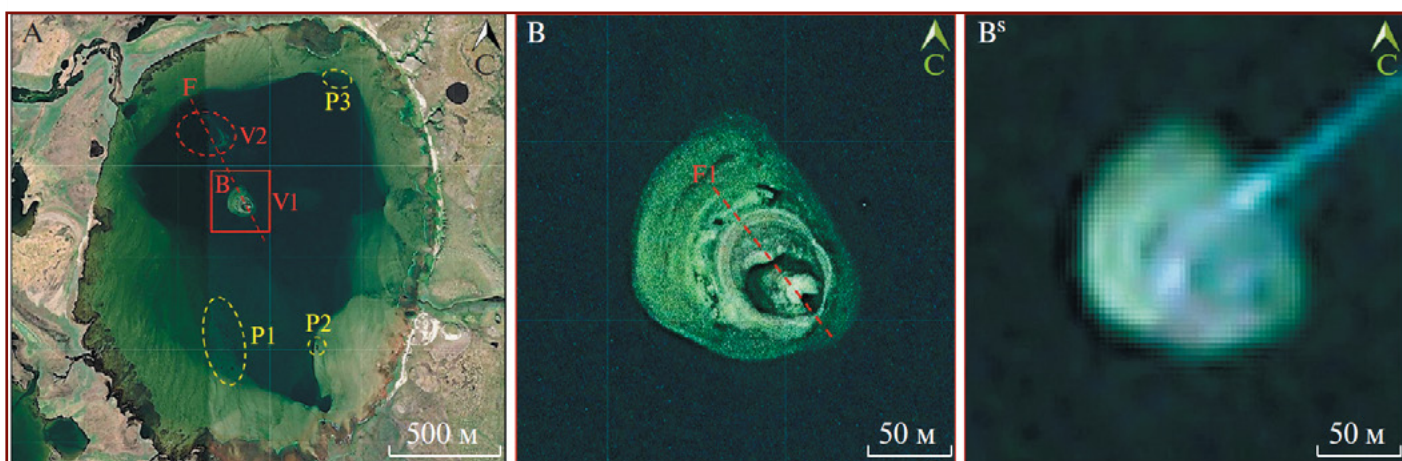
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

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

2022–2023 წლებში, დედამიწის დისტანციური ზონდირების მონაცემებით, პირველად აღმოაჩინეს დიდი ტალახის ვულკანური სტრუქტურები თერმოკარსტული ტბების ლაბვარტოსა და იამბუტოს ფსკერზე, რომლებიც პერიოდულად აჩვენებდნენ აქტიურ ტალახის ვულკანიზმს³² (ნახ. 25). თერმოკარსტის ტბა არის წყლის ავზი, რომელიც წარმოიქმნება მუდმივი ყინვის დათბობის შედეგად. ამრიგად, არა მხოლოდ

ტბის დათბობა, არამედ ტბის სიღრმეში თიხის გათხევადებაც მიუთითებს ღრმა გათბობის წყაროზე.

კვლევის ავტორების თქმით, თერმოკარსტული ტბების ფსკერზე ასეთი აშკარა ტალახის ვულკანური სტრუქტურები აქამდე უცნობი იყო მთელ ცირკუმარკტიკულ რეგიონში.



ნახ.25.

WorldView-2 კოსმოსური გამოსახულება თერმოკარსტული ტბის Labvarto (A) და მისი გაფართოებული ფრაგმენტი (B) Sentinel-2 კოსმოსური გამოსახულების (B^s) ფრაგმენტის დამატებით. აღნიშვნები: P1, P2 და P3 არის ჯიბეები; V1 და V2 არის ტალახის ვულკანები; F და F1 არის პროგნოზირებული ხარვეზები.

წყარო: Bogoyavlensky V.I. ახალი მონაცემები იამალის ნახევარკუნძულზე არქტიკაში ტალახის ვულკანიზმის შესახებ. რუსეთის მეცნიერებათა აკადემიის მოხსენებები. დედამიწის მეცნიერებები 512, 92–99 (2023) <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

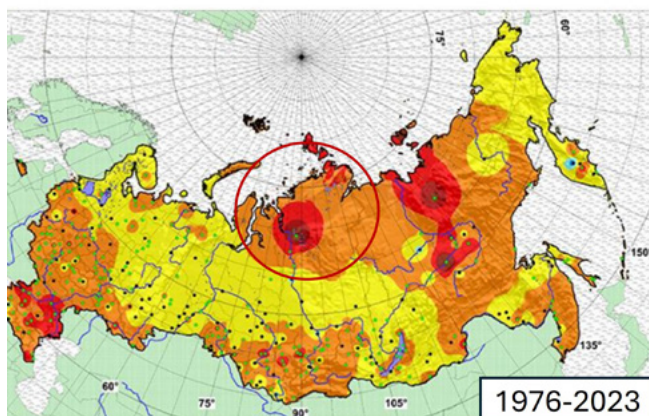
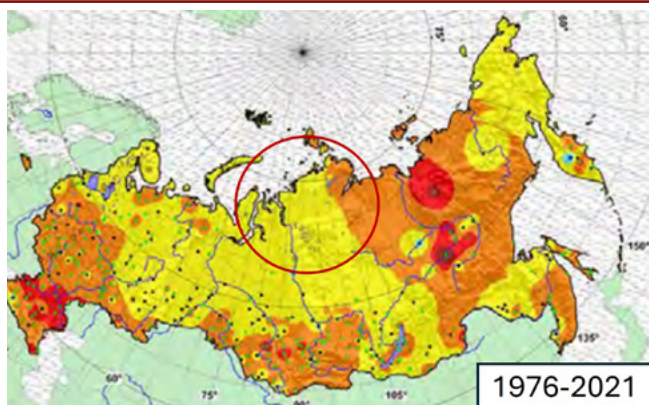
³² Bogoyavlensky, V. I. NEW DATA ON MUD VOLCANISM IN THE ARCTIC ON THE YAMAL PENINSULA. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle 512, 92–99 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

ნიადაგის გათბობა

2021-2023 წლების Roshydromet-ის მონაცემებზე დაყრდნობით, გაანალიზდა ნიადაგის ტემპერატურის რუკები 80, 160 და 320 სმ სიღრმეზე. (სურ. 26). 2021-დან 2023 წლამდე, ტენდენციის რუკაზე აშკარა ანომალია გამოჩნდა გიდანისა და ტაიმირის ნახევარკუნძულების სამხრეთით, რომელიც ტერიტორიულად ემთხვევა მანტიაში სეისმური ტალღების შემცირებული სიჩქარის არეალს, რომელიც გამოვლენილია ციმბირის

რეგიონის ლითოსფეროს ქვეშ სეისმური ტომოგრაფიის მეთოდებით.

გაზომვების მნიშვნელოვანი სიღრმის (320 სმ) და დაკვირვებების ფართო გაშუქების გათვალისწინებით (466 მეტეოროლოგიური სადგური რუსეთში), შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ აღმოჩენილი ტემპერატურის ანომალია დაკავშირებულია გეოთერმული სიცხის მატებასთან მაგმური პლუმის აწევის გამო.



ნახ.26.

ნიადაგის გათბობის ტენდენციების რუკები როსჰიდრომეტის ანგარიშებზე დაყრდნობით. ზედა: 1976 წლიდან 2021 წლამდე, ქვედა: 1976 წლიდან 2023 წლამდე.

წყაროები:

ანგარიში რუსეთის ფედერაციის კლიმატის მახასიათებლების შესახებ 2021 წლისთვის. - M.: Roshydromet, 2022. - 110 გვ.

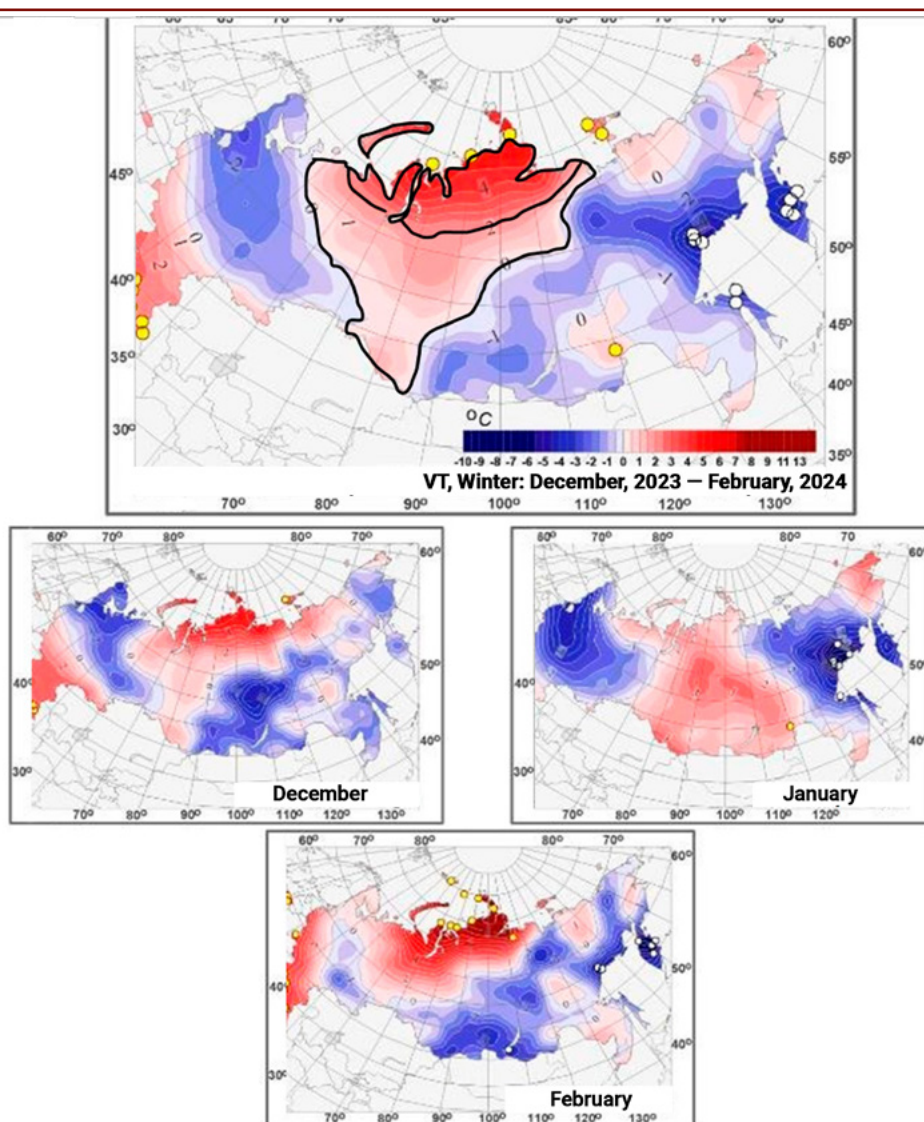
ანგარიში რუსეთის ფედერაციაში 2023 წლის კლიმატის მახასიათებლების შესახებ. - M.: Roshydromet, 2024. - 104 გვ.

ჰაერის ზედაპირის ტემპერატურა

ტემპერატურაზე დაკვირვების მონაცემები 2023–2024 წლის ზამთრის პერიოდისთვის. ასევე ასახავს ზედაპირული ჰაერის ტემპერატურის ანომალიურ ხასიათს (სურ. 27). საშუალო ტემპერატურული ანომალიების რუკა 2023 წლის დეკემბრიდან 2024 წლის თებერვლამდე პერიოდისთვის გვიჩვენებს ტემპერატურის ზრდას 2.0–4.5

°C-ით ნორმასთან შედარებით გიდანისა და ტაიმირის ნახევარკუნძულების მიდამოებში.

ამ ტერიტორიის ჩრდილოეთი მდებარეობის გათვალისწინებით, ზამთარში ტემპერატურის ასეთი მნიშვნელოვანი მატება შეიძლება გამოწვეული იყოს მანტიის პლუმის თერმული ეფექტით.



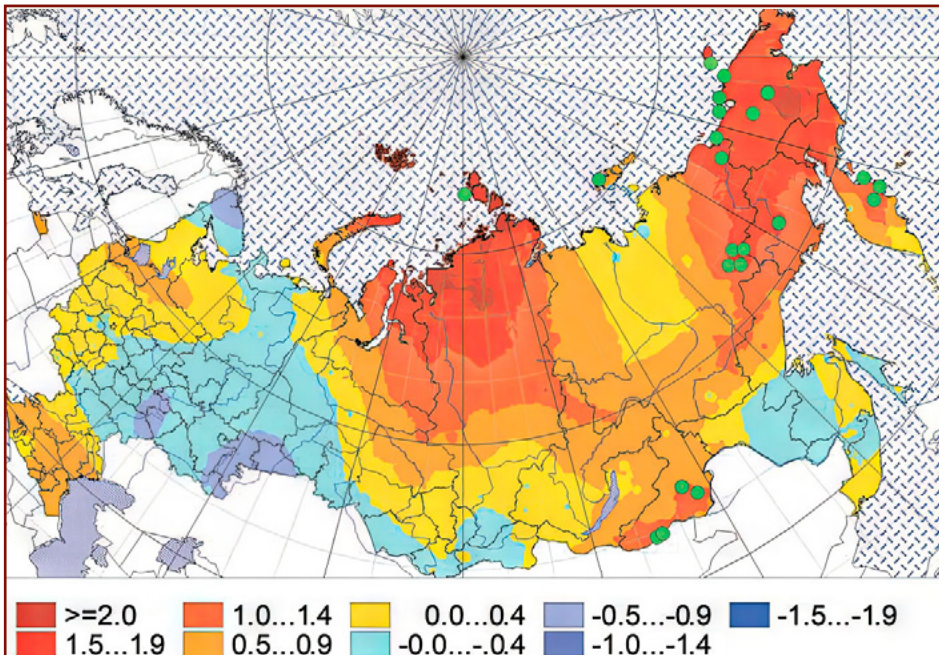
ნახ. 27.

ზედაპირული ჰაერის ტემპერატურის (°C) საშუალო სეზონური და საშუალო თვიური ანომალიების ველები რუსეთში 2023-2024 წლის ზამთარში.

წყარო: ანგარიში კლიმატის მახასიათებლების შესახებ რუსეთის ფედერაციაში 2023 წლისთვის. - M.: Roshydromet, 2024.

აღსანიშნავია, რომ იანვრის და ივლისის საშუალო თვიური ტემპერატურის³³ რუკების ანალიზი 2001–2022 წლებში. გვიჩვენებს სტაბილურ ტემპერატურულ ანომალიას შესასწავლ რეგიონში (სურ. 28, 29). ამრიგად, შეიძლება ითქვას, რომ ეს ანომალია დაფიქსირდა არა მხოლოდ

ბოლო 2 წლის განმავლობაში, არამედ თანმიმდევრულად ვლინდება მთელი 23-წლიანი დაკვირვების პერიოდის განმავლობაში, რაც ადასტურებს დასკვნას პლუმის შეყვანის გავლენის შესახებ ზედაპირის ტემპერატურაზე.

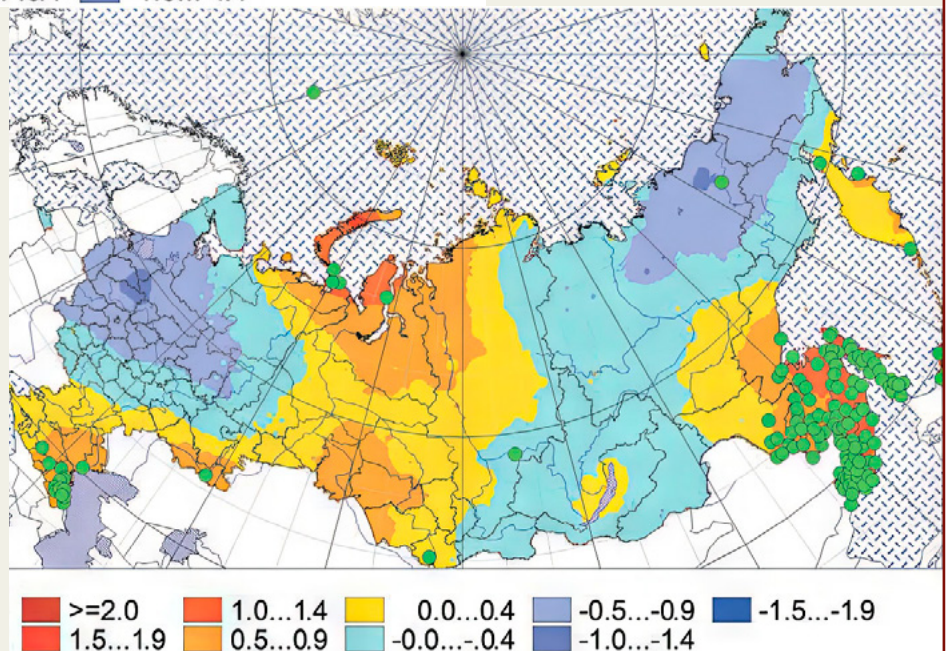


ნახ. 28. ჰაერის საშუალო თვიური ტემპერატურის ხაზოვანი ტენდენციის კოეფიციენტები (°C/10 წელი) 2001–2022 წლებში. (რუსეთის საზღვრებში 2022 წლის თებერვლამდე) - იანვარი.

წყარო: Sherstyukov B.G. გლობალური დათბობა და მისი შესაძლო მიზეზები // ჰიდრომეტეოროლოგია და ეკოლოგია. 2023. No 70. გვ 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

ნახ. 29. მოსკოვში ჰაერის საშუალო თვიური ტემპერატურის ხაზოვანი ტენდენციის კოეფიციენტები (°C/10 წელი) 2001–2022 წლებში. (რუსეთის საზღვრებში 2022 წლის თებერვლამდე) - ივლისი.

წყარო: Sherstyukov B.G. გლობალური დათბობა და მისი შესაძლო მიზეზები // ჰიდრომეტეოროლოგია და ეკოლოგია. 2023. No 70. გვ 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

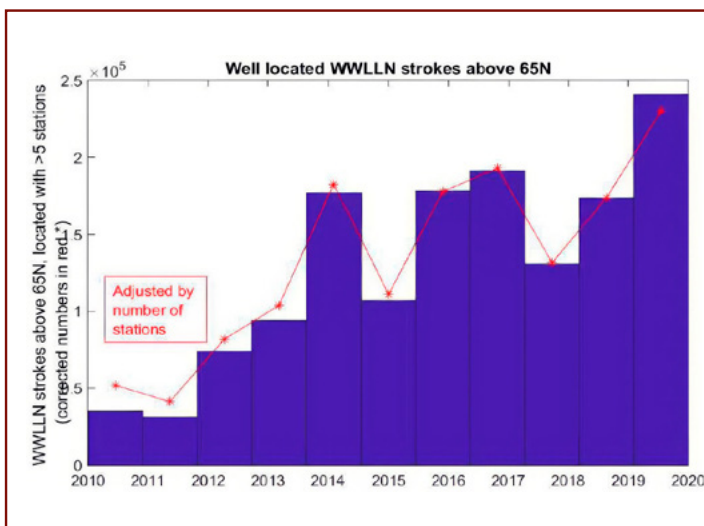


³³ Sherstyukov, B. G. (2023). Global warming and its possible causes. Journal of Hydrometeorology and Ecology, 70, 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

ელვის დარტყმების ზრდა

სამეცნიერო საზოგადოება შემოფოთებულია არქტიკაში ჭექა-ქუხილის და ელვის დარტყმის რაოდენობის გაზრდით. არქტიკაში ელვისებური დარტყმების რაოდენობა ჩრდილო 65°-ზე ზემოთ. სამჯერ გაიზარდა 2010 წლიდან 2020 წლამდე³⁴ (სურ. 30). თავისებურება ის არის, რომ ამ ელვისებური დარტყმების უმეტესობა კონცენტრირებულია ჩრდილოეთ ციმბირის რეგიონში და პრაქტიკულად არ არსებობს ჩრდილოეთ კანადასა და გრენლანდიის რეგიონში (ნახ. 31, 32). ელვა მოძრაობდა ჩრდილოეთ

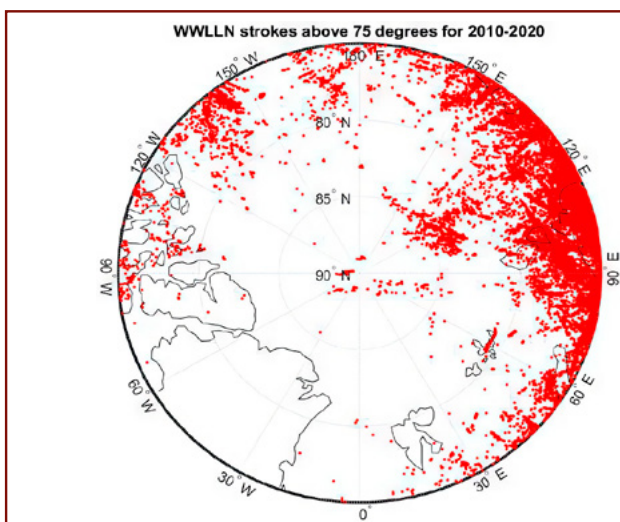
პოლუსზე, რადგან ფართოდ გავრცელდა ინფორმაცია 2019 წლის აგვისტოში, რომ რამდენიმე ელვის დარტყმა დაფიქსირდა ჩრდილოეთ პოლუსიდან რამდენიმე ასეულ კილომეტრში.³⁵ ელვის უმეტესობა პოლარულ რეგიონებში (ჩრდილოეთით 80°) ყოველ ზაფხულს გამოწვეულია მხოლოდ რამდენიმე ინტენსიური ჭექა-ქუხილის დღეებით. თუმცა ეს ჭექა-ქუხილი რეგიონის ახალ მახასიათებელად იქცა, რადგან წინა წლებში აქ ჭექა-ქუხილი ძალიან ცოტა იყო.



ნახ. 30.

სწორად ჩაწერილი WWLLN ელვა 65°N-ზე ზემოთ (მონიშნულია ლურჯად) და გრაფიკის წითელი ხაზი აჩვენებს კორექტირებას WWLLN სადგურების საერთო რაოდენობის მიხედვით. WWLLN — World Wide Lightning მდებარეობის ქსელი.

წყარო: Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). ელვა არქტიკაში. გეოფიზიკური კვლევის წერილები, 48, e2020GL091366. <https://doi.org/10.1029/2020GL091366>



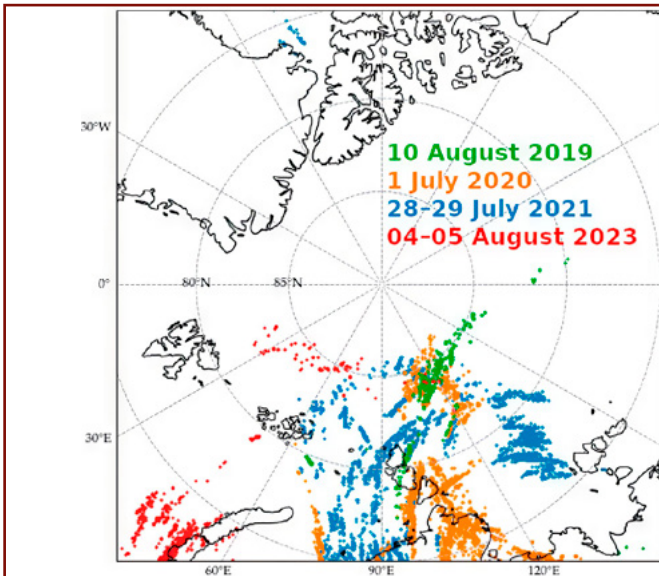
ნახ. 31.

WWLLN ელვისებური დარტყმების გლობალური განაწილება 2010–2020 წლების ივნისში, ივლისსა და აგვისტოში. 75°-ზე ჩრდილო შ. WWLLN - World Wide Lightning მდებარეობის ქსელი.

წყარო: Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). ელვა არქტიკაში. გეოფიზიკური კვლევის წერილები, 48, e2020GL091366. <https://doi.org/10.1029/2020GL091366>

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

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



ნახ.32.2019–2023 წლებში ჭექა-ქუხილის დროს WWLLN-ის მიერ აღმოჩენილი ელვის ადგილები. მწვანე - 2019, ნარინჯისფერი - 2020, ლურჯი - 2021, წითელი - 2023 წ.

წყარო: პოპიკინა, ალენა, ნიკოლაი ილინი, მარია შატალინა, კოლინ პრაისი, ფედორ სარაფანოვი, ანდრეი ტერენტევი და ანდრეი კურკინი. 2024. „ჭექა-ქუხილი ჩრდილოეთ პოლუსთან“ ატმოსფერო 15, No. 3:310.

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

ამ ფიქსირებული მდებარეობის მიზეზი ბოლო რამდენიმე წლის განმავლობაში არის ზაფხულის უკიდურესი სიცხე, რომელიც განიცადა ჩრდილოეთ ციმბირმა, ზაფხულის თვეებში ტემპერატურა 35°C-ს აღწევს. მაგრამ ასევე ვარაუდობენ, რომ რეგიონში მთლიანი ატმოსფერული იონიზაციის ზრდა მაგმატური პლუმის შემოჭრის გამო ასევე მნიშვნელოვანი ფაქტორია ელვის გაზრდისას. ეს ხდება თერმული ენერგიის ელექტრულ ენერგიაში გადასვლის შედეგად იუტკინის ეფექტის მიხედვით მანტიის შიგნით აფეთქებების პროცესში, რაც ხდება სხვადასხვა ტემპერატურის მაგმის ნაკადების შეხებისას. შედეგად, უზარმაზარი ენერგია გამოიყოფა სიღრმეებიდან, რაც იწვევს ნიადაგის ფენის ზედაპირზე სტატიკური დაძაბულობის ზრდას, ზედაპირის პოტენციალის ცვლილებას, ჰაერის იონიზაციის ზრდას და, შედეგად,

ელვისებური დარტყმის რაოდენობის ზრდას.

გაზების მნიშვნელოვანი მოცულობები ასევე გამოიყოფა ქერქის ბზარების მეშვეობით. ამან შეიძლება გავლენა მოახდინოს ღრუბლის ფორმირებაზე, ასევე ადგილობრივ ამინდის პირობებზე. მაგმის შეღწევა არის ძირითადი ფაქტორი ზედაპირის გაცხელებაში, ტენიანობის გაზრდისა და თერმული ანომალიების შესაქმნელად, რაც იწვევს ჭექა-ქუხილს და ელვას.

ვინაიდან ჭექა-ქუხილი და ელვა საჭიროებს ცივი ჰაერის, თბილი ჰაერის და კონვექციური არასტაბილურობის ფორმირებას, ციმბირის მანტიისპლუმის მდებარეობა ქმნის ოპტიმალურ პირობებს მათი ფორმირებისთვის.

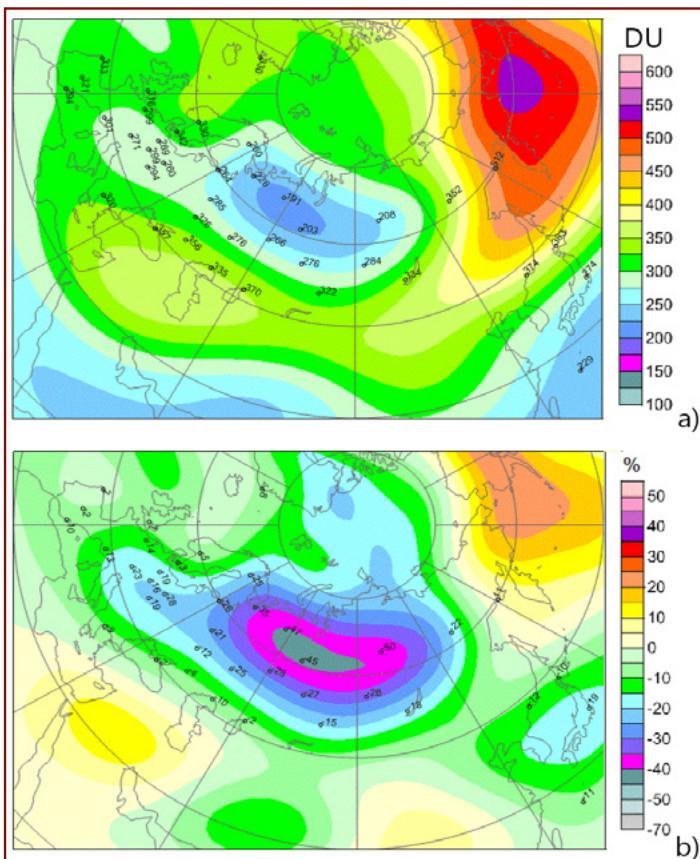
ოზონის შრის დაშლა

მაგმატური აქტივობას წიაღში თან ახლავს ვულკანური აირების მნიშვნელოვანი რაოდენობის გამოყოფა, მათ შორის წყალბადის, მეთანის და ნახშირორჟანგის. წყალბადის გამონაბოლქვი, ვ.ლ. სივოროტკინის³⁶ ნაშრომების მიხედვით, იწვევს ოზონის შრის განადგურებას. ვინაიდან მაგმის ამალვებს პულსირებადი ხასიათი აქვს, ოზონის შრის დეგრადაციას და შემდგომ განადგურებას ასევე ექნება სპორადული, ანუ ეპიზოდური გამოვლინება.

ოზონის შრის ანომალიები დაფიქსირდა ჩრდილოეთ ციმბირში 1997-1998 წლებში, ანუ დედამიწის ბირთვის ტაიმირის ნახევარკუნძულისკენ გადაადგილების შემდეგ. ოზონის დაშლის

ეპიზოდები დაფიქსირდა 2011, 2016, 2020 წლებში.³⁷ ოზონის მაქსიმალური დეფიციტი 2016 წელს დაფიქსირდა.³⁸ A2016 წლის იანვრის ბოლოს (პირველად 1973 წლიდან დაკვირვების დაწყებიდან) ჩრდილოეთ ურალსა და ციმბირში დაფიქსირდა ოზონის ანომალია 190-200 ერთეული დობსონის ოზონის შემცველობით, რაც 40-45%-ით ნაკლებია საშუალო გრძელვადიან მნიშვნელობებზე, ამ ფენომენის ხანგრძლივობით 1 კვირამდე (ნახ.33).

ოზონის მთლიანი შემცველობის მნიშვნელოვანი შემცირება ასევე დაფიქსირდა AURA-ს თანამგზავრზე (აშშ) დამონტაჟებული OMI ინსტრუმენტის გამოყენებით (სურ. 34).



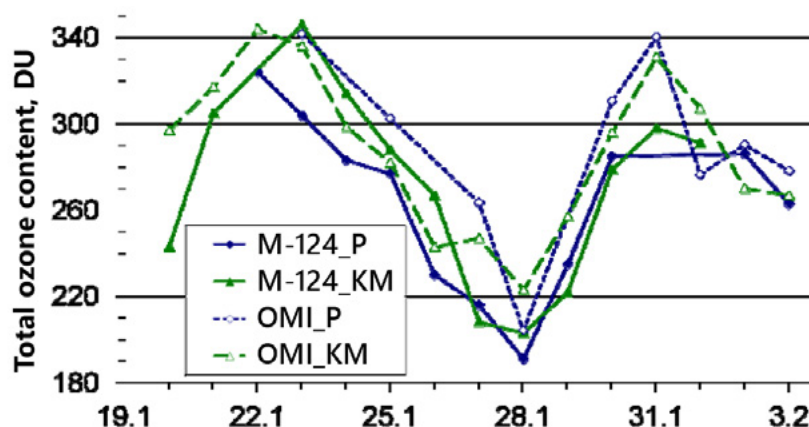
სურ. 33.
ოზონის მთლიანი შემცველობა (ა) და მისი გადახრები ნორმიდან (ბ) 2016 წლის 28 იანვარს Woudc სატელიტური მონაცემების საფუძველზე [<http://woudc.org/>]. რუკაზე ნომრები წარმოადგენს ოზონომეტრიული ქსელის სადგურების მთლიანი ოზონის შემცველობის გაზომვას.

წყარო: Nikiforova M. P., Vargin P. N., Zvyagintsev A. M., Ivanova N. S., Kuznetsova I. N., Lukyanov A. N. (2016). ოზონის მინი ხვრელი ჩრდილოეთ ურალის და ციმბირის თავზე. რუსეთის ფედერაციის ჰიდრომეტეოროლოგიური კვლევის ცენტრის შრომები, №360, გვ. 168-180 წწ. ჰიდრომეტეოროლოგიური კონფერენციის შრომებში, 9-10 თებერვალი, ტ. 91-96 წწ. ვორონეჟი: კვლევის პუბლიკაციები.

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

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

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



ნახ.34.

ოზონის მთლიანი შემცველობა M-124 მიწისზედა ოზონომეტრის და OMI ინსტრუმენტის გამოყენებით გაზომვების მიხედვით AURA თანამგზავრზე (აშშ) პეჩორას (P) და ხანტი-მანსიისკის (KhM) სადგურებზე 2016 წლის 20 იანვრიდან 3 თებერვლამდე პერიოდში.

წყარო: Nikiforova M. P., Vargin P. N., Zvyagintsev A. M., Ivanova N. S., Kuznetsova I. N., Lukyanov A. N. (2016). ოზონის მინი ხვრელი ჩრდილოეთ ურალის და ციმბირის თავზე. რუსეთის ფედერაციის ჰიდრომეტეოროლოგიური კვლევის ცენტრის შრომები, №360, გვ. 168–180 წწ. ჰიდრომეტეოროლოგიური კონფერენციის შრომებში, 9–10 თებერვალი, ტ. 91–96 წწ. ვორონეჟი: კვლევის პუბლიკაციები.

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ჩრდილოეთ ნახევარსფეროს ექსტრატროპიკულ განედებში ოზონის მთლიანი შემცველობის საშუალო გრძელვადიანი სეზონური ცვალებადობა მინიმალურია სექტემბერში და მაქსიმუმი მარტ-აპრილში. მაგრამ 2016 წელს ოზონის დეგრადაცია უჩვეულოდ ადრე, 2016 წლის იანვარში მოხდა და ოზონის მთლიანი შემცველობა ამ თვეში ყველაზე დაბალი

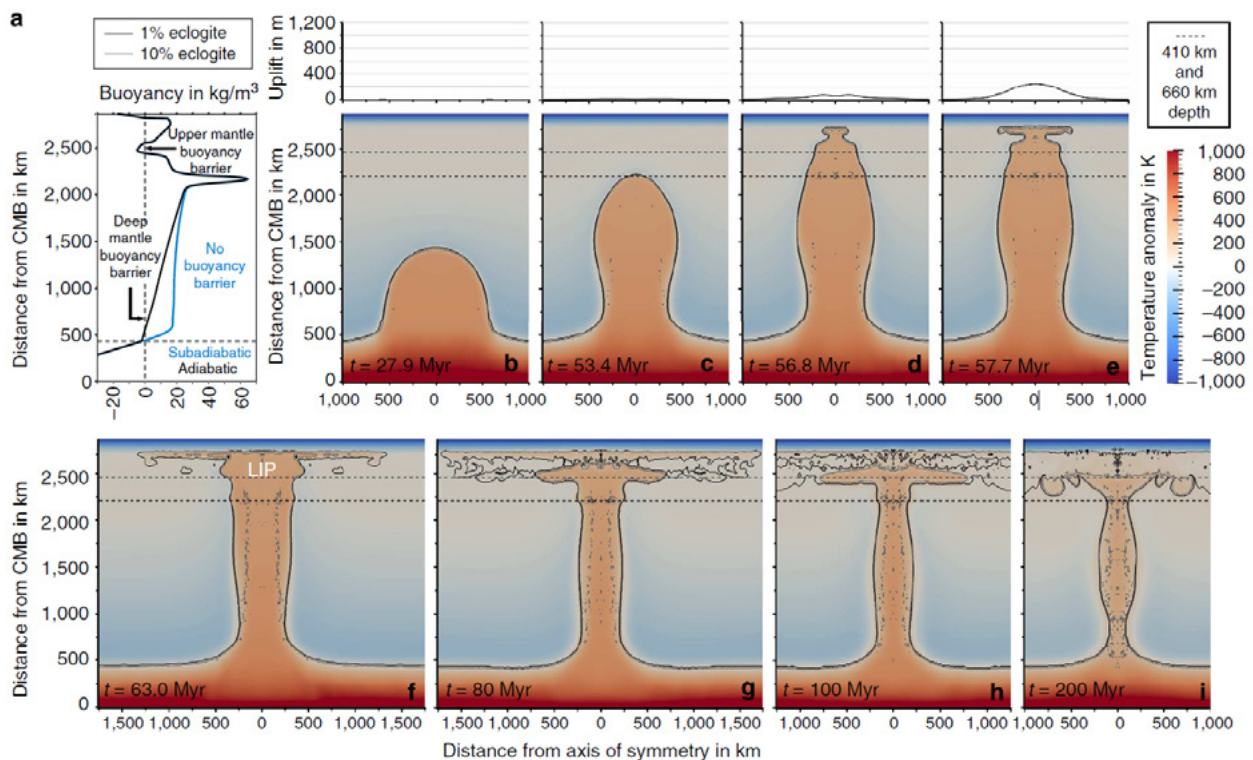
იყო ინსტრუმენტული დაკვირვებების მთელ ისტორიაში.

ამრიგად, ოზონის ფენის დეგრადაცია ციმბირის რეგიონში შეიძლება იყოს დამატებითი ინდიკატორი აირების გამოყოფის ხარვეზების გასწვრივ მაგმატური პლუმის ზედაპირისკენ ასვლის შედეგად.

მაგმატური პლუმის სტრუქტურა, შესაძლო ზომები და ლოკალიზაცია ლიტერატურულ და დაკვირვებულ მონაცემებზე დაყრდნობით

პლუმის სტრუქტურა შეიძლება ვიზუალურად იყოს სოკოს სახით. მას აქვს კუდი (ღერო), რომელიც ატარებს გაცხელებულ მასალას ბირთვი-მანტიის საზღვრიდან ზემოთ. პლუმის ზედა ნაწილი, რომელიც აწევს დროს ფართოვდება, ქმნის

პლუმის თავს. როდესაც პლუმი აღწევს საზღვარს, ლითოსფეროს ძირს, ის ხვდება გამაგრებული ქანების ცეცხლგამძლე ფენას, რის გამოც თავი ჰორიზონტალურად იშლება ლითოსფეროს ქვეშ, სოკოს ქუდის მსგავსად (სურ. 35).



ნახ. 35.

ნახატში ნაჩვენებია მაგმატური პლუმის ევოლუციის მოდელი, როგორც არის ციმბირის ბილიკებზე 250 მილიონი წლის წინ.

მარცხნივ (a) დიაგრამა გვიჩვენებს, თუ როგორ ამოდის მაგმა დედამიწის მანტიის სხვადასხვა ფენებიდან. გამოსახულების ძირითადი ნაწილი (b-i) არის ერთგვარი „დროის ხაზი“, რომელიც აჩვენებს პლუმის განვითარების ეტაპებს. პირველი, იქმნება ცხელი მაგმის „სვეტი“, რომელიც ამოდის მანტიის ძირიდან. თანდათან ეს სვეტი მანტიის ზედა ფენებს აღწევს. ზევით იგი ფართოვდება

და ქმნის „სოკოს ფორმის“ თავსახურს. დროთა განმავლობაში, პლუმი თხელი ხდება და იწყებს ცალკეულ ნაწილებად დაშლას. დიაგრამაზე ფერები მიუთითებს ტემპერატურაზე: წითელი და ნარინჯისფერი ადგილები ყველაზე ცხელია, ლურჯი უფრო ცივი.

წყარო: Dannberg, J., Sobolev, S. დაბალი ტენიანობის თერმოქიმიური ბუმბული წყვეტს კლასიკური მანტიის ბუმბულის კონცეფციის დაპირისპირებას. Nat Commun 6, 6960 (2015).

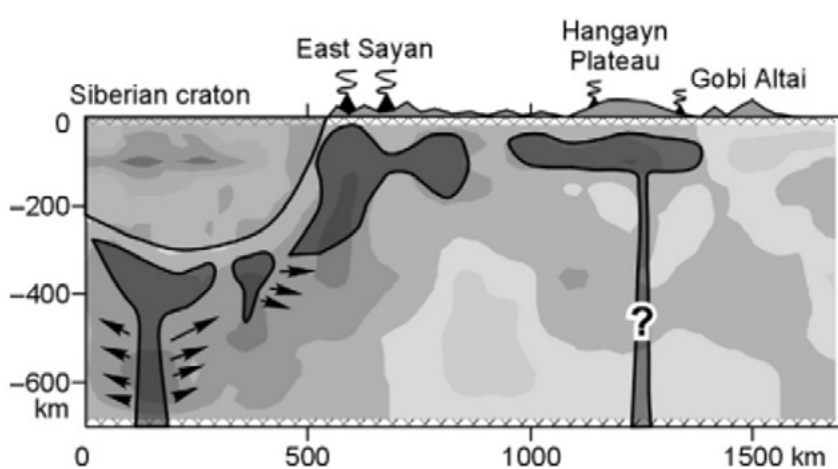
<https://doi.org/10.1038/ncomms7960>

კვლევის მონაცემების მიხედვით, როდესაც პლუმი უახლოვდება ლითოსფეროს, მისი რადიუსი გაორმაგდება, როდესაც მიედინება და ასვლის სიჩქარე მნიშვნელოვნად მცირდება.³⁹ სუსტ ადგილებში, მეორადი პლუმი იქმნება - ზედა მაგმატური კამერები დედამიწის ქერქში. ასეთი კამერები არსებობს, მაგალითად, Yellowstone, Campi Flegrei და სხვა სუპერვულკანების ქვეშ. ეს კამერები არის ადგილები, სადაც შეიძლება მოხდეს ქერქის რღვევები და მასიური მაგმის ამოფრქვევები.

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ, არსებული წარმოდგენების თანახმად, პლუმის ზედაპირზე ამოსვლას შეიძლება ათობით მილიონი წელი დასჭირდეს. თუმცა ეს მონაცემები თეორიულ გამოთვლებს ეფუძნება, გეოდინამიკური პროცესების თანამედროვე ესკალაციის პრაქტიკული დაკვირვებები კი პირიქით მიუთითებს. ციმბირში მიმდინარე პროცესებზე დაკვირვება მიუთითებს, რომ პლუმის აწევა შეიძლება მოხდეს რამდენიმე ათწლეულში.

ლიტერატურულ მონაცემებზე დაყრდნობით⁴⁰, ცნობილია, რომ მსგავსი მაგმატური სუპერპლუმი, რამაც გამოიწვია მრავალი ბაზალტის ამოფრქვევა ევრაზიაში (ციმბირში) პერმისა და ტრიასული პერიოდის საზღვარზე (250 მილიონი წლის წინ), ჰქონდა შემდეგი ზომები: დასავლეთიდან აღმოსავლეთისკენ 4000 კმ და ჩრდილოეთიდან სამხრეთისკენ 3000 კმ. ვარაუდობენ, რომ პლუმის თავის დიამეტრი 1000-დან 2000 კმ-მდე იყო.

ცნობილია, რომ დასავლეთ ციმბირის ფილა უფრო ახალგაზრდა და თხელია, 35-40 კმ სისქით. აღმოსავლეთ ციმბირის პლატფორმა, პირიქით, ძველი და სქელია, უფრო ცივი, 40-45 კმ სისქით. მას ციმბირის კრატონს უწოდებენ. სეისმური ტომოგრაფიის მონაცემებით, მეცნიერები ვარაუდობენ⁴¹, რომ აღმოსავლეთ ციმბირის პლატფორმის სამხრეთ ბოლოში ამჟამად შეიმჩნევა მცირე მაგმის კამერები, რომლებიც ვრცელდება ციმბირის კრატონის ქვეშ (სურ. 36), იმის გამო, რომ ფირფიტა უფრო ცივია.



ნახ.36.

ციმბირის კრატონის გარშემო მცირე მაგმა კამერების ნაკადის სქემატური წარმოდგენა

წყარო: Kulakov I. Yu. ზედა მანტიის სტრუქტურა სამხრეთ ციმბირისა და მონღოლეთის ქვეშ, რეგიონალური სეისმური ტომოგრაფიის საფუძველზე // გეოლოგია და გეოფიზიკა. 2008. ტ. 49. No 3. გვ 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.

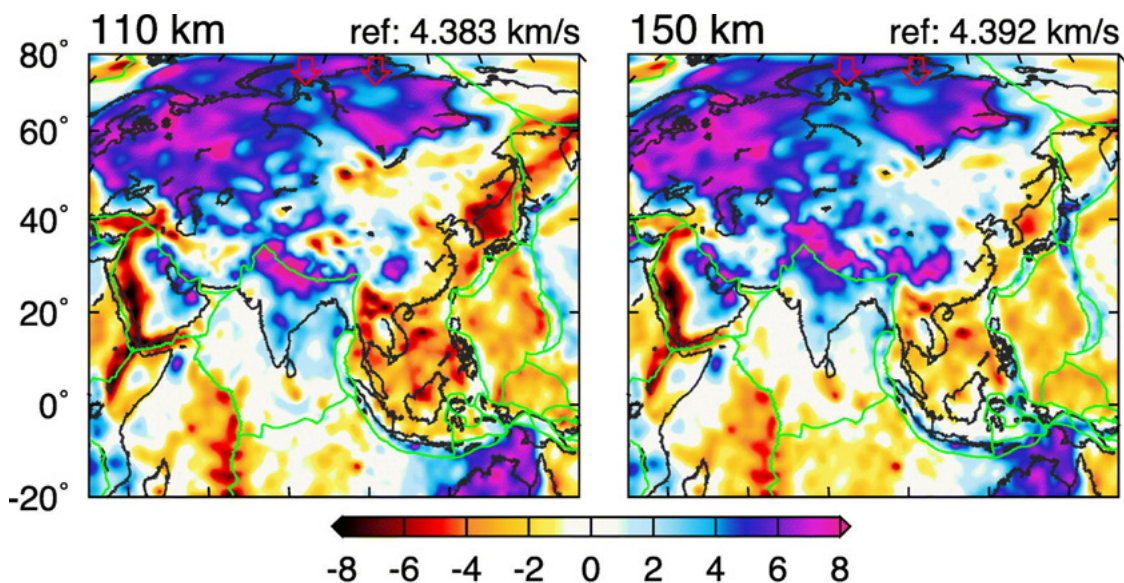
⁴¹Kulakov, I. Y. (2008). Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia from regional seismic tomography. *Russian Geology and Geophysics*, 49(3), 187-196.

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

ჰიპოთეზის თანახმად, ამ დროისთვის თანამედროვე ციმბირის პლუმი ვრცელდება აღმოსავლეთ ციმბირის პლატოფორმის ძირის ქვეშ და ნაწილობრივ დასავლეთ ციმბირის ფირფიტის ქვეშ. გავრცელება შეიძლება მოხდეს, ლიტერატურული მონაცემებით, 50-60 კმ სიღრმეზე, ხოლო პლუმის ფეხი, სავარაუდოდ, ყველაზე მკაფიოდ შეინიშნება 100 კმ სიღრმეზე. მეორადი პლუმის განლაგება ალბათ უკვე ხდება 40 კმ სიღრმეზე.

ზოგიერთი სეისმური ტომოგრაფიული მოდელი აჩვენებს დაბალი სიჩქარის ანომალიებს⁴² (უფრო თხევადი გარემო)

110-150 კმ სიღრმეზე, რაც შეესაბამება უფრო თხევად გარემოს გიდანისა და ტაიმირის ნახევარკუნძულების სამხრეთით მიწისქვეშეთში (ნახ. 37). ეს ჩანს სიჩქარის რუკებზე, 2024 წლის აგვისტოში გამოქვეყნებული ნაშრომის მიხედვით. ეს ანომალიები, სავარაუდოდ, შეიძლება ასოცირებული იყოს მაგმატური მასალის ორ ნაკადთან, ანუ პლუმის კუდებთან (ნახ. 38). თუ ეს მოდელი სწორია, მაშინ თითოეული კუდის დიამეტრი, რომელიც ამოდის აღმოსავლეთ ციმბირის კრატონის ქვეშ, არის დაახლოებით 600-700 კმ.



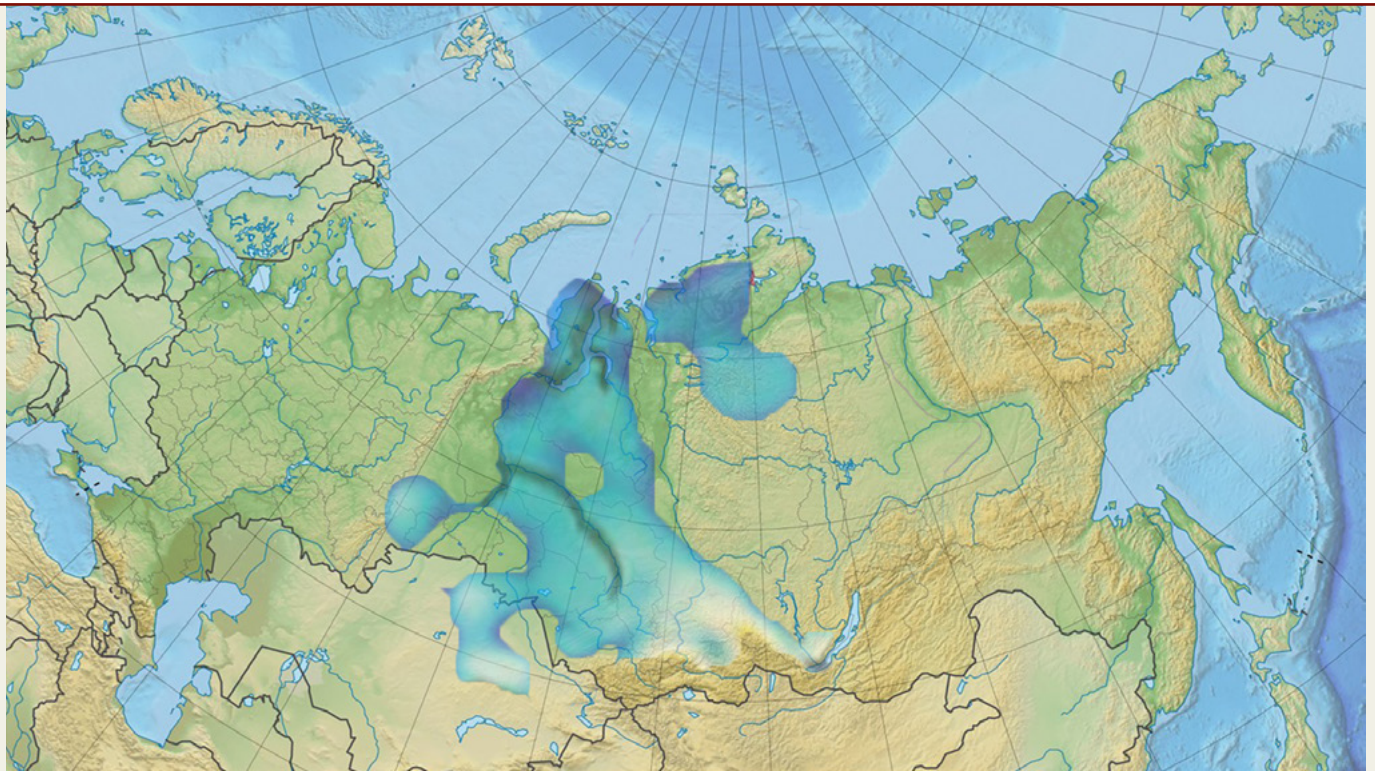
ნახ.37.

რუკა გვიჩვენებს აკუსტიკური ტალღების გავრცელების სწრაფ სიჩქარეს მეწამულში (მყარი ქანების მეშვეობით) და ნელი სიჩქარე ლურჯში (უფრო თხევადი, გამდნარი ნივთიერება). შემცირებული სეისმური ტალღების სიჩქარის ანომალიები, რომლებიც შეესაბამება უფრო თხევადი მანტიის მასალის ზონებს, აღინიშნება ორი წითელი ისრით.

წყარო: Dou H., Xu Y., Lebedev S., Chagas de Melo B., van der Hilst R.D., Wang B., Wang W. ზედა მანტია აზიის ქვეშ სეისმური ტომოგრაფიიდან, ტექტონიკის, სეისმურობის და მაგმატიზმის მექანიზმების დასკვნებით // Earth-Science Reviews. 2024. ტ. 255. გვ 104841.

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

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

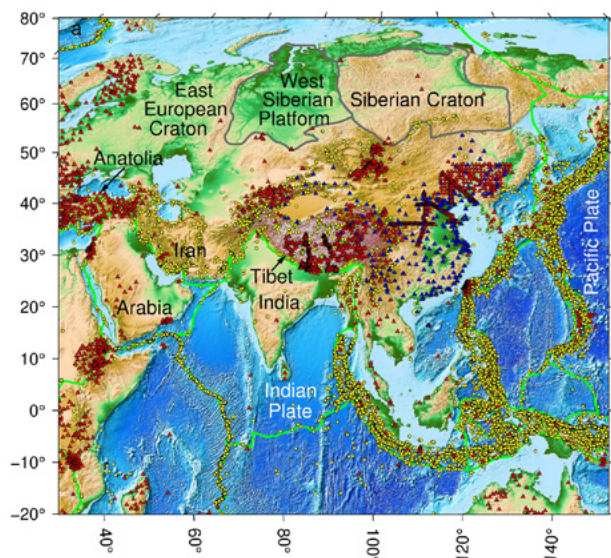


ნახ.38.

დაბალი სეისმური სიჩქარის ანომალიები იყო გამოსახული და ადაპტირებული რუსეთის ფიზიკურ რუკაზე, დოუ და სხვების მიხედვით, 2024 წ.

თუმცა, მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ნაშრომში წარმოდგენილი ციმბირის სეისმური ტომოგრაფიული ანალიზი (Dou et al., 2024) გამოიყენა 10-ზე ნაკლები სეისმური სენსორის მონაცემები (ნახ.39), რომლებიც განლაგებულია ფირფიტების საზღვრებთან და პრაქტიკულად არ არსებობს დასავლეთ

და აღმოსავლეთ ციმბირში. ანალიზში გამოყენებულია ყველა საჯაროდ ხელმისაწვდომი ფართოზოლოვანი მიწისძვრის მონაცემები 1994 წლიდან 2023 წლის 4 სექტემბრამდე. შედარებისთვის, რუკაზე ნაჩვენებია აზიის ანალიზში გამოყენებული სენსორები, რომლებიც მონიშნულია წითელი სამკუთხედებით.



ნახ.39.

სეისმურ ტომოგრაფიულ ანალიზში გამოყენებული სენსორების (წითელი სამკუთხედების) მდებარეობა.

წყარო: Dou H., Xu Y., Lebedev S., Chagas de Melo B., van der Hilst R.D., Wang B., Wang W. ზედა მანტია აზიის ქვეშ სეისმური ტომოგრაფიიდან, ტექტონიკის, სეისმურობის და მაგმატიზმის მექანიზმების დასკვნებით // Earth-Science Reviews. 2024. ტ. 247. P. 104595. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>

ჩინელი მეცნიერების მიერ 2023 წელს ჩატარებული კიდევ ერთი კვლევა ადასტურებს, რომ ქერქი ციმბირის ქვეშ ახლა დნება და თხელდება მაგმის გავლენის ქვეშ⁴³ (სურ. 40). ეს პროცესი პროგრესირებს და ამცირებს ფილის სიმტკიცეს. ამ ნაშრომში ავტორები წარმოადგენენ მანტიის ელექტრული გამტარობის მოდელს ჩრდილოეთ აზიისთვის, რომელიც აგებულია გეომაგნიტური მონაცემების საფუძველზე. მოდელი აჩვენებს დიდ ანომალიას მაღალი ელექტრული გამტარობით, რომელიც მდებარეობდა მანტიის გარდამავალ ზონაში ციმბირის ბილიკების ქვეშ მათი ამოფრქვევის დროს. მეცნიერებმა ის განმარტეს, როგორც თერმული ანომალია დნობის კვალით არსებული პერმის ანომალიის მიდამოში (სურ.41).

ზოგადად, სეისმური ტომოგრაფიული მოდელები, რომლებიც იკვლევენ 40-დან 110 კმ-მდე სიღრმეებს აღმოსავლეთ ციმბირის კრატონის რეგიონში, აჩვენებს

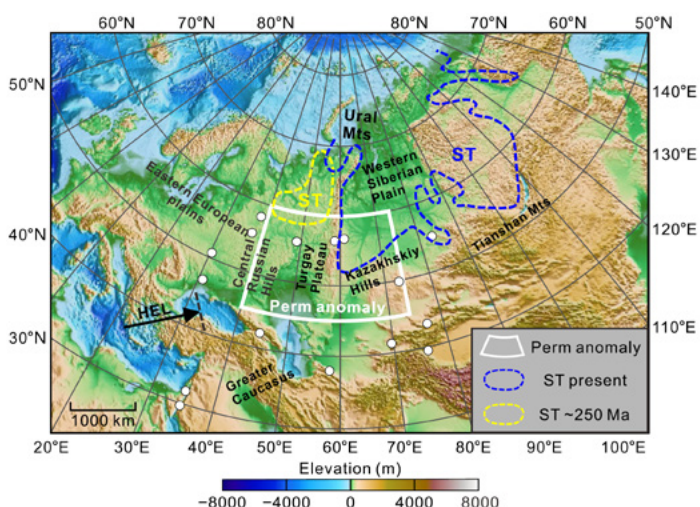
შედეგებს, რომლებიც განსხვავდება ერთმანეთისგან. ამავდროულად, ციმბირის ტერიტორიისთვის აშკარაა სეისმოლოგიური მონაცემების ნაკლებობა ზუსტი მოდელების ასაგებად.

თანამედროვე ტომოგრაფიული მოდელები აგებულია სეისმური მონაცემების საფუძველზე, რომლებიც შეგროვებულია დიდი ხნის განმავლობაში - დაახლოებით 30 წლის განმავლობაში. მანტიის პლუმის განვითარების შესახებ კლასიკური იდეების თვალსაზრისით, რომელიც მილიონობით წელიწადს გრძელდება, 30-წლიანი პერიოდი უკიდურესად მოკლედ ითვლება. თუმცა, არსებული მონაცემები მიუთითებს, რომ სწორედ ამ პერიოდში მოხდა ძირითადი ცვლილებები ციმბირის პლუმის სტრუქტურაში. ეს დაკვირვებები განაპირობებს მანტიის პლუმის განვითარების ტემპისა და მათი შესწავლის მეთოდების შესახებ არსებული იდეების გადახედვის აუცილებლობის გააზრებას.

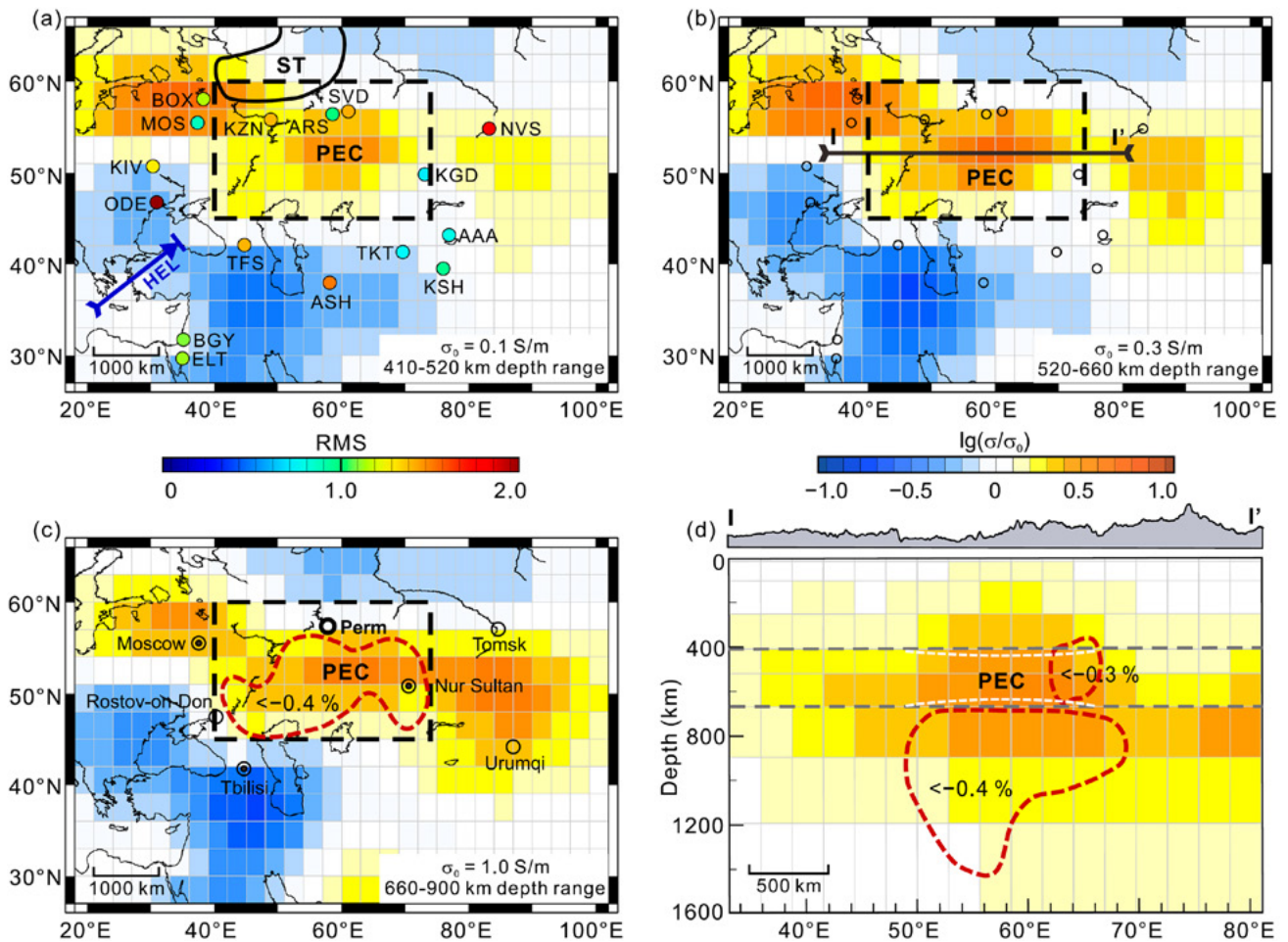
ნახ.40.

თეთრი წერტილები წარმოადგენს სადგურებს, რომელთა C- პასუხები გამოიყენება ამ კვლევაში. პერმის ანომალიის დიაპაზონი ნაჩვენებია თეთრი ხაზებით გამოკვეთილი ზონით. ციმბირის ბილიკების ამჟამინდელი (ლურჯი) და წარსული (ყვითელი) ადგილები მითითებულია წერტილოვანი ხაზებით.

წყარო: Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). ციმბირის ბილიკების მიერ წარმოქმნილი გვიანდელი პერმის სუპერპლუმის ნარჩენი, რომელიც დასკვნაა გეომაგნიტური მონაცემებიდან. *Nature Communications*, 14, 1311 წ. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37053-3>



⁴³ 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>



ნახ.41.

ჯილინის უნივერსიტეტისა და შიჯიაჟუანგ ტიედაოს უნივერსიტეტის მეცნიერებმა გამოიყენეს გეომაგნიტური ველის მონაცემები ჩრდილოეთ აზიის 16 სადგურიდან, რათა გამოთვალონ მანტიის ელექტრული გამტარობა სხვადასხვა სიღრმეზე. მათ აღმოაჩინეს გამტარობის მკვეთრი ზრდა გლობალურ საშუალო გამტარობასთან შედარებით ციმბირის ბილიკების ქვეშ რეგიონში (მოყვითალო-ყავისფერი უბნები ფიგურებში). მეცნიერებმა დაადგინეს, რომ ეს ადგილები 400-დან 900 კმ-მდე სიღრმეზე

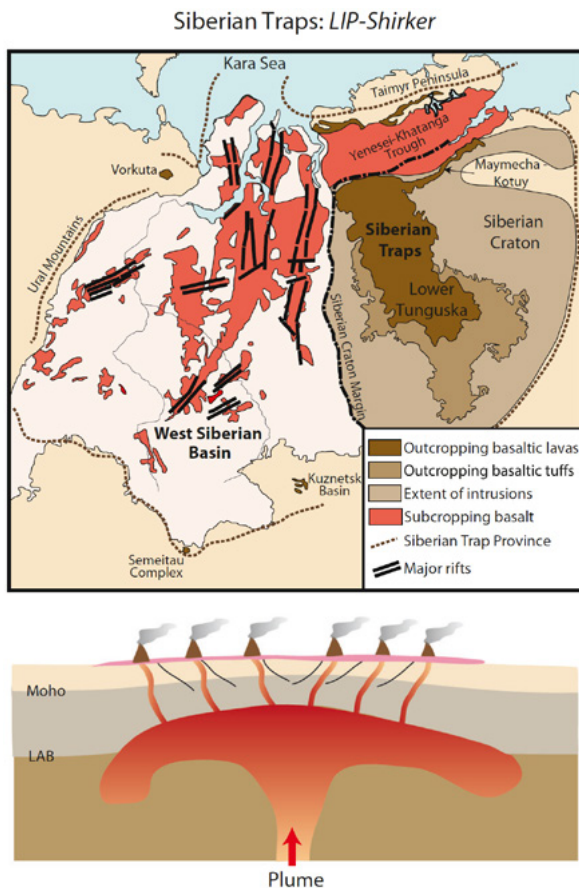
საშუალოდ 250 გრადუსით უფრო ცხელია, ვიდრე მიმდებარე მანტია. ეს ადგილები შეიცავს გამდნარი მანტიის ნაწილს.

წყარო: Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). ციმბირის ხაფანგების მიერ წარმოქმნილი გვიანდელი პერმის სუპერპლუმის ნარჩენი, რომელიც დასკვნაა გეომაგნიტური მონაცემებიდან. *Nature Communications*, 14, 1311 წ.

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

აღსანიშნავია, რომ წინა გადმოღვრა 250 მილიონი წლის წინ (პერმისა და ტრიასული პერიოდის მიჯნაზე) ასევე მოხდა იმავე რეგიონში. ეპიცენტრი მდებარეობდა აღმოსავლეთ ციმბირის

კრატონის ქვეშ (პუტარანას პლატოს ქვეშ) და ამოფრქვევები მოხდა მთელს დასავლეთ და აღმოსავლეთ ციმბირში (სურ. 42).



ნახ.42.

ციმბირის ბილიკები, როგორც დიდი ცეცხლგამძლე პროვინციის მაგალითი. რუკაზე ნაჩვენებია ამოფრქვევები დასავლეთ ციმბირში (წითელი) და ბილიკები აღმოსავლეთ ციმბირში (ყავისფერი), რომელიც ამოიფრქვა 250 მილიონი წლის წინ. მანტიის პლუმის ცხელი მასალა ამოდის და ვრცელდება ლითოსფეროსა და ასთენოსფეროს საზღვრებს ქვემოთ, ქმნის სოკოს ფორმის სტრუქტურას. ამან გამოიწვია ფართომასშტაბიანი მაგმატური აქტივობა დაახლოებით 5 მილიონი კმ² ფართობზე. პლუმის ზემოქმედების შედეგად ჩამოყალიბდა დასავლეთ ციმბირის რიფტის სისტემა, რომლის აქტივობა შეწყდა დაახლოებით 10 მილიონი წლის შემდეგ შუა ტრიასში.

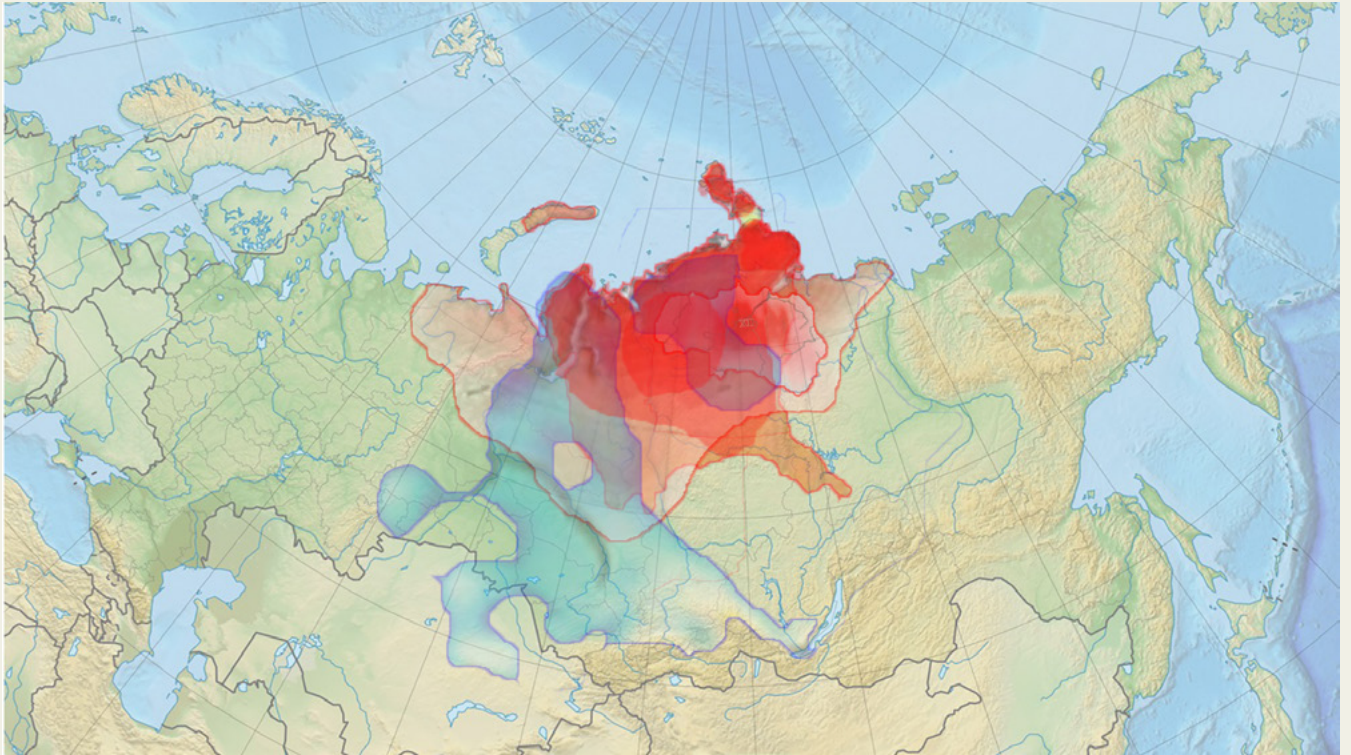
წყარო: Koptev, A., Cloetingh, S. დიდი ცეცხლმოკიდებული პროვინციების როლი კონტინენტურ დაშლაში, რომელიც განსხვავდება „შირკერიდან“ „პროდიუსერამდე“. Commun Earth Environ 5, 27 (2024).

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

მაგმატური პლუმის ლოკალიზაცია

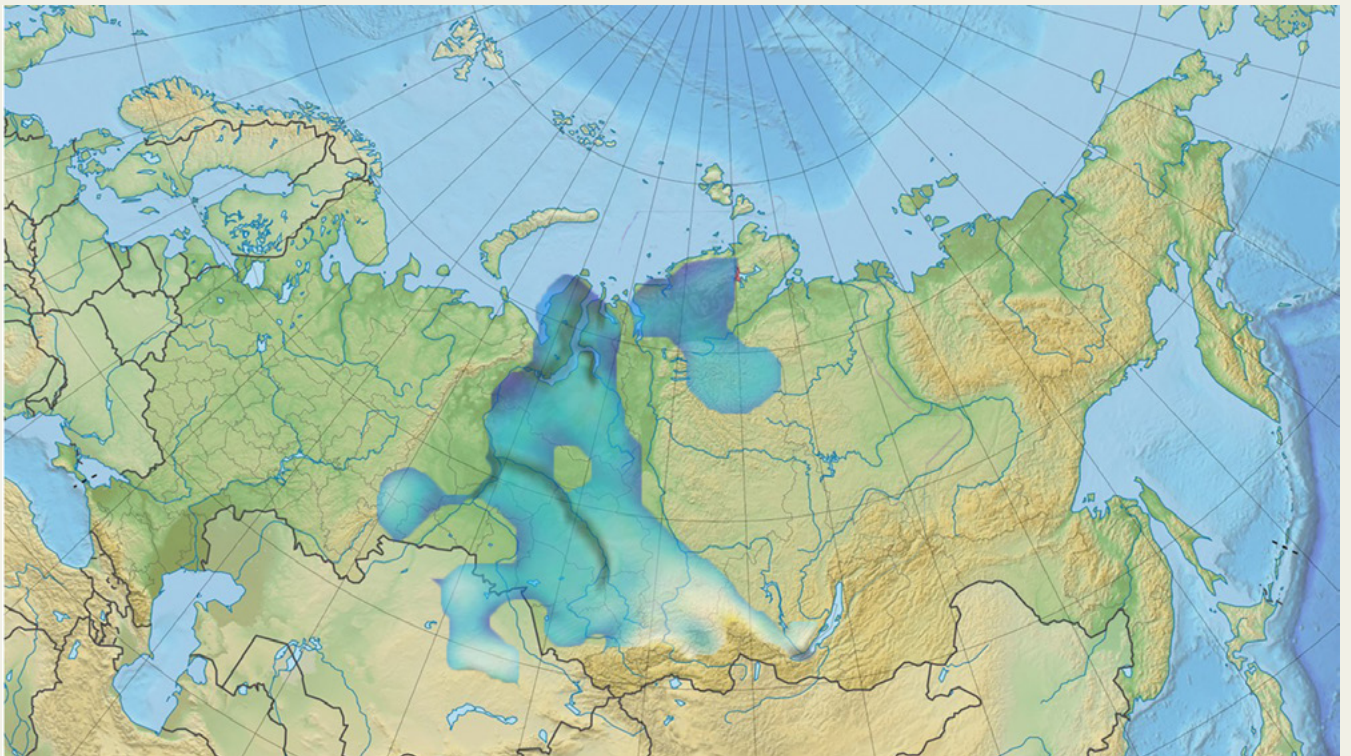
თუ განვაზოგადებთ ნიადაგის ტემპერატურის ანომალიების, მუდმივი ყინვის დნობის სიღრმის, ზედაპირის ტემპერატურის, მანტიის დაბალი სეისმური სიჩქარის ანომალიების

და მაგნიტური ანომალიების შესახებ მონაცემების ზემოხსენებულ ანალიზს, ეს საშუალებას მოგვცემს განვსაზღვროთ პლუმის ამჟამინდელ პოზიციას და ზომას (ნახ. 43).

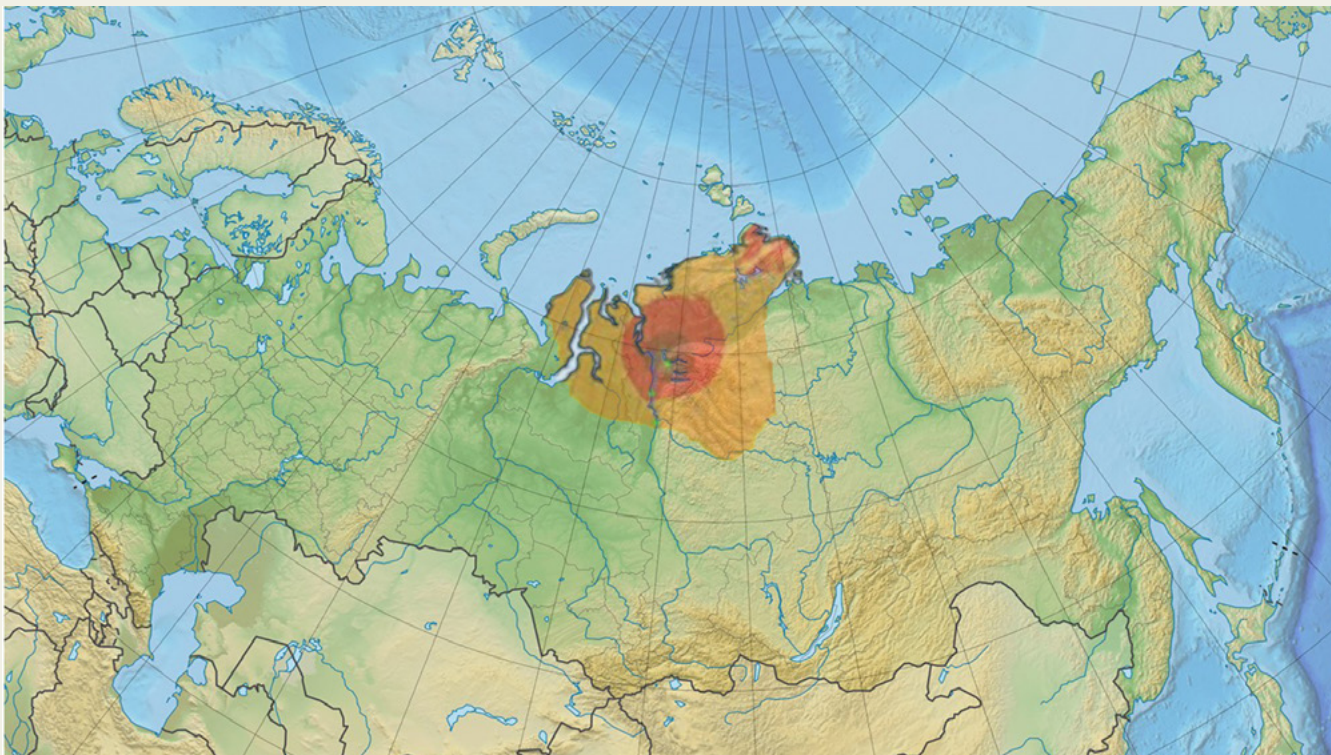


ნახ.43.

ა. რუკა ძირითადი ანომალიების სუპერპოზიციით სხვადასხვა პარამეტრების მიხედვით, რომლებიც



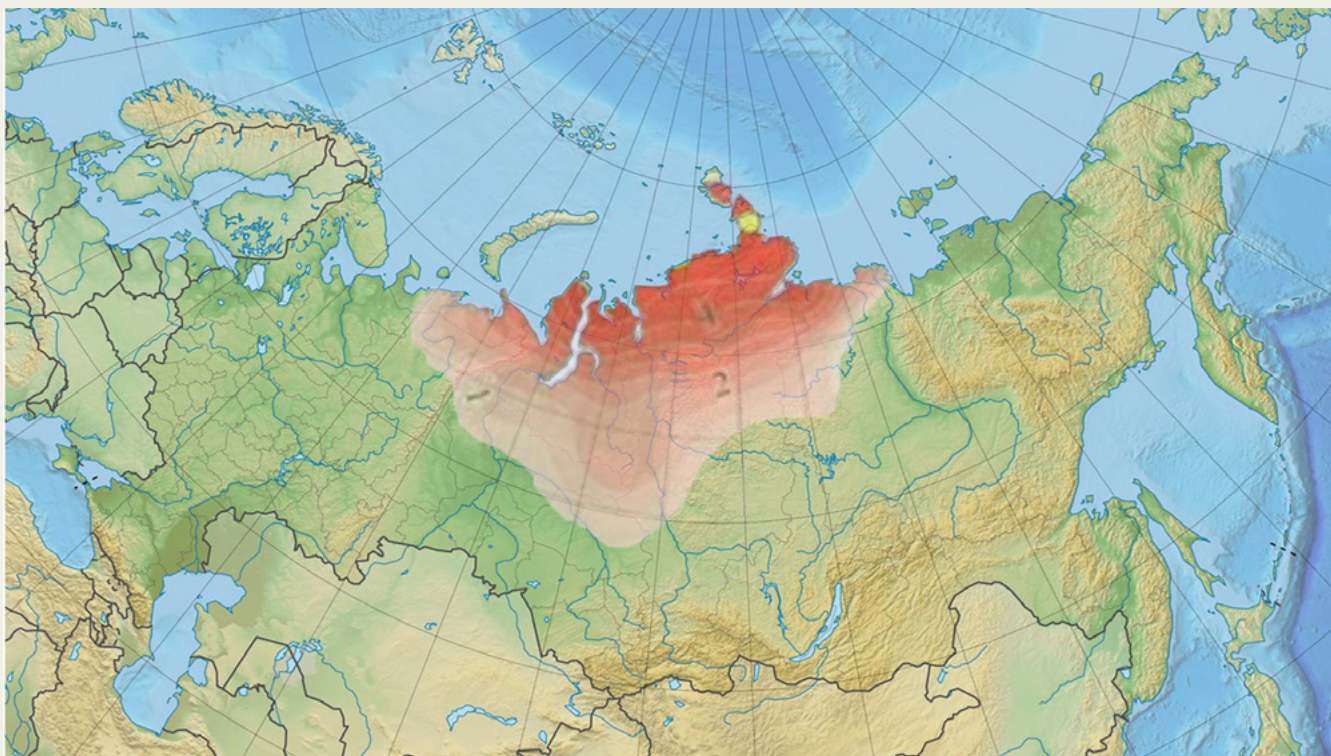
ბ. ქვედა სიჩქარის (მეტი სითხის) ანომალიების რუკა სეისმური ტომოგრაფიიდან 110 კმ სიღრმეზე, შემდეგ Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023)



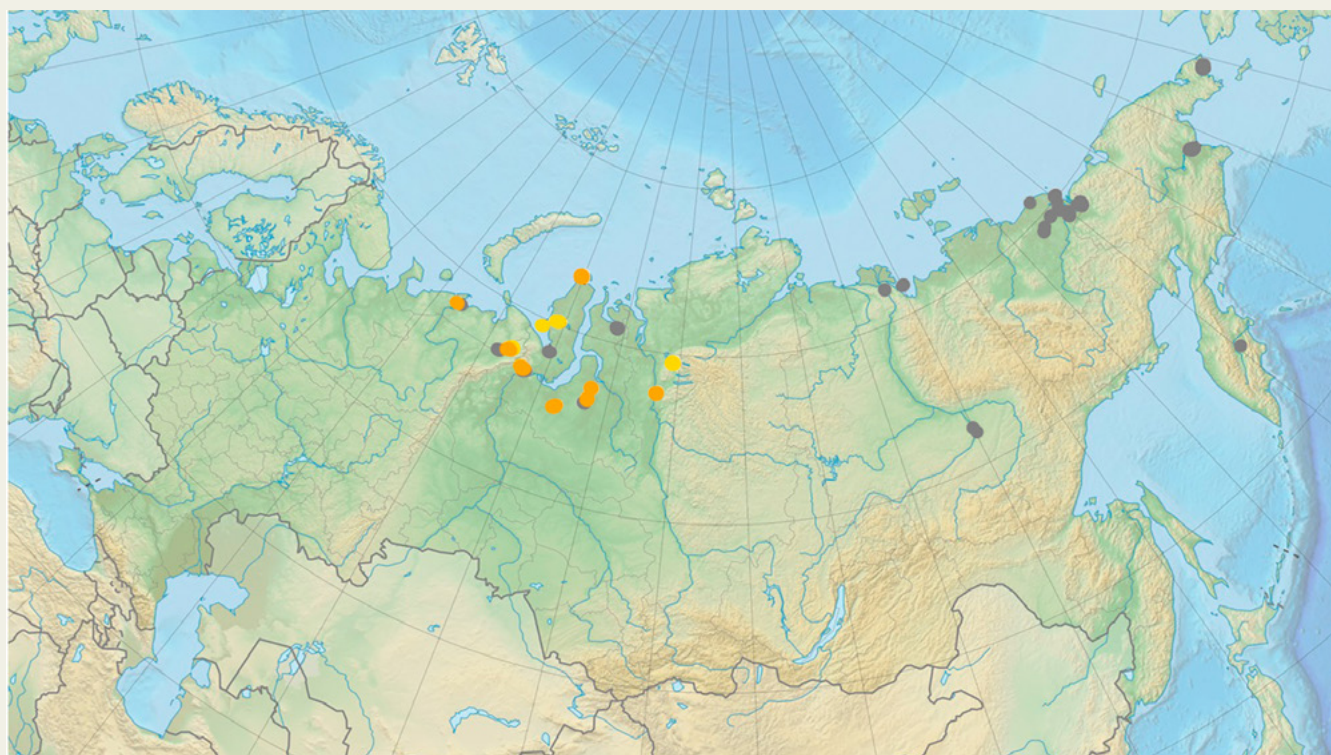
V. ნიადაგის გაცხელების აბსოლუტური ანომალია 1976–2021 და 1976–2023 წლების ტენდენციების შედარებისას. Roshydromet-ის მიხედვით (2021, 2023)



G. ჰაერის საშუალო თვიური ტემპერატურის ტენდენცია 2001–2021 წლის იანვრისთვის, შერსტიუკოვის მიხედვით (2023)



D. საშუალო თვიური ტემპერატურა 2023 წლის დეკემბრიდან 2024 წლის თებერვლამდე, Roshydromet-ის მიხედვით, (2024)



E. მუდმივი ყინვის ფენის სეზონური დათბობის სიღრმის მზარდი ადგილები. მონაცემთა წყარო: <https://permafrost.su/>

ჰიპოთეზის მიხედვით, პლუმის აღმავალი ნაწილი მდებარეობს გიდანისა და ტაიმირის ნახევარკუნძულების სამხრეთით და აქვს რამდენიმე განშტოება. პლუმის თავის დიამეტრი შეფასებულია 1200–1500 კმ-ზე, ხოლო მაგმატური ნაკადების გავრცელების ზონა შეიძლება მიაღწიოს 2500–3000 კმ-ს. ეს რეგიონი მოიცავს დასავლეთ ციმბირის ფილის და აღმოსავლეთ ციმბირის კრატონის ტექტონიკურ სტრუქტურებს. ამჟამად, პლუმის თავი გავლენას ახდენს აღმოსავლეთ ციმბირის კრატონის ბაზაზე, ავრცელებს მაგმატურ ნაკადებს მის ტერიტორიაზე. ეს პროცესი, ალბათ,

გავლენას ახდენს სეისმური აქტივობის ზრდაზე ფირფიტის ზღვრული ნაწილების მიდამოში, მაგალითად, ბაიკალის ზონაში და ურალის ზონაშიც კი. ფირფიტების ზღვრულ ნაწილებში ასეთი ანომალიების მიზეზი არის ფირფიტების დესტაბილიზაცია ქვემდებარე ასტენოსფეროს დარბილების და დედამიწის ქერქის ციმბირის ბლოკის ცენტრალური ნაწილის უმნიშვნელო აწევის გამო, ანუ დასავლეთ ციმბირის ფილის ტექტონიკური სტრუქტურები და აღმოსავლეთ ციმბირის ტექტოკჰოტოტონურ სისტემასთან ერთად.

გაზრდილი სეისმური აქტივობა, როგორც ფირფიტის დესტაბილიზაციის ნიშანი ციმბირის

სეისმური აქტივობის ანალიზის მეთოდოლოგია მოიცავდა საერთაშორისო სეისმოლოგიური ცენტრის (ISC) ვებგვერდიდან მიღებული მონაცემების ჩამოტვირთვასა და სპეციალურ დამუშავებას. ვინაიდან მონაცემები შეიცავს სხვადასხვა წყაროს სხვადასხვა ქვეყნიდან და კვლევითი ინსტიტუტიდან, ასევე სხვადასხვა სიდიდის ტიპებს (Mw, Ms, Mb, ML, MD და ა.შ.), შესრულდა მონაცემთა დამუშავების კონკრეტული ალგორითმი სხვადასხვა წყაროდან შესაბამისი სიდიდის ტიპის შესარჩევად (იხ. დანართი 1). დამუშავების ალგორითმის ძირითადი იდეა იყო მედიანური მნიშვნელობის არჩევა ყველაზე გავრცელებულ სიდიდის ტიპებს შორის თითოეული მოვლენისთვის, რადგან სხვადასხვა წყაროები აცნობებდნენ სხვადასხვა სიდიდის ტიპებს და მნიშვნელობებს ISC მონაცემთა ბაზაში თითოეული მოვლენისთვის. ეს დამუშავება

საშუალოდ იწვევს სიდიდის მცირე შემცირებას მაქსიმალურ გადაცემასთან შედარებით, მაგრამ გამოცდილებამ აჩვენა, რომ მედიანა ალგორითმი უზრუნველყოფს გუტენბერგ-რიხტერის კანონის და სხვა კანონზომიერებების ადეკვატურ ქცევას და საკმაოდ კარგად ეთანხმება სხვა სეისმოლოგიური მონაცემთა ბაზების მონაცემებს, როგორიცაა IRIS და USGS.

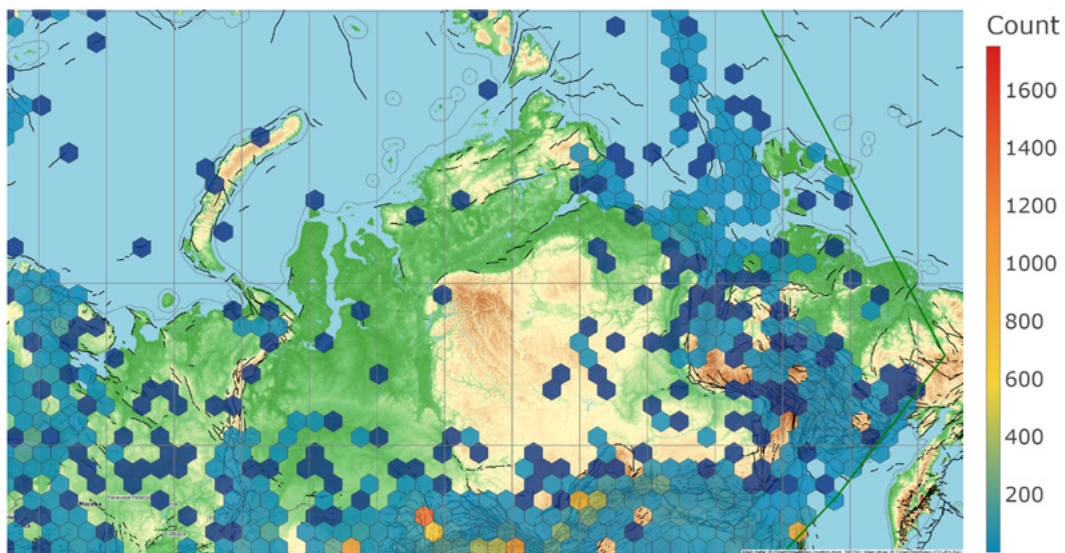
ალგორითმის მეშვეობით მიღებული მონაცემები გაფილტრული იყო მოვლენების ტიპების მიხედვით ISC მონაცემთა ბაზაში (იხ. დანართი 1), რათა გამოირიცხოს სამთო ოპერაციების დროს ადამიანის საქმიანობით გამოწვეული მოვლენები: აფეთქებები, სავარაუდო აფეთქებები, ქანების აფეთქებები და ა.შ. ასევე, რადგან რუსეთში ბევრი სამთო საწარმოა, ISC მონაცემთა ბაზა შეადარეს რუსეთის მეცნიერებათა აკადემიის

ერთიანი გეოფიზიკური სამსახურის მონაცემებს⁴⁴ 2025 წლის იანვრისთვის, რაც მიუთითებს რუსეთში ყველა ცნობილ აფეთქებებსა და ქანების აფეთქებაზე. ეს მოვლენები ასევე გამოირიცხა იმის უზრუნველსაყოფად, რომ აფეთქებებთან შესაბამისი მოვლენები არ დარჩენილა მიღებულ მონაცემებში.

განვიხილოთ მონაცემების ანალიზის შედეგები მაგმატური პლუმის და დიდი ტექტონიკური ბლოკების ზღვრული ნაწილების აწევის რეგიონში, რომლებზეც მას აქვს პირდაპირი გავლენა. ვინაიდან ციმბირის კრატონი შედარებით სტაბილურ სეისმურ პლატფორმად ითვლება, მის საზღვრებში მიწისძვრების მცირე რაოდენობის შემთხვევაც კი ანომალია იქნება.

ნახ. 44 გვიჩვენებს მიწისძვრების გავრცელების სიმკვრივეს რუსეთში. ციმბირის რეგიონში მიწისძვრების უდიდესი კონცენტრაცია ბუნებრივად შეინიშნება დაკეცილ ადგილებში: აღმოსავლეთით ვერხოიანსკის ქედი, ჩრდილოეთით გაკელის ქედი, დასავლეთით ურალის მთები და სამხრეთით ალტაი-საიანის რეგიონი. იზოლირებული მოვლენები ასევე გვხვდება თავად ციმბირში: რამდენიმე მიწისძვრა დაფიქსირდა დაახლოებით 4.0 მაგნიტუდის სიმძლავრით ტაიმირის ნახევარკუნძულის სამხრეთით. მოდით უფრო დეტალურად განვიხილოთ მიწისძვრების დინამიკა ადგილობრივ რაიონებში ციმბირის პლუმის რეგიონში და მიმდებარე რაიონებში.

ციმბირში M3+ მაგნიტუდის მიწისძვრების სიმკვრივე



Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728bc7324b

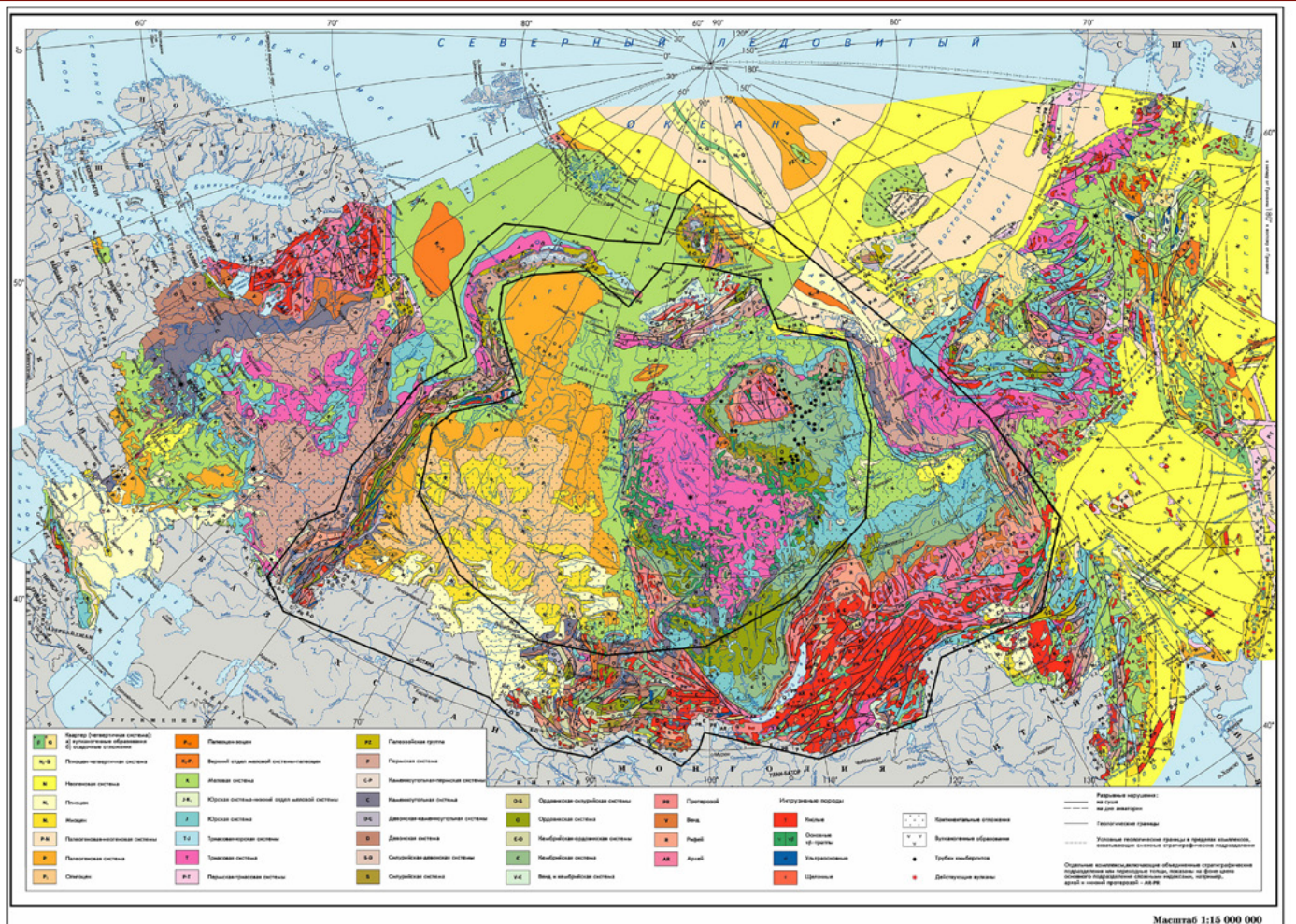
ნახ.44.
3.0 მაგნიტუდის მიწისძვრების სიმჭიდროვე ციმბირში 1990 წლიდან 2024

წყარო. მონაცემთა ბაზა: ISC

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

გეოლოგიური სტრუქტურებიდან გამომდინარე, გამოვლინდა ტერიტორიები, სადაც მანტიის პლუმს შეიძლება ჰქონდეს განსხვავებული ეფექტი (სურ. 45). შეირჩა თავად პლუმის არე, სადაც ზემოქმედება შეიძლება დაკავშირებული იყოს მაგმისა და სითხის ფაზის (მაგმატური გაზების)

შედგენასა და წნევასთან. აღმოსავლეთ ციმბირის პლატფორმისა და დასავლეთ ციმბირის ფირფიტის ზღვრულ ნაწილებში, პლუმი უფრო მეტად იმოქმედებს სეისმურობაზე, დედამიწის ქერქის მკვრივი ბლოკების პოზიციის დესტაბილიზაციის გამო.



ნახ.45.

გეოლოგიური სტრუქტურების მიერ გამოვლენილი სატესტო ადგილი ციმბირის პლუმის შემოტანისა და გავრცელების არეალში (შიდა შავი საცდელი ადგილი) სეისმურობის ანალიზისთვის. გარე შავი პოლიგონი შეესაბამება ციმბირის პლუმიდ ზეწოლის კიდეების ეფექტებს ფირფიტებზე.

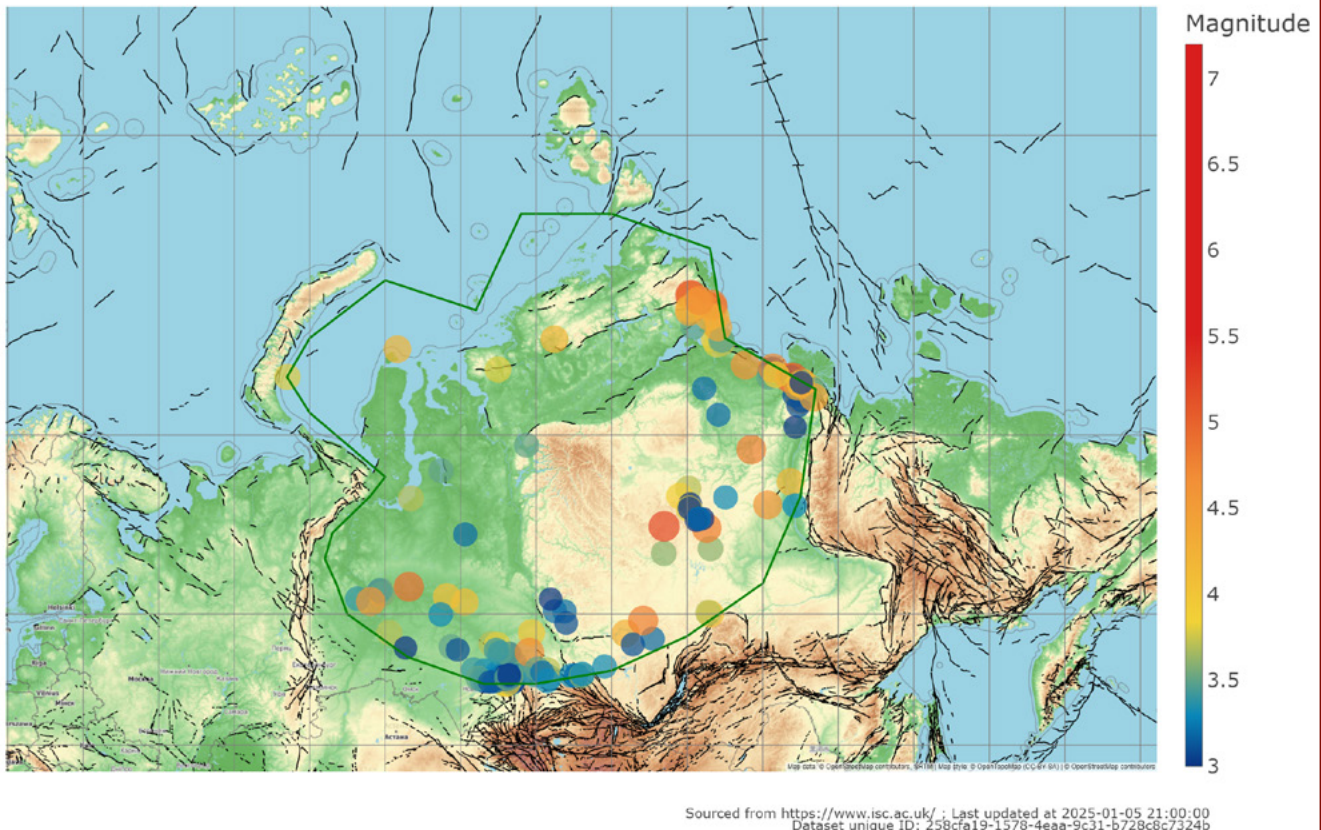
ასე რომ, მოდით შევხედოთ მიწისძვრებს ციმბირის პლუმის ცენტრალურ რეგიონში. ნახ. 46 გვიჩვენებს მიწისძვრების ადგილმდებარეობის რუკას 3.0 და მეტი მაგნიტუდით. მიწისძვრები ფიქსირდება ტაიმირის

ნახევარკუნძულის სამხრეთით. განსაკუთრებით შემაშფოთებულია ის, რომ ახლახან, 2024 წლის აგვისტოსა და სექტემბერში, ამ რეგიონში 3,5 და 3,8 მაგნიტუდის ორი მიწისძვრა მოხდა. მსგავსი მაგნიტუდის მიწისძვრები

დაფიქსირდა გიდანის ნახევარკუნძულის სამხრეთ ნაწილში (M 3.5) და იამალის ნახევარკუნძულზე (M 3.7 და M 4.2) 10 კმ სიღრმეზე. ეს მიწისძვრები დაფიქსირდა

ციმბირის პლუმის თავის ლოკალიზაციის არეალში, რაც საგანგაშო ტენდენციაა, რომელიც მოგვიანებით იქნება განხილული.

M3+ მაგნიტუდის მიწისძვრები ციმბირის პლუმის რეგიონში



ნახ.46.

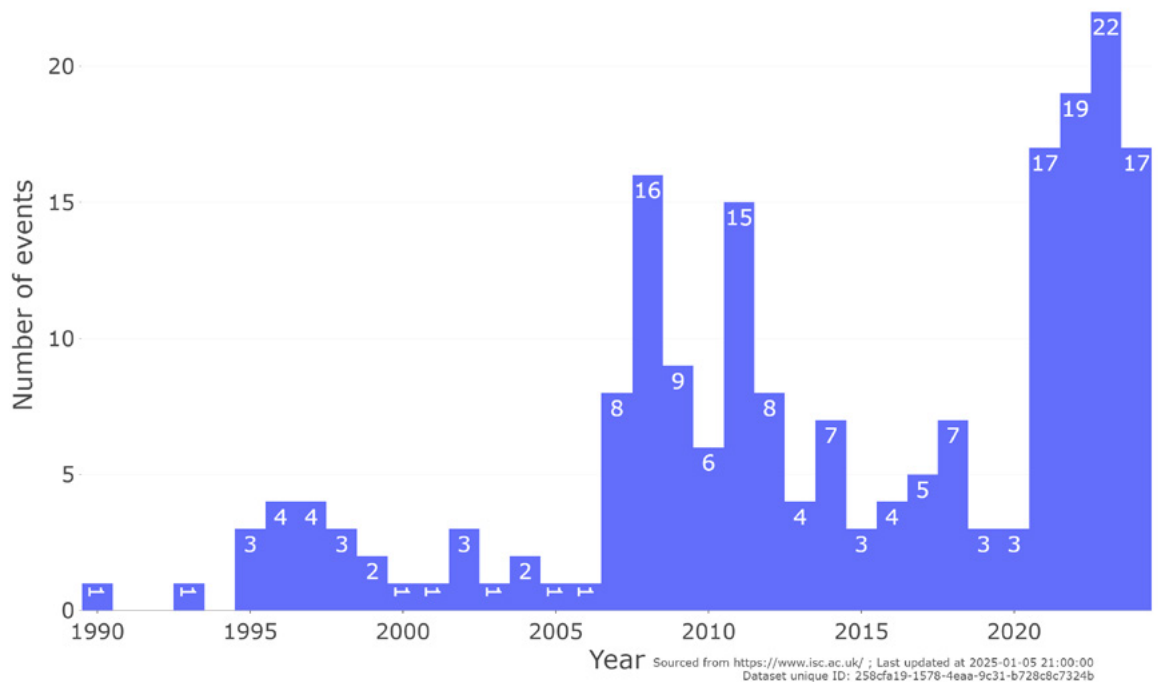
3.0 და მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების რუკა ციმბირის პლუმის რეგიონში 1990 წლიდან 2024

წლამდე. მონაცემთა ბაზა: ISC.

ციმბირის პლუმის ხაზგასმულ არეალში 1990 წლიდან 2024 წლამდე დაფიქსირდა 205 მიწისძვრა 3.0 ან მეტი მაგნიტუდის სიმძლავრით. 1995 წელს დაფიქსირდა მიწისძვრების რაოდენობის ზრდა (ნახ. 47), რაც შეესაბამება 1995 წელს სეისმურობის გაზრდის გლობალურ ტენდენციას, რომელიც დაკავშირებულია მაგმატურ აქტივაციასთან. 2007 წლიდან დაფიქსირდა მიწისძვრების რაოდენობის მნიშვნელოვანი ზრდა სეისმური

აქტივობის თანდათანობითი შემცირებით. 2021 წლიდან მიწისძვრების რაოდენობა კვლავ მკვეთრად გაიზარდა, რაც აღემატება წინა წლიურ მაჩვენებლებს. ამრიგად, ციმბირის პლუმის მიდამოში შეინიშნება სეისმური აქტივობის ტალღის მსგავსი ზრდა. ბოლო წლებში შესამჩნევად მეტი მოვლენა დაფიქსირდა, ვიდრე ადრე იყო ამ ტერიტორიისთვის დამახასიათებელი.

M3+ მაგნიტუდის მიწისძვრები ციმბირის პლუმის რეგიონში



ნახ.47.

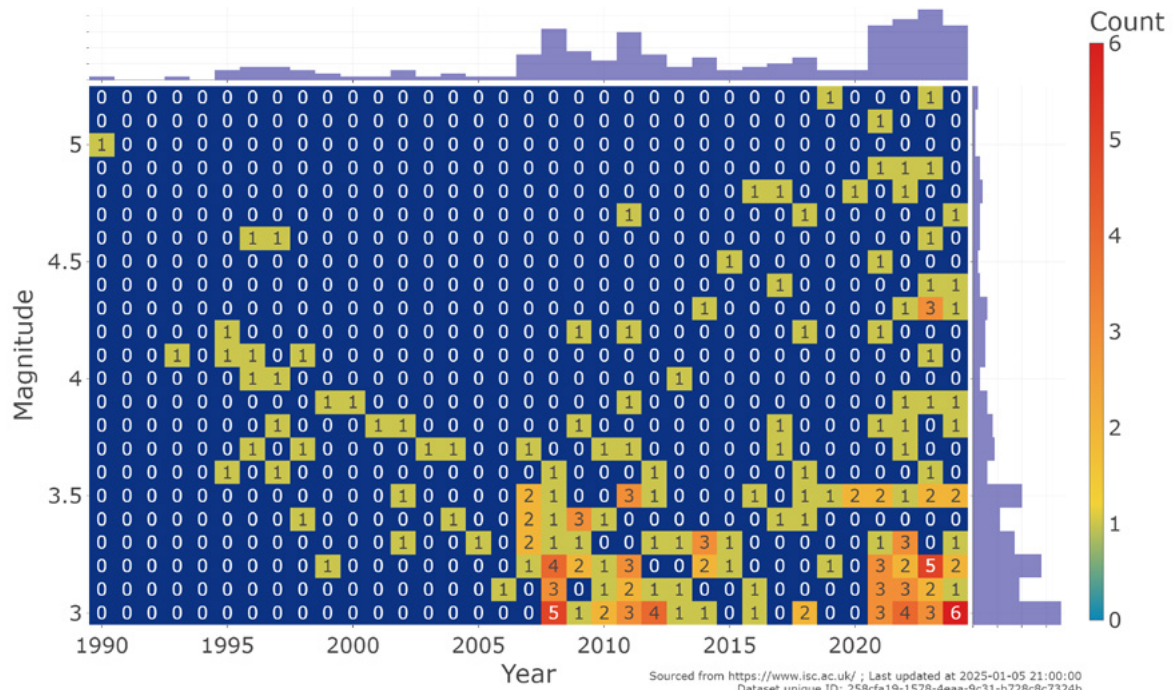
3.0 ან მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების რაოდენობა ციმბირის პლუმის რეგიონში 1990 წლიდან 2024

წლამდე. მონაცემთა ბაზა: ISC

1990 წელს 5.0 მაგნიტუდის მიწისძვრის შემდეგ ადგილი ჰქონდა მიწისძვრების სიმძლავრისა და რაოდენობის თანდათანობით შემცირებას (სურათი 48). 1990 წლიდან 2007 წლამდე დაფიქსირდა მხოლოდ 3 მიწისძვრა 4,5 მაგნიტუდაზე მეტი. 2007 წლიდან შეიმჩნევა მიწისძვრების სიდიდის თანდათანობითი

ზრდა. დაფიქსირებულ ისტორიაში პირველად 2019 წლის შემდეგ მოხდა 5.1 და 5.2 მაგნიტუდის მიწისძვრები. 4.5 ან მეტი მაგნიტუდის მქონე ყველა მიწისძვრა განლაგებულია პლუმის შიგნით (სურ. 49), ზოგიერთი მათგანი შემოიფარგლება სტაბილურ ადგილებში, სადაც არ არის ცნობილი ხარვეზები.

M3+ მაგნიტუდის მიწისძვრები ციმბირის პლუმის რეგიონში

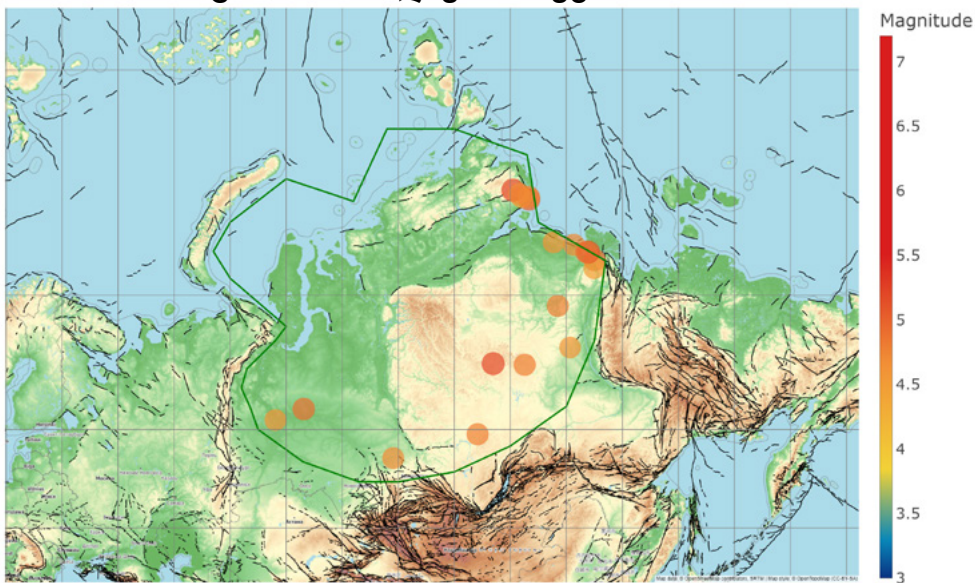


ნახ.48.

1990 წლიდან 2024 წლამდე ციმბირის პლუმის რეგიონში მომხდარი მიწისძვრების განაწილება მაგნიტუდის მიხედვით.

მონაცემთა ბაზა: ISC

M4,5+ მაგნიტუდის მიწისძვრები ციმბირის პლუმის რეგიონში



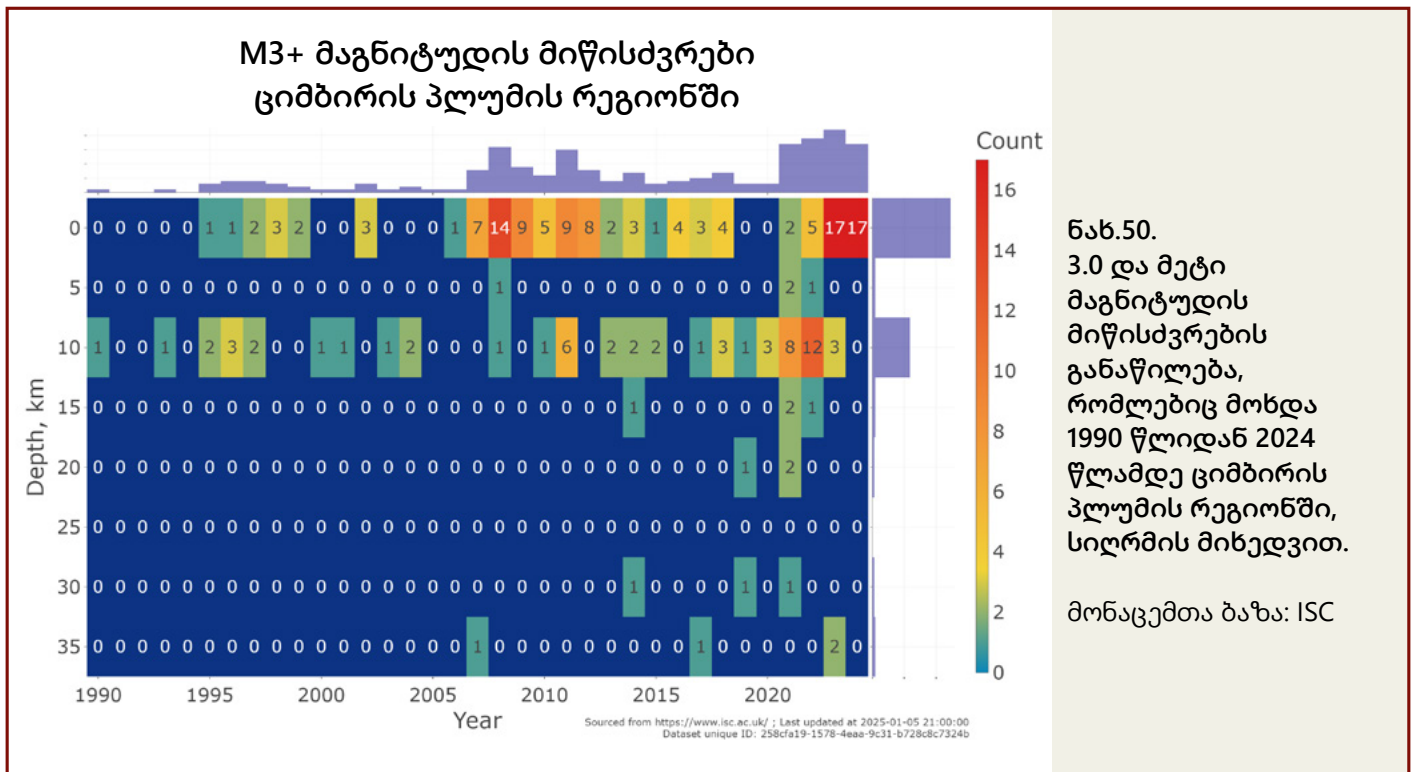
ნახ.49.

4,5დამეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების რუკა ციმბირის პლუმის რეგიონში 1990 წლიდან 2024 წლამდე.

მონაცემთა ბაზა: ISC

ასევე 2007 წელს დაფიქსირდა პირველი 3,7 მაგნიტუდის მიწისძვრა 33 კმ სიღრმეზე მოჰოს საზღვართან (სურ. 50). 2014 წლის შემდეგ, მიწისძვრები დედამიწის ქერქის ფუძის მიდამოში

30–35 კმ სიღრმეზე უფრო ხშირად დაიწყო, მათი მაგნიტუდა 5.0-ს მიაღწია. ყველა მათგანი მდებარეობდა სავარაუდო პლუმის წყაროს პერიფერიაზე.



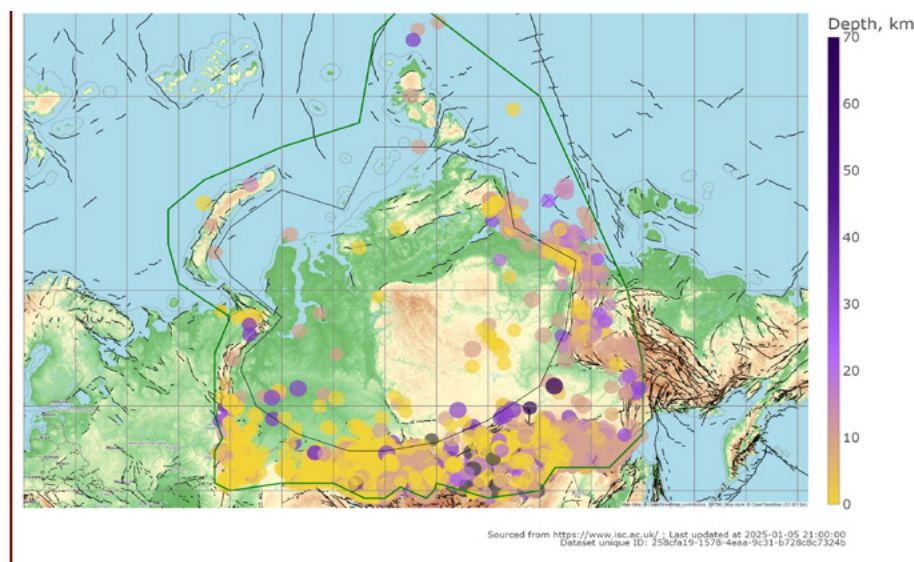
ციმბირის პლუმის სავარაუდო მდებარეობის მიდამოებში მიწისძვრების წარმოდგენილი ანალიზი აჩვენებს სეისმურობის ტალღისებურ ზრდას: იზრდება მიწისძვრების რაოდენობა, იზრდება მათი მასშტაბები და მიწისძვრები გამოჩნდა დიდ სიღრმეზე. ეს მიუთითებს ფირფიტის დეფორმაციის პროცესებზე ქვემოდან მაგმის კოლოსალური წნევის გავლენის ქვეშ. ამ პროცესების პროგრესირება უახლოეს მომავალში აუცილებლად გამოიწვევს ციმბირის პლუმის ამოფრქვევას შემდეგი მიზეზების გამო.

აღმოსავლეთ ციმბირის კრატონი ცემენტირებულია მაგმატური და

მეტამორფული ქანებით, რომლებიც ქმნიან მკვრივ მონოლითურ ქერქს, რომელიც წარმოიქმნა 250 მილიონი წლის წინ მომხდარი ამოფრქვევის შედეგად. ამ რეგიონში 7.0 და უფრო მაღალი სიმძლავრის ძლიერი მიწისძვრების გაჩენა ნიშნავს, რომ ციმბირის კრატონის პლატფორმის სტრუქტურები განიცდის დეფორმაციას, რომელიც აღემატება ქანების საბოლოო სიძლიერეს. იმის გასაგებად, თუ როგორ შეიძლება მონოლითური ციმბირის კრატონი დაიშალოს პლუმის წნევით, შეიძლება მოვიყვანოთ მაგალითი იმისა, თუ როგორ იზიარება მინა რამდენიმე წუთში, სანამ მთლიანად დაიმსხვრევა ფრაგმენტებად.

ამ დროისთვის, იმისათვის, რომ გავიგოთ პლუმის წინსვლის რეალური ვითარება და დედამიწის ქერქის სიძლიერის მდგომარეობა მაგმატური ციმბირის პლუმის მიდამოში, უკიდურესად აუცილებელია დამატებითი სეისმური სენსორების დაყენება, სასურველია ჭაბურღილებში რამდენიმე კილომეტრის სიღრმეზე. ეს საშუალებას მისცემს დედამიწის ქერქისა და მანტიის დეტალურ სეისმურ ტომოგრაფიულ ანალიზს და პლუმის პოზიციისა და აქტივობის მუდმივ მონიტორინგს

M3,5+ მაგნიტუდის მიწისძვრები ციმბირის პლუმის რეგიონში



ნახ.51.

3,5 და მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების რუკა ციმბირის პლუმის რეგიონში 1990 წლიდან 2024 წლამდე. ფერის მასშტაბი შეესაბამება სიღრმეს.

მონაცემთა ბაზა: ISC.

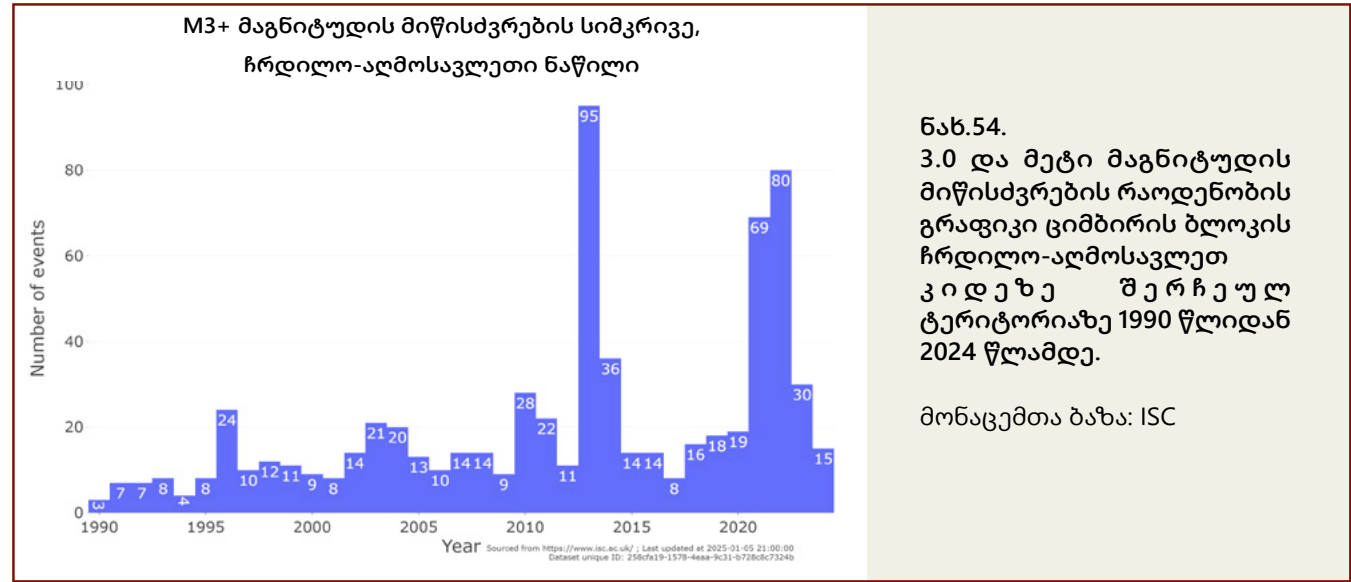
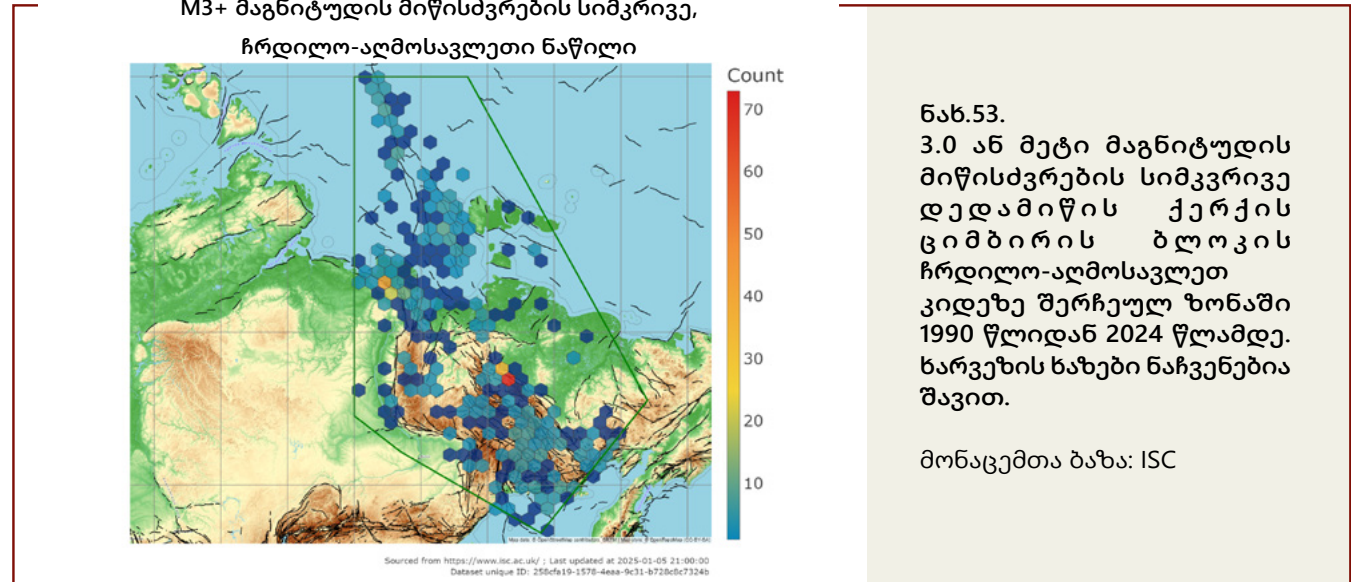
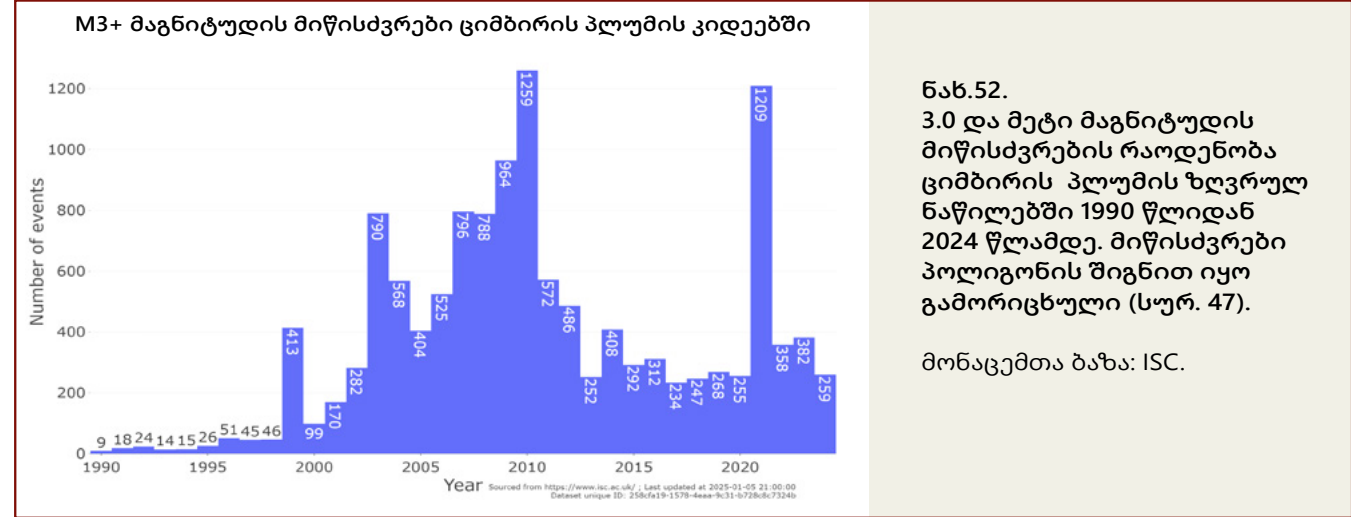
განვიხილოთ სეისმური აქტივობა მხოლოდ ციმბირის პლუმის ზღვრულ ნაწილებში. გეოლოგიურად, ეს ტერიტორიები მიეკუთვნება დაკეცილ სარტყლებს, სეისმურად აქტიურ რეგიონებს, რომლებშიც სეისმურობა შეიძლება გამოწვეული იყოს როგორც ტექტონიკური მოძრაობებით, ასევე მაგმატური პლუმის გავლენით. მიწისძვრების რაოდენობის გრაფიკზე ნაჩვენებია სხვადასხვა სეისმურობის ფაქტორების გადაფარვის შერეული სურათი (სურ. 52). ზოგიერთ წლებში

შეინიშნება სეისმური აქტივობის მნიშვნელოვანი მატება. ამ პროცესების ბუნების უფრო ზუსტი გაგებისთვის აუცილებელია თითოეული რეგიონის ცალკე განხილვა.

ლაპტევის ზღვის ფსკერზე ვერხოიანსკის დაკეცილი სტრუქტურებისა და რღვევების ზონას (ნახ. 53), ვხედავთ, რომ 3.0 მაგნიტუდის სიმძლავრის მიწისძვრების ძლიერი აფეთქებები მოხდა 2013 წელს და 2021-2022 წლებში (სურ. 54). ასეთი აფეთქებები დამახასიათებელია მაგმის შეღწევის ეტაპებისთვის, რაც

იწვევს დედამიწის ქერქის უწყვეტობის მნიშვნელოვან შეფერხებებს და თხევადი ფაზის გათავისუფლებას ქანების ბზარებისა და მიმდებარე რღვევების

მეშვეობით. ასეთ გამოვლინებებს თან ახლავს მცირე სიმძლავრის მიწისძვრები რაოდენობის ზრდა და მიწისძვრების, ხანდახან კი სერიების გაჩენა.

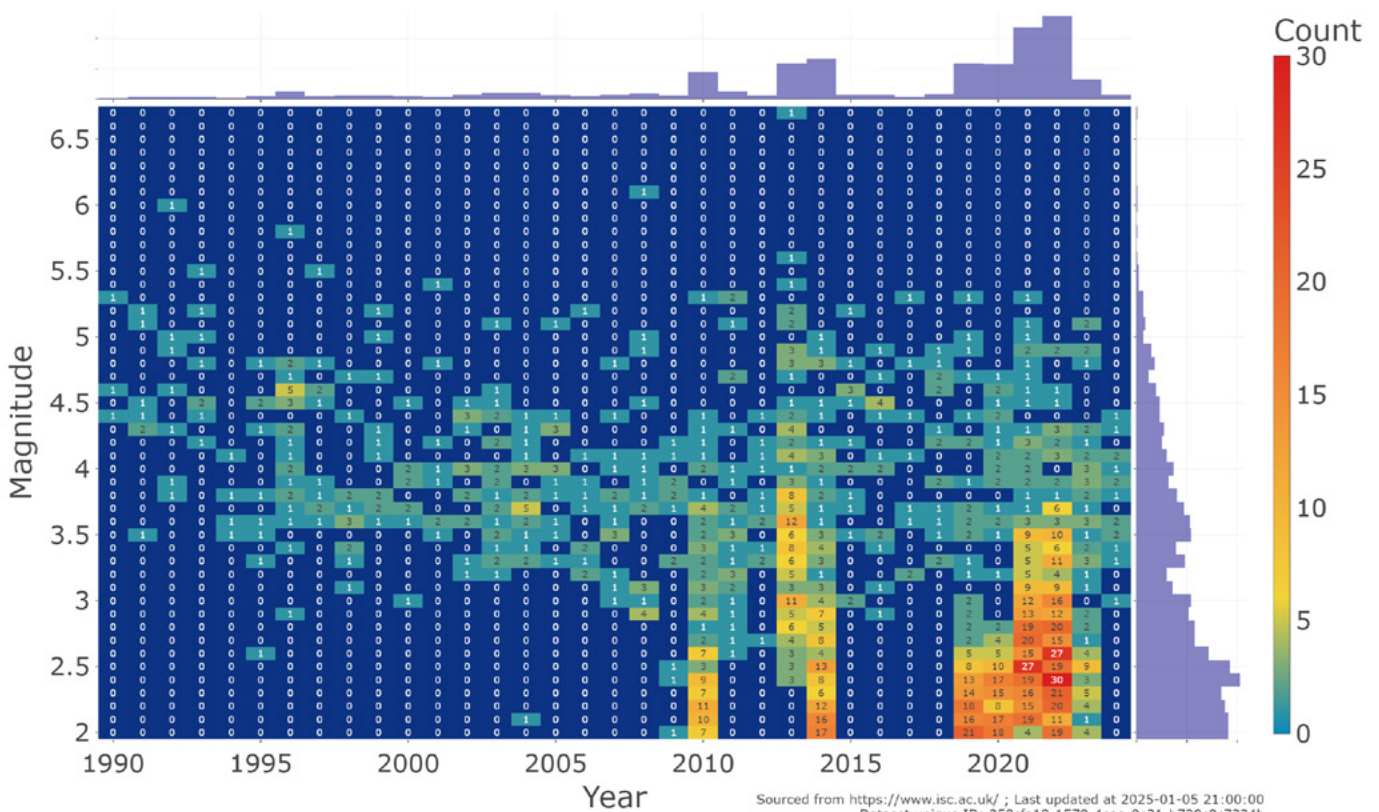


მიწისძვრის მაგნიტუდების შესწავლამ აჩვენა 2010 და 2013-2014 წლებში 2.0-დან 3.5 მაგნიტუდის მიწისძვრების მატება. და მათი რაოდენობის მნიშვნელოვანი ზრდა 2019 წლიდან (სურ. 55). 2019 წლიდან საგრძნობლად გაიზარდა აგრეთვე მიწისძვრების რაოდენობა, რომლებიც გავლენას ახდენენ დედამიწის ქერქიდან თითქმის ძირამდე, 35 კმ სიღრმემდე (სურ. 56). 2013 წელს რეგიონმა განიცადა

პირველი 6,7 მაგნიტუდის მიწისძვრა, რაც აშკარად მიუთითებს სტრესის დაგროვების ხანგრძლივ პერიოდზე ან დაგროვილი მაგმატური სითხეების გამოყოფაზე.

ცალკე განვიხილოთ ტაიმირის ნახევარკუნძულიდან სამხრეთ-აღმოსავლეთის მიმართულებით მიწისძვრების ჯგუფი (სურ. 57).

M2+ მაგნიტუდის მიწისძვრები, ჩრდილო-აღმოსავლეთი ნაწილი



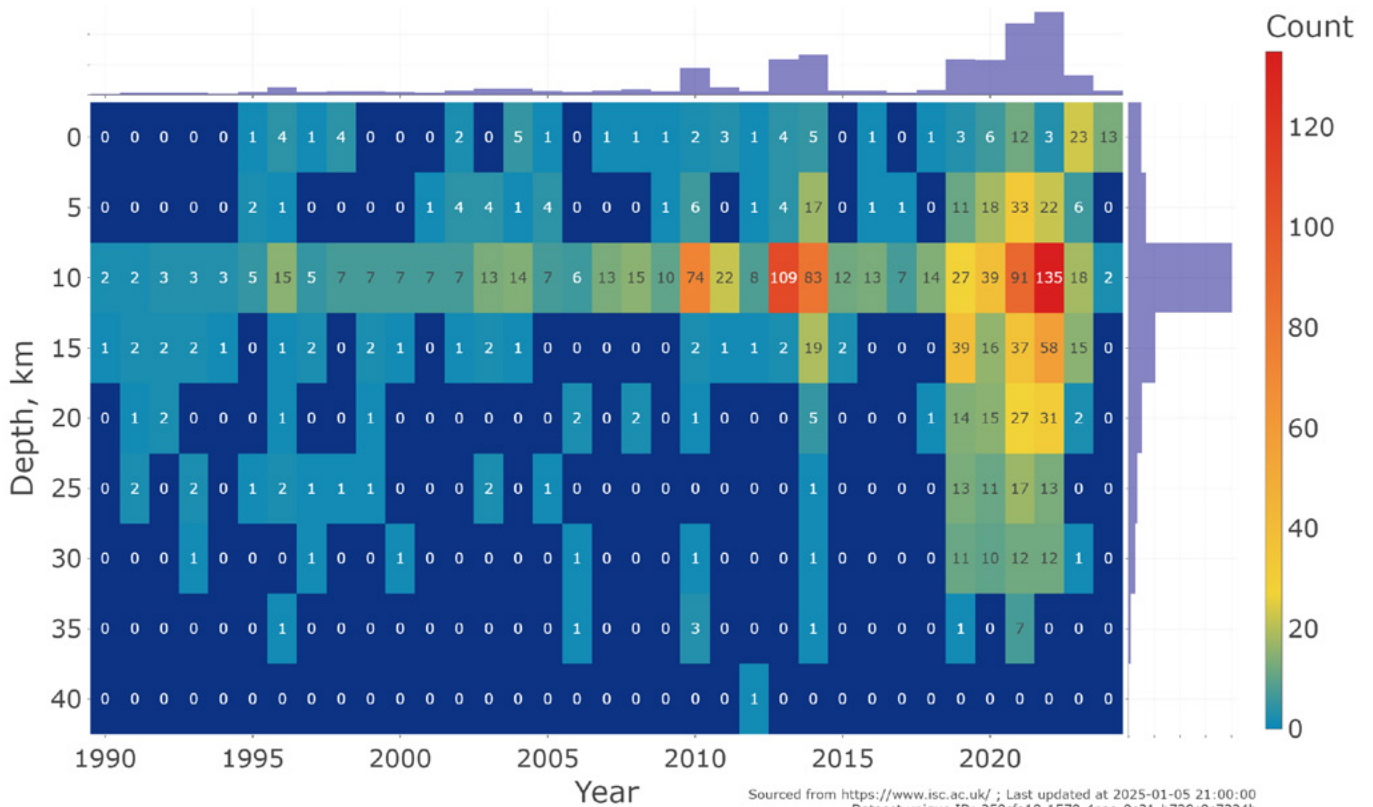
Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

ნახ.55.

მიწისძვრის მაგნიტუდების განაწილება ციმბირის ბლოკის ჩრდილო-აღმოსავლეთ კიდეზე შერჩეულ ზონაში 1990 წლიდან 2024 წლამდე.

მონაცემთა ბაზა: ISC

M2+ მაგნიტუდის მიწისძვრები, ჩრდილო-აღმოსავლეთი ნაწილი



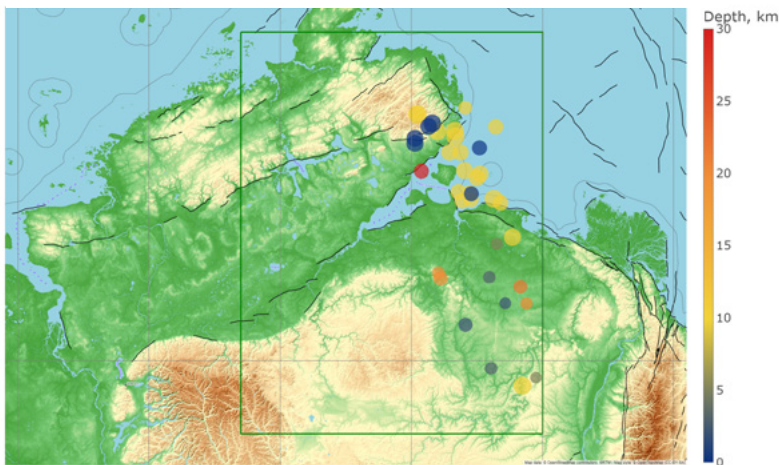
ნახ.56.

2.0 და მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების რაოდენობის განაწილება სიღრმის მიხედვით ციმბირის ბლოკის ჩრდილო-აღმოსავლეთ კიდეზე შერჩეულ ტერიტორიაზე 1990 წლიდან 2024 წლამდე.

მონაცემთა ბაზა: ISC

ციმბირის ნახევარკუნძულის ჩრდილო-აღმოსავლეთით

2+ მაგნიტუდის მიწისძვრები დაფიქსირდა



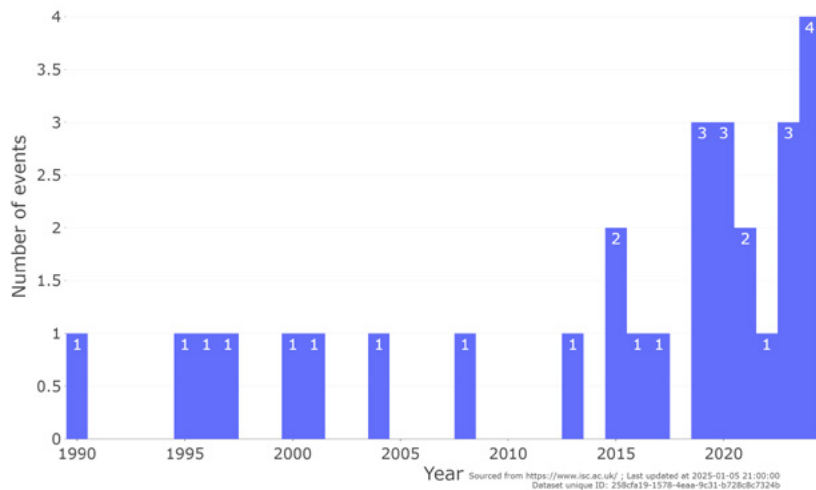
ნახ.57.

2.0 მაგნიტუდის მიწისძვრების განაწილება სიღრმის მიხედვით ციმბირის ნახევარკუნძულის ჩრდილო-აღმოსავლეთით, 1990 წლიდან 2024 წლამდე.

მონაცემთა ბაზა: ISC

2019–2020 წლებში ასევე დაფიქსირდა მცირე და საშუალო სიდიდის სეისმური აქტივობის ზრდა (სურ. 58, 59).

ტაიმირის ნახევარკუნძულის ჩრდილო-აღმოსავლეთით 3+ მაგნიტუდის

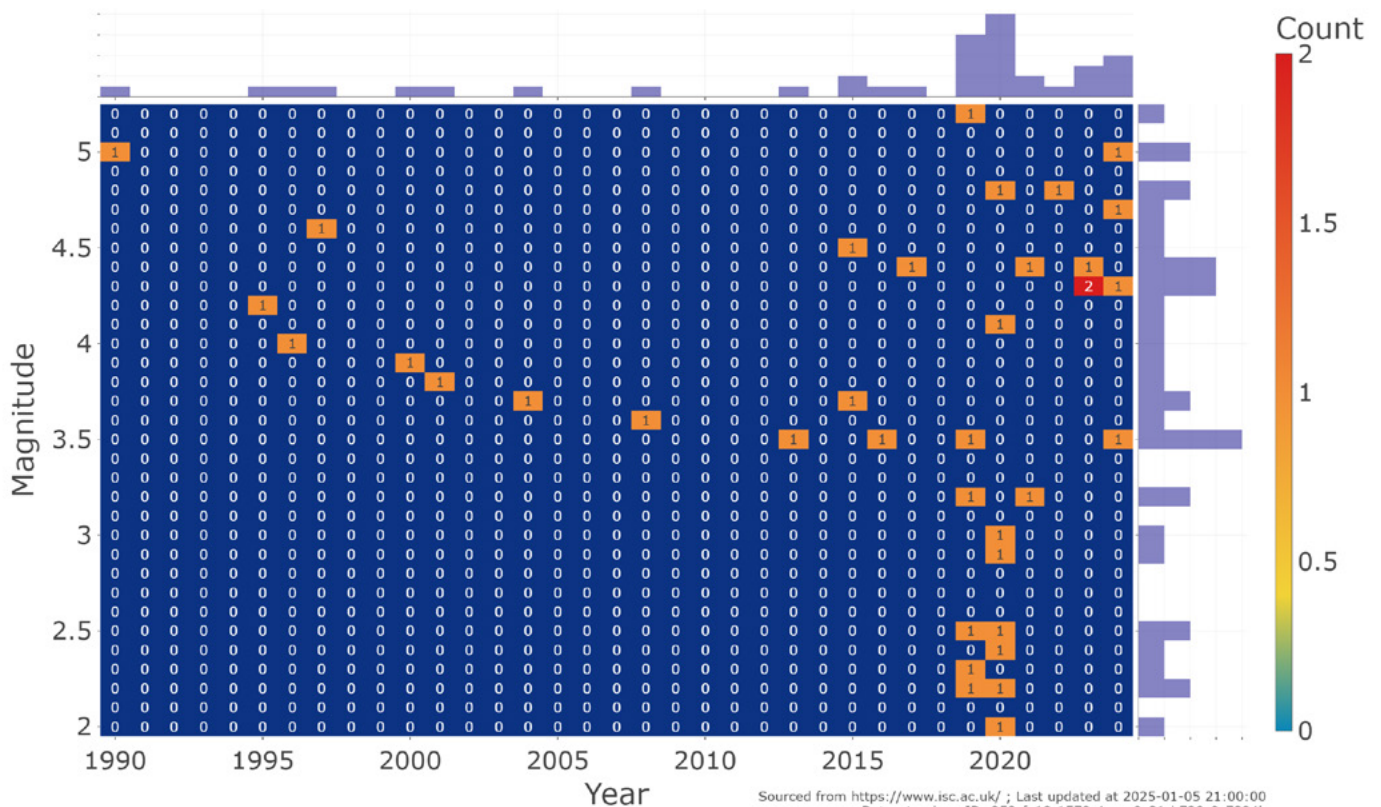


ნახ.58.

3.0 და მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების რაოდენობის გრაფიკი შერჩეულ რაიონში, ტაიმირის ნახევარკუნძულის ჩრდილო-აღმოსავლეთით.

მონაცემთა ბაზა: ISC

ტაიმირის ნახევარკუნძულის ჩრდილო-აღმოსავლეთით 2+ მაგნიტუდის მიწისძვრები დაფიქსირდა



ნახ.59.

მიწისძვრების რაოდენობის განაწილება მაგნიტუდის მიხედვით შერჩეულ რაიონში, ტაიმირის ნახევარკუნძულის ჩრდილო-აღმოსავლეთით, 1990 წლიდან 2024 წლამდე.

მონაცემთა ბაზა: ISC

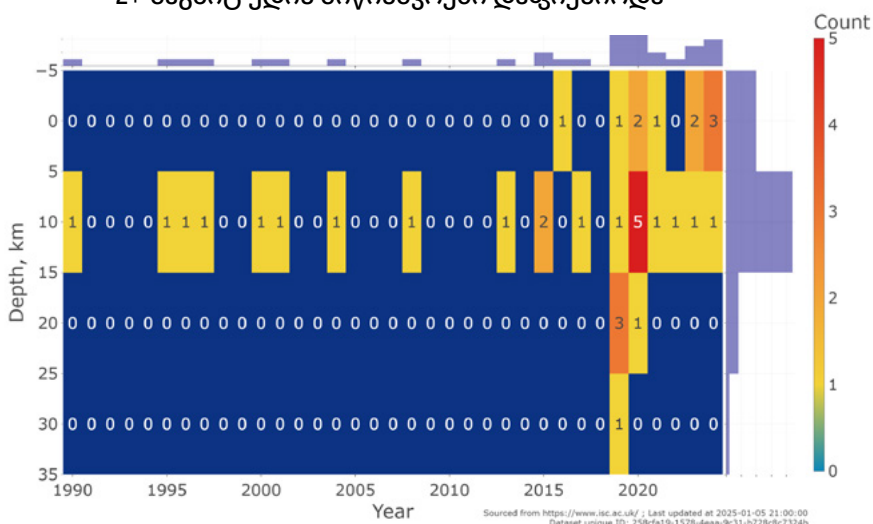
ასევე 2019-2020 წლებში. მიწისძვრების სიღრმის ზრდა დედამიწის ქერქის ძირამდე შეინიშნება (ნახ. 60) იმავე პერიოდებში, როგორც ვერხოიანსკის დაკეცილი სტრუქტურის მიდამოში.

ხაზგასმით უნდა აღინიშნოს, რომ ეს ზონა მდებარეობს ციმბირის პლუმის თავის გავლენის არეალში და მიუხედავად მიწისძვრების მცირე რაოდენობისა, მას აქვს მიწისძვრების სიღრმისა და რაოდენობის გაზრდის მსგავსი ტენდენცია, როგორც ვერხოიანსკის

დაკეცილ ნაგებობებში, მხოლოდ 2019 წლიდან.

განსახილველი ტერიტორიის სამხრეთი ნაწილი მოიცავს ალთაი-საიანის ნაოჭების სისტემას და ბაიკალის რეგიონს (სურ. 61). ეს არის ტექტონიკურად მოძრავი და სეისმურად აქტიური რეგიონი. მიწისძვრები აქ იყო 1999 და 2021 წლებში (სურ. 62). მიწისძვრების სიმძლავრე 2007 წლიდან იზრდება, 2021 წელს კი 6,8-ს მიაღწია (სურ. 63).

ტაიმირის ნახევარკუნძულის ჩრდილო-აღმოსავლეთით
2+ მაგნიტუდის მიწისძვრები დაფიქსირდა

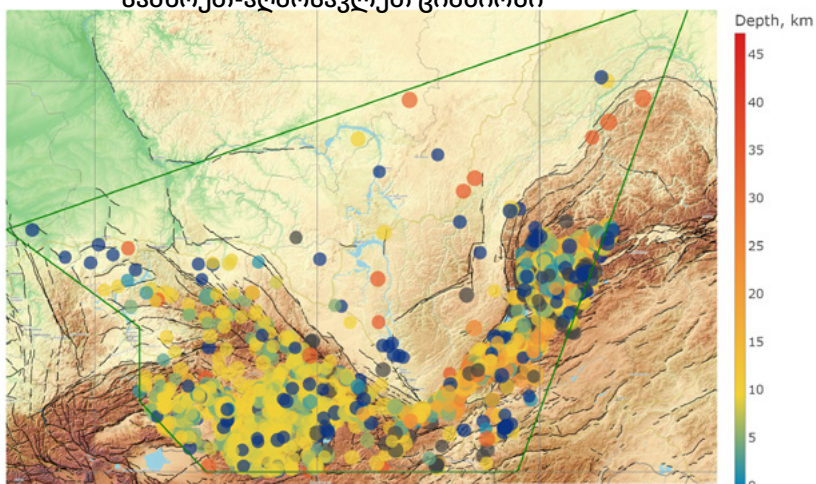


ნახ.60.

2.0 და მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების რაოდენობის განაწილება სიღრმის მიხედვით შერჩეულ ტერიტორიაზე ტაიმირის ნახევარკუნძულის ჩრდილო-აღმოსავლეთით.

მონაცემთა ბაზა: ISC

M3+ მაგნიტუდის მიწისძვრები
სამხრეთ-აღმოსავლეთ ციმბირში

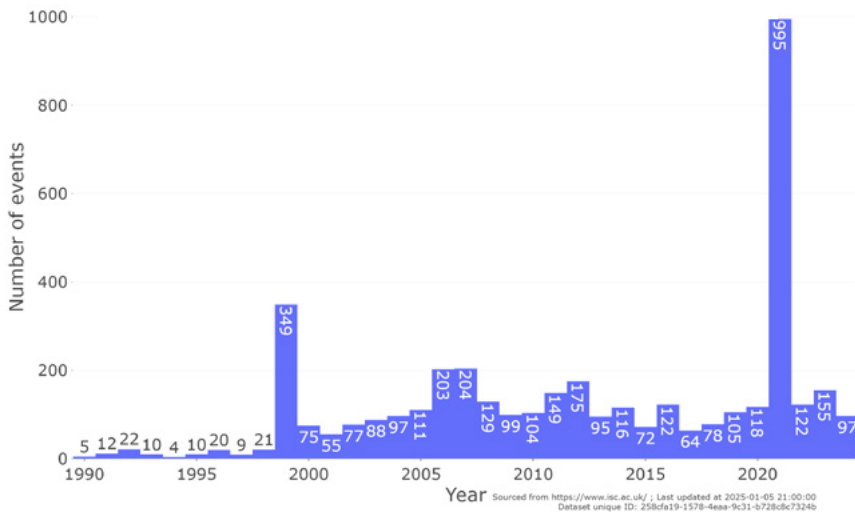


ნახ.61.

3.0 და უფრო მაღალი სიმძლავრის მიწისძვრების ეპიცენტრების ადგილმდებარეობების რუკა, ჩაწერილია 1990 წლიდან 2024 წლამდე შერჩეულ პოლიგონზე აღმოსავლეთ ციმბირის სამხრეთ ნაწილში.

მონაცემთა ბაზა: ISC

**M3+ მაგნიტუდის მიწისძვრები
სამხრეთ-აღმოსავლეთ ციმბირში**

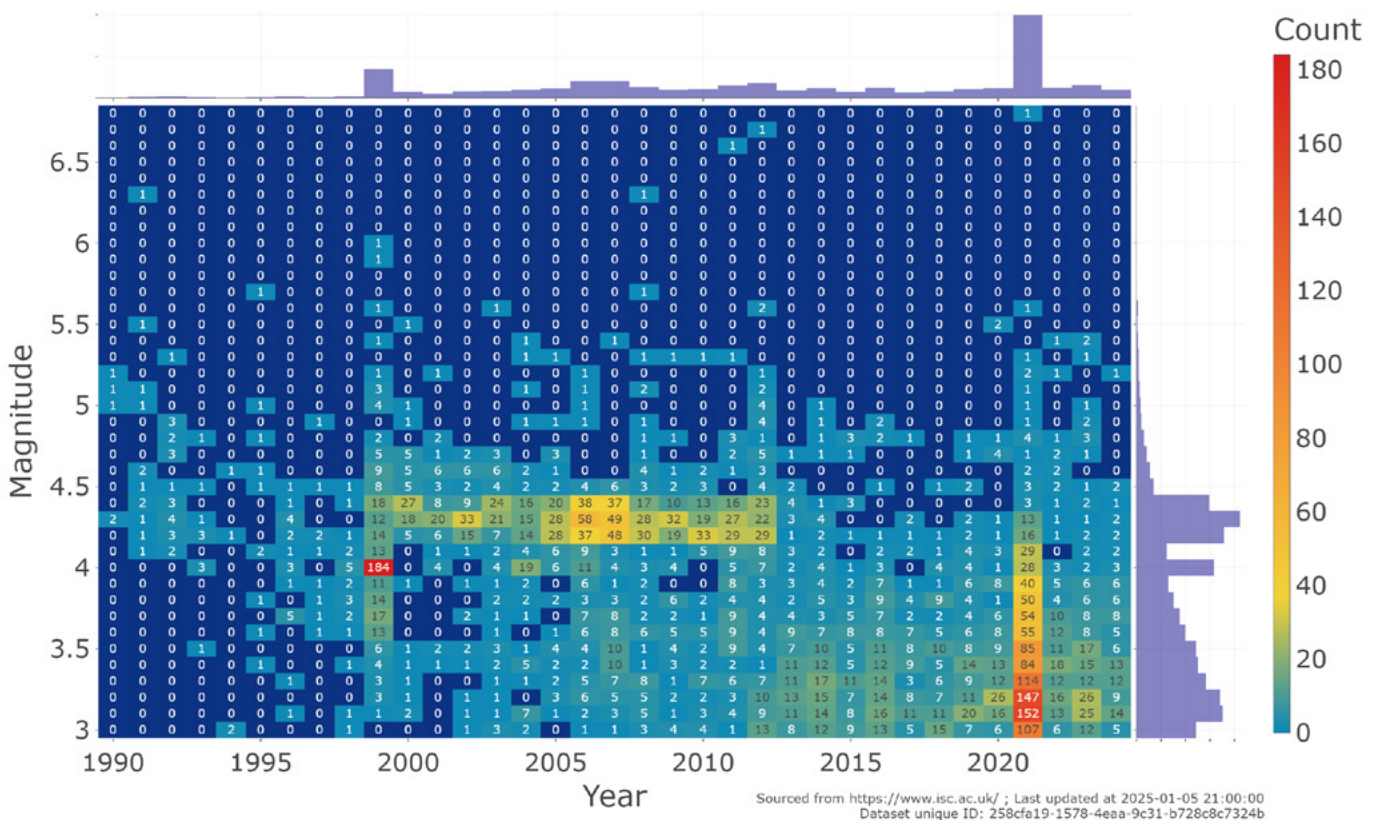


ნახ.62.

3.0 და მეტი მაგნიტუდის სიმძლავრის მიწისძვრების რაოდენობა აღმოსავლეთ ციმბირის სამხრეთ ნაწილში.

მონაცემთა ბაზა: ISC

M3+ მაგნიტუდის მიწისძვრები სამხრეთ-აღმოსავლეთ ციმბირში



ნახ.63.

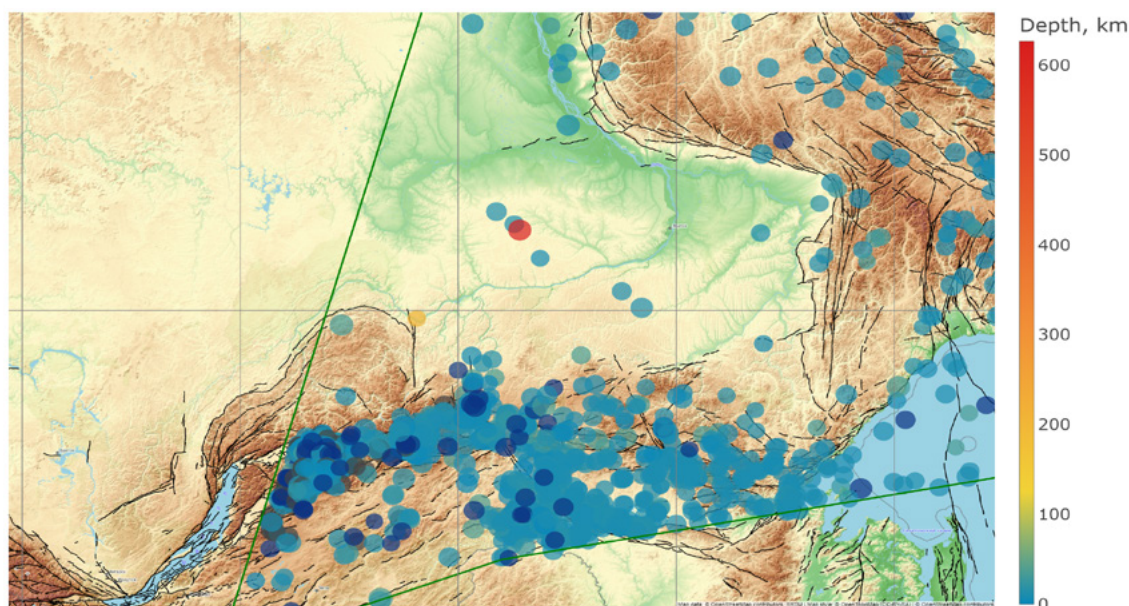
მიწისძვრების განაწილება შერჩეულ მრავალკუთხედში აღმოსავლეთ ციმბირის სამხრეთ ნაწილში, 1990 წლიდან 2024 წლამდე, მაგნიტუდის მიხედვით.

მონაცემთა ბაზა: ISC

მნიშვნელოვანია აღინიშნოს მანტიის მიწისძვრების გამოჩენა ციმბირის კრატონის ქვეშ. ჯერ კიდევ 1998 წელს, 3.3 მაგნიტუდის მიწისძვრა დაფიქსირდა 211 კმ სიღრმეზე ვილიუის სინეკლიზის მიდამოში. ეს იყო გასაკვირი ფაქტი, მაგრამ ბევრად უფრო უნიკალური მოვლენა იყო მნიშვნელოვანი 5.1 მაგნიტუდის მიწისძვრა უკვე 627 კმ სიღრმეზე 2023 წელს იმავე რეგიონში (სურ. 64). ღრმა ფოკუსირებული სეისმურობის გამოვლინება დედამიწის ქერქის პლატფორმის სტაბილური ბლოკის ქვეშ თავისთავად უნიკალური მოვლენაა. ტრადიციულად, ვარაუდობენ, რომ ასეთი შიდა მანტიის მიწისძვრები ხდება ეგრეთ წოდებული სუბდუქციის ზონების გასწვრივ, მაგრამ უახლოესი ასეთი ზონა მდებარეობს აქედან შორს, ათასობით კილომეტრის დაშორებით და ვერანაირ გავლენას ვერ მოახდენს. მოხსენების ავტორები თვლიან, რომ ღრმა ფოკუსის მიწისძვრები გამოწვეულია

უზარმაზარი შიდა მანტიის აფეთქებებით, რომლებიც ხდება მაშინ, როდესაც შედარებით ცხელი მაგმის ნაკადები შედარებით ცივ ნაკადებთან კონტაქტში მოდის. სეისმოტომოგრაფიული მოდელის მიხედვით, ორივე ღრმა ფოკუსის მიწისძვრის ადგილზე შეინიშნება სეისმური ტალღების სიჩქარის ანომალიები, რაც შეესაბამება შედარებით უფრო ბლანტი და თხევადი ნაკადებს, რაც, სავარაუდოდ, ასახავს მათ ტემპერატურულ განსხვავებებს. ამრიგად, ეს ორი მანტიის მიწისძვრა მოხდა შედარებით ცივ და შედარებით ცხელ მანტიის ნაკადებს შორის შეხების წერტილებზე (ნახ. 65), რამაც გამოიწვია დიდი რაოდენობით ენერგიის გამოთავისუფლება, რამაც წარმოქმნა სეისმური სენსორების მიერ მიწისძვრების სახით ჩაწერილი აკუსტიკური ტალღები. ეს აშკარად მიუთითებს მანტიის ნაკადის მნიშვნელოვან აქტივობაზე ამ მხარეში.

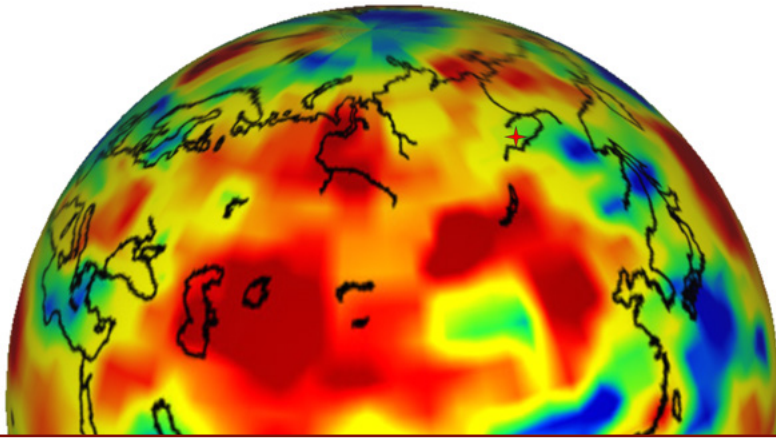
ციმბირში ღრმა მიწისძვრების ადგილმდებარეობა



Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfe19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

ნახ.64.

რუკაზე ნაჩვენებია ღრმა ფოკუსირებული მიწისძვრის ეპიცენტრი 5.1 მაგნიტუდაზე 627 კმ სიღრმეზე (წითელი მარკერი) ციმბირის პლატფორმის ქვეშ 2023 წელს და M 3.3 211 კმ სიღრმეზე 1998 წელს (ყვითელი მარკერი).



ნახ.65.

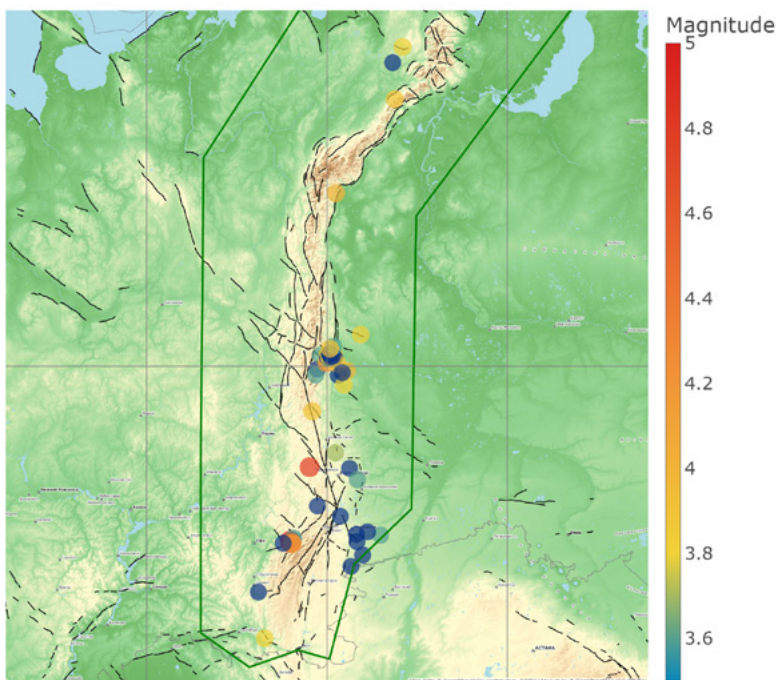
შემცირებული სეისმური ტალღების სიჩქარის ზონები მანტიაში დაახლოებით 600 კმ სიღრმეზე. 2023 წლის 5.1 მაგნიტუდის მიწისძვრის ეპიცენტრი მოდის მანტიის შედარებით ცხელ და შედარებით ცივ რეგიონებს შორის კონტაქტის ზონაში.

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

ციმბირის ბლოკის მარგინალური ნაწილების რხევა იწვევს სეისმური აქტივობის ზრდას ურალის რეგიონში. ანალიზისთვის მონაცემები გაფილტრული იყო, რათა მოიცავდეს სამთო საქმიანობით წარმოქმნილი ქანების აფეთქებები. ასევე არჩეული იყო

3.5 მაგნიტუდა, რათა უზრუნველყოფილი ყოფილიყო ადამიანებთან დაკავშირებული მოვლენების გამორიცხვა (სურ. 66, 67). მაშასადამე, სეისმურობის დაკვირვებული ტალღის მსგავსი მატება ბუნებრივ პროცესებს ასახავს.

ურალში 3.5+ მაგნიტუდის მიწისძვრები

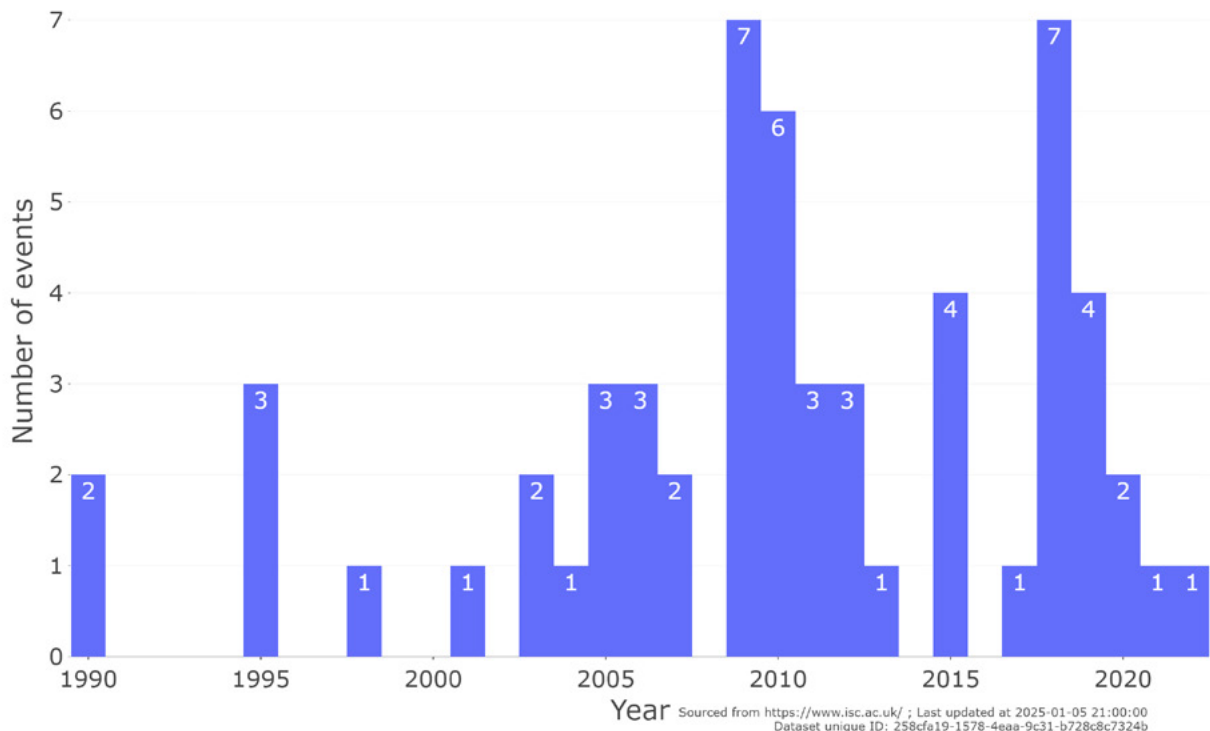


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

ნახ.66.

მიწისძვრების ეპიცენტრების ადგილმდებარეობის რუკა 3,5 და მეტი მაგნიტუდით, დაფიქსირებული ურალის რეგიონში 1990 წლიდან 2022 წლამდე.

ურალში 3.5+ მაგნიტუდის მიწისძვრები



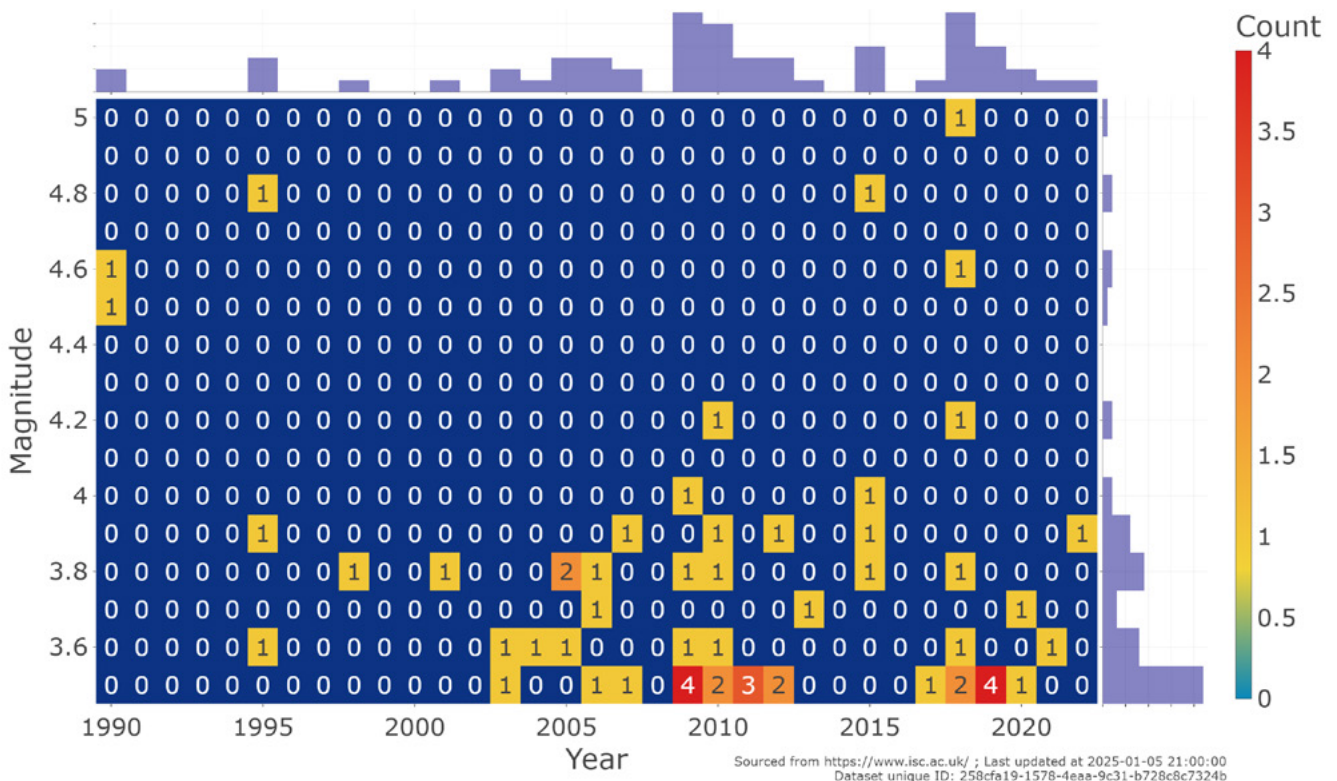
ნახ.67.

ურალის რეგიონში 1990 წლიდან 2022 წლამდე დაფიქსირდა 3,5 ან მეტი მაგნიტუდის სიმძლავრის მიწისძვრების რაოდენობა.

გარდა ამისა, რეგიონში გამოცნდა მიწისძვრები 4.0-დან 5.0 მაგნიტუდამდე, რაც ასევე მიწისძვრების ბუნებრივი ზრდის მაჩვენებელია (სურ. 68).

სეისმურობის მატება ურალის რეგიონში არ ხდება დაგეგმილი წესით, არამედ ტალღებით, რაც ბუნებრივი კანონზომიერებაა.

ურალში 3.5+ მაგნიტუდის მიწისძვრები



ნახ.68.

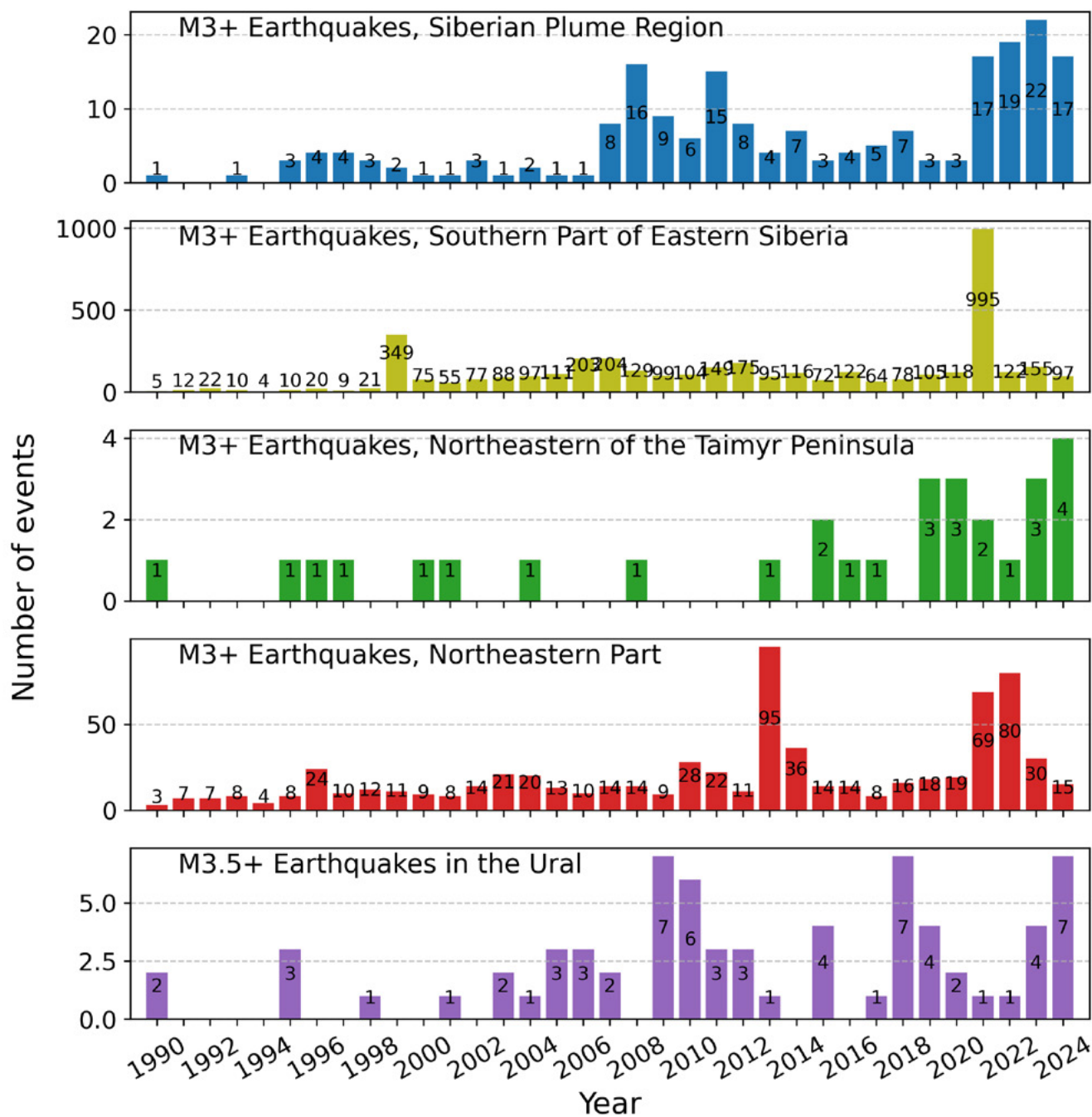
ურალის რეგიონში 1990 წლიდან 2022 წლამდე რეგისტრირებული მიწისძვრების განაწილება მაგნიტუდის მიხედვით.

მონაცემთა ბაზა: ISC

სეისმური აქტივობის პიკების დროის შესადარებლად ციმბირის პლუმის რეგიონის სხვადასხვა ნაწილში და მის გარშემო წარმოდგენილია გრაფიკი (სურ. 69). 2021 წელს სეისმური აქტივობის ზრდა შეინიშნება ყველა განხილულ რეგიონში, გარდა ურალისა. გრაფიკიდან ჩანს, რომ სეისმური აქტივობა ყველა რეგიონშია და ის ბოლო წლებში იზრდება. ზრდა ერთდროულად არ ხდება, არამედ ტალღებითა და პულსირებული აფეთქებებით სხვადასხვა რეგიონში. ამავდროულად, შეინიშნება გარკვეული ნიმუში, რომელიც მოგვაგონებს ფირფიტის თანდათანობით ქანქარას დასავლეთიდან აღმოსავლეთისკენ

და ჩრდილოეთიდან სამხრეთის მიმართულებით.

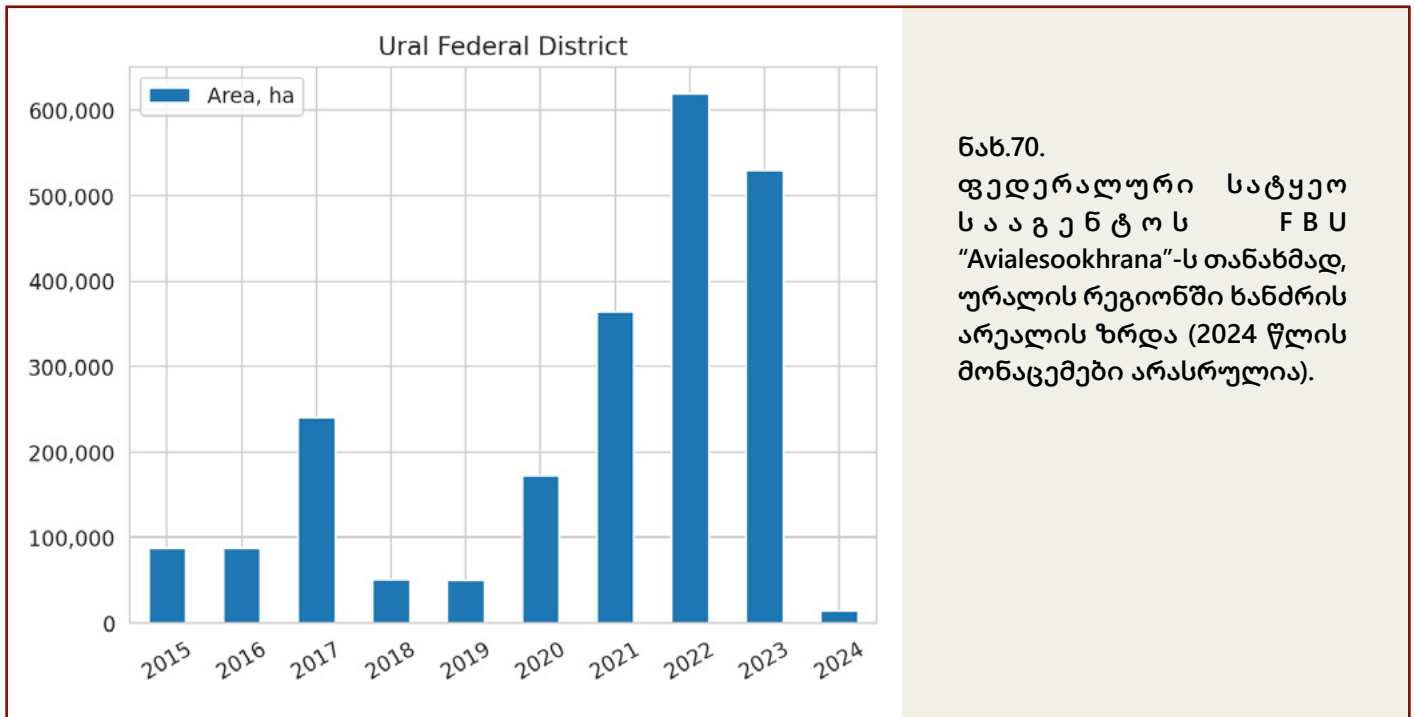
მოდით შევხედოთ ტყის ხანძრების გამოვლინებას ზოგიერთ რეგიონში. რეგიონში ხანძრის არეალის ზრდა აღნიშნავს მიწისქვეშა აქტივობის ზრდას, ვინაიდან ხანძარი ხშირად ხდება რღვევის ადგილებში, სადაც აალებადი აირები გამოიყოფა. ასეთი ხანძრის ჩაქრობა რთულია და ძალიან სწრაფად ვრცელდება დიდ ტერიტორიებზე. ურალის რეგიონში 2020 წლიდან მკვეთრად გაიზარდა ბუნებრივი ხანძრების არეალი (სურ. 70). გრაფიკი ეყრდნობა ფედერალური სატყეო სააგენტოს „ავიალესოხრანას“ მონაცემებს.



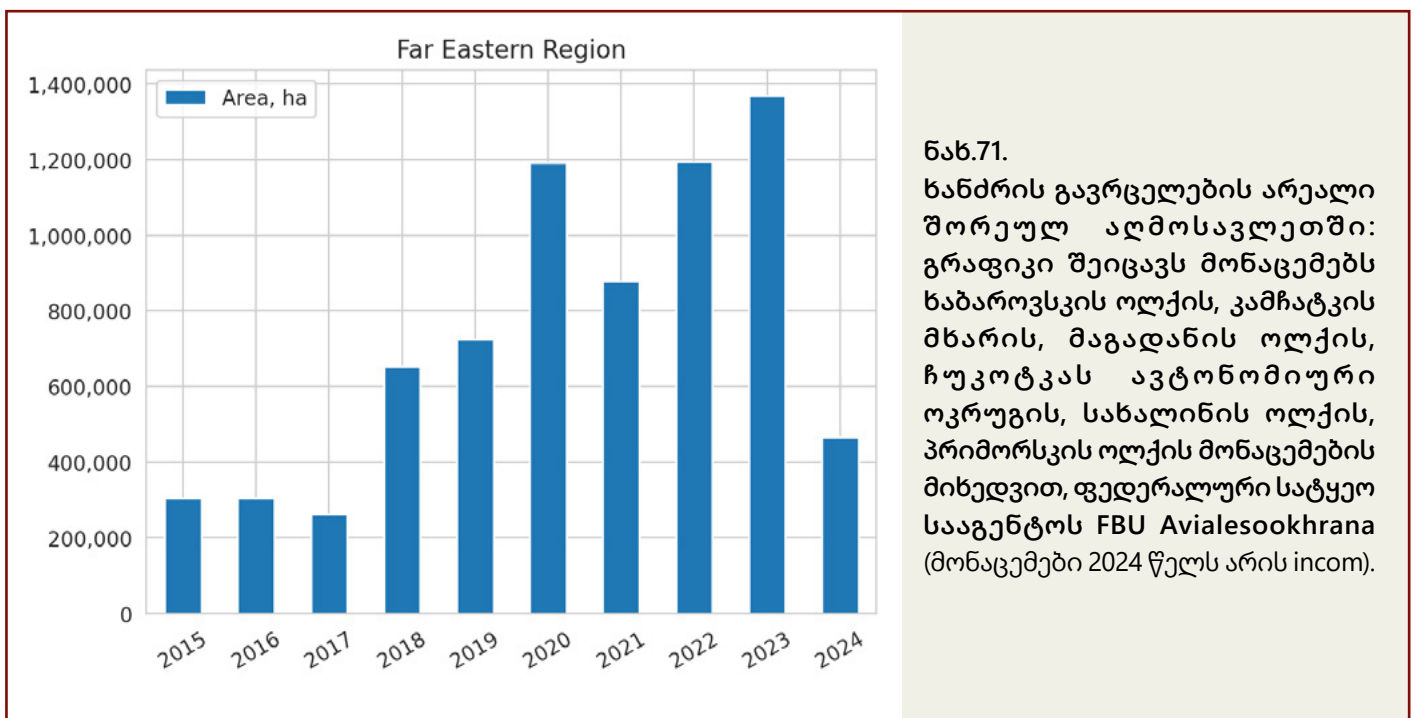
ნახ.69.

სეისმური აქტივობის პიკების განაწილება ვერხოიანსკის რეგიონში (ციმბირის პლატფორმის აღმოსავლეთით), აღმოსავლეთ ციმბირის სამხრეთ ნაწილში, ურალში (აღმოსავლეთ ციმბირის დასავლეთით) და ციმბირის ცენტრალურ ნაწილში (დასავლეთ ციმბირის ფირფიტისა და აღმოსავლეთ ციმბირის პლატფორმის ჩათვლით) წლიურად აღწევს 3.0 ან მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრები.

მონაცემთა ბაზა: ISC



შორეული აღმოსავლეთის რეგიონში ხანძრით დაფარული ფართობი ასევე ექსპონენტურად იზრდება, რაც ნათლად ჩანს გრაფიკით (ნახ. 71).

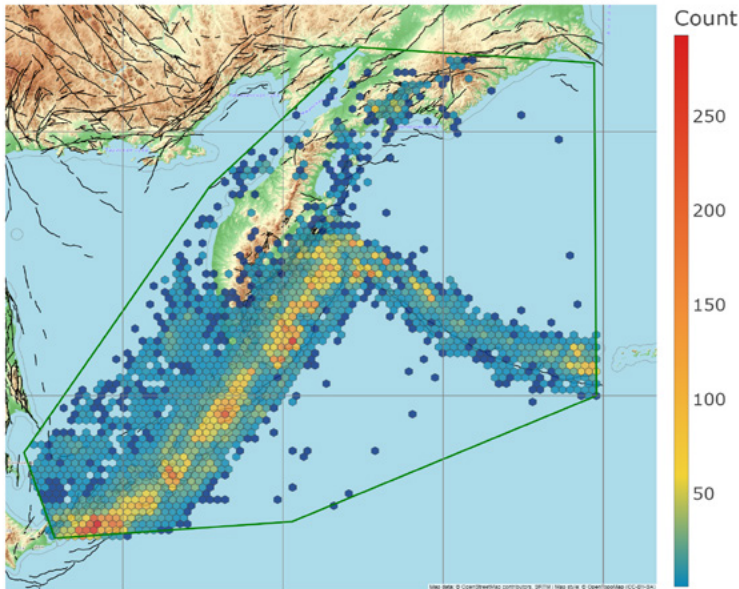


ამრიგად, ხანძრის გაზრდის მსგავსი პროცესები ასევე მიმდინარეობს დედამიწის ქერქის ციმბირის და შორეული აღმოსავლეთის ბლოკის მეორე მხარეს, წყნარი ოკეანის ფირფიტის საზღვარზე.

ვარაუდობენ, რომ ციმბირის პლუმის დანერგვა ასევე გავლენას ახდენს კურილ-კამჩატკას რეგიონზე, როგორც კონტინენტური ქერქის ბლოკის ბოლო არეალი არსებული პლუმის წნევის ქვეშ. სეისმური მონაცემების ანალიზი კამჩატკასა და კურილის კუნძულების

რეგიონში გვიჩვენებს მიწისძვრების რაოდენობის შესამჩნევ ზრდას 4.0 და მეტი მაგნიტუდით (სურ. 72, 73). რეგიონი წყნარი ოკეანის ცეცხლის რგოლის ნაწილია (სურ. 74) და, შესაბამისად, აჩვენებს სეისმურობის ზრდის ტენდენციას, ამ ტექტონიკური სტრუქტურის ტენდენციების შესაბამისად. თუმცა, სეისმური მოვლენების უმეტესობა დამოუკიდებელი ხასიათისაა. ეს შეიძლება მიუთითებდეს, რომ ციმბირის პლუმს აქვს თავისი გავლენა კამჩატკასა და კურილის კუნძულებზე.

მიწისძვრის სიმკვრივე M4+მაგნიტუდის კამჩატკაზე და კურილის კუნძულებზე



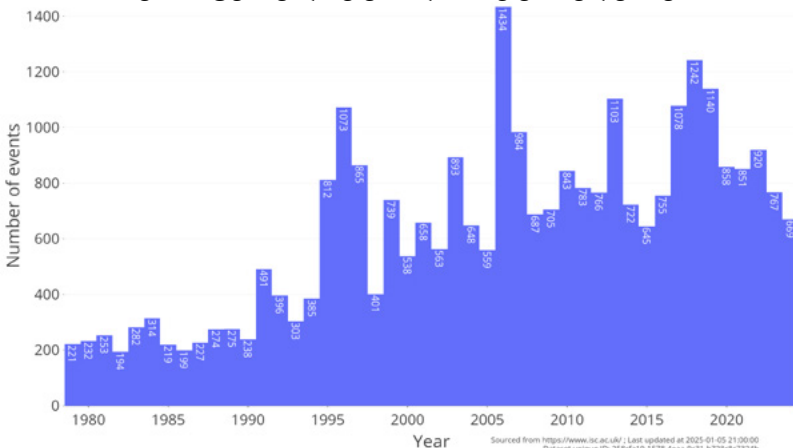
Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728dc7324b

ნახ.72.

4.0 და მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების სიმჭიდროვე კამჩატკას ნახევარკუნძულზე და კურილის კუნძულებზე, 1979–2024 წწ.

მონაცემთა ბაზა: ISC.

მიწისძვრის სიმკვრივე M4+მაგნიტუდის კამჩატკაზე და კურილის კუნძულებზე



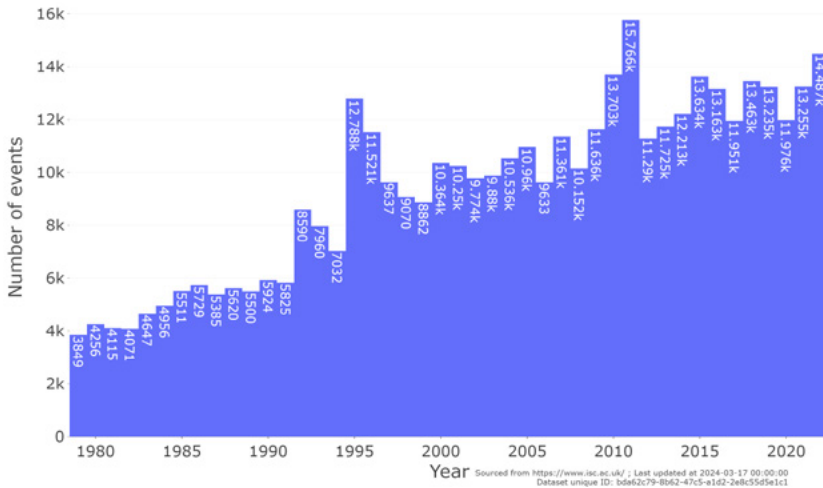
Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728dc7324b

ნახ.73.

4.0 და მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების რაოდენობის ზრდა კამჩატკას ნახევარკუნძულზე და კურილის კუნძულებზე, 1979–2024 წწ.

მონაცემთა ბაზა: ISC.

ცეცხლოვანი რგოლის მიწისძვრები M4+ 1979–2022



ახ.74.

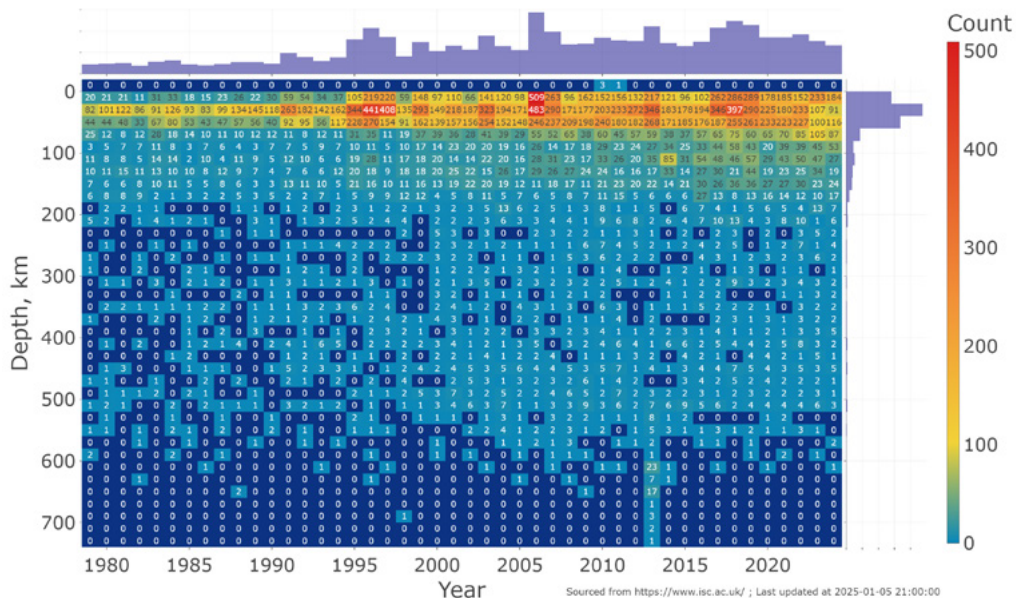
4.0 და მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების რაოდენობის ზრდა ცეცხლოვან რკალში, 1979–2022 წწ.

მონაცემთა ბაზა: ISC.

აღსანიშნავია, რომ კურილ-კამჩატკის რეგიონში ასევე აღინიშნება მიწისძვრების სიღრმის ზრდა (სურ. 75). ეს მიუთითებს იმაზე, რომ ლითოსფერული ფირფიტების შეერთება უფრო მოძრავი ხდება ციმბირის მაგმატური პლუმის გავლენის გამო. მოსალოდნელია ვულკანების აქტივობის მატება კურილ-კამჩატკის რეგიონში, ასევე

ღრმა მაგმის სწრაფი აწევის ანომალიების გამოჩენა, ვულკანური ამოფრქვევის დროს მისი შემადგენლობის სწრაფი ცვლილება უფრო ღრმა მაფიურ მაგმებამდე. შემადგენლობის მსგავსი ცვლილება უფრო ღრმაზე აჩვენა ბეზიმიანის ვულკანმა 2017 წლის ამოფრქვევის დროს.⁴⁵

კამჩატკის ნახევარკუნძულსა და კურილის კუნძულებზე 4+ მაგნიტუდის მიწისძვრები დაფიქსირდა



ნახ.75.

4.0 და მეტი მაგნიტუდის მიწისძვრების განაწილება, დაფიქსირებული შერჩეულ პოლიგონზე, კამჩატკის ნახევარკუნძულისა და კურილის კუნძულების არეალში 1979 წლიდან 2024 წლამდე, სიღრმის მიხედვით. მონაცემთა ბაზა: ISC.

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

სეისმურობის მატება, ხანძარი და ვულკანური აქტივობის ანომალიები არის დედამიწის ქერქის ციმბირის ბლოკის აწევის წინაპირობა, რომელიც განიცდის ზეწოლას ციმბირის პლუმის შეღწევით.

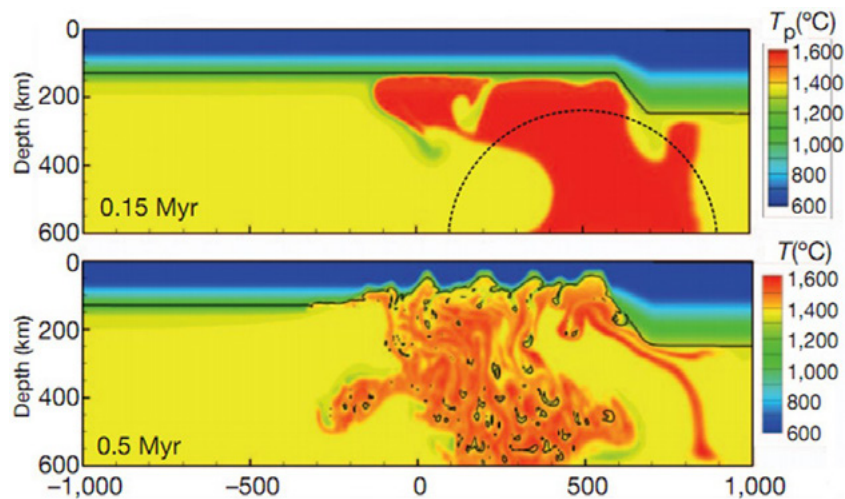
სეისმური აქტივობის ზრდა არა მხოლოდ ციმბირში, არამედ განსაკუთრებით დასავლეთ ციმბირის ფილისა და აღმოსავლეთ ციმბირის კრატონის კიდეებზე მიუთითებს იმაზე, რომ ფირფიტის აწევა მაგმატური პლუმის მიერ ქვემოდან ზეწოლის შედეგად უკვე დაწყებულია. ეს მიუთითებს მაგმატური პლუმის ფართომასშტაბიან და მნიშვნელოვან გავლენას ფირფიტაზე.

ტ რ ა დ ი ც ი უ ლ ი მ ო დ ე ლ ე ბ ი
ვარაუდობდნენ, რომ მანტიის პლუმი, აწევისა და გაცხელებისას, უნდა შექმნას ზედაპირის მნიშვნელოვანი ამაღლება 2 კმ სიმაღლემდე მაგმის გარღვევის

მომენტამდე. არ არსებობს გეოლოგიური მტკიცებულება ციმბირის ბილიკების რეგიონში ასეთი დრამატული ამაღლების შესახებ, რომელიც წარმოიქმნა მაგმატური პლუმის შეჭრის შედეგად 250 მილიონი წლის წინ.

ციმბირის ბილიკების ცეცხლოვანი ქანების შესწავლის საფუძველზე, რუსეთის, გერმანიისა და საფრანგეთის ინსტიტუტების მეცნიერებმა დაადგინეს⁴⁶, რომ ბუშტის სახით აწევის ნაცვლად, პლუმი თანდათანობით ანადგურებდა ლითოსფეროს ქვემოდან (სურ. 76). როდესაც ეროზიამ კონტაქტურ ზონაში გამდნარი პლუმის მასალასა და მანტიის ზედა ქანებს შორის 50 კმ სიღრმეს მიაღწია, იმ მომენტში დაიწყო ფართომასშტაბიანი გადმოსხმა და ლავის ამოფრქვევა ზედაპირზე.

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



ნახ.76.

ციმბირის ბილიკების ფორმირების საწყისი ეტაპების რეკონსტრუქცია. ვერტიკალურ ღერძზე არის სიღრმე (კმ).

ქანების ტემპერატურა ნაჩვენებია სხვადასხვა ფერებში.

მანტიის პლუმის მწვერვალის საწყისი პოზიცია ნაჩვენებია წერტილოვანი ნახევარწრით. პლუმი უახლოვდება ლითოსფეროს ქვედა საზღვარს (მყარი შავი ხაზი) და “ვრცელდება” მის ქვეშ.

ქვემოთ, პლუმის ზედა ნაწილი, ეროზიის გამო (შეგიძლიათ იხილოთ ლითოსფეროს ფრაგმენტები, რომლებიც ჩაძირულია სიღრმეში) ზედა მანტიის გავლით დედამიწის ქერქისკენ გაემართა. ეს შეესაბამება ბილიკების მაგმატიზმის ძირითადი ფაზის დასაწყისს.

წყარო: სტეფან ვ. სობოლევ, ალექსანდრე ვ. სობოლევ, დიმიტრი ვ. კუზმინი, ნადეჟდა ა. კრივოლუცკაია, ალექსეი გ. პეტრუნიჩი, ნიკოლას ტ. არნდტი, ვიქტორ ა. რადკო, იური რ. ვასილიევი. მანტიის პლუმის, დიდი ცეცხლოვანი პროვინციების და ეკოლოგიური კატასტროფების დამაკავშირებელი // ბუნება. 2011. V. 477. გვ 312–316.

თანამედროვე პლუმის აქტივობა სავარაუდოდ იგივე მექანიზმს მიჰყვება. აქედან გამომდინარე, ზედაპირის მნიშვნელოვანი აწევა მხოლოდ ერთ ადგილას პლუმის თავის შემოღების დროს მოსალოდნელი არ არის, მაგრამ ეს მექანიზმი არ გამორიცხავს მთელ აღმოსავლეთ ციმბირის პლატფორმის ფართომასშტაბიან რეგიონალურ აწევას მცირე რაოდენობით. თუმცა, ტექტონოფიზიკური მოდელირების მიხედვით, ეს აწევაც საკმარისი იქნებოდა მაგმის გარღვევის გამოწვევისთვის, რომელიც გამოიყვანდა დნობას მაღალი

წნევის ქვეშ, რაც გამოიწვევს უზარმაზარ კატასტროფას.

პლუმის თავის სავარაუდო ცენტრის მდებარეობა არის პუტორანას პლატოს ჩრდილოეთით, ნორილსკის ჩრდილო-აღმოსავლეთით დაახლოებით 225 კილომეტრში. გარღვევა ასევე მოიცავს მთელ დასავლეთ ციმბირის თხელ ფირფიტას, სადაც ძველი ნაკერები - ნაპრალები და ღრმა რღვევები დედამიწის ქერქში - გაიხსნება.

ციმბირის პლუმის ამოფრქვევის გარდაუვალობის დასაბუთება

მიზეზები, რის გამოც თანამედროვე ციმბირის პლუმის მაგმას გარღვევას აქვს მაღალი რისკი ამჟამად, დაკავშირებულია შემდეგ პირობებთან. ბოლო 30 წლის განმავლობაში, დედამიწაზე თანდათანობით გაიზარდა გეოფიზიკური ანომალიები, რაც პირდაპირი შედეგია გარე ზემოქმედებისა, რომელიც ზრდის თერმული ენერგიას პლანეტის ბირთვის რეგიონში. თუმცა, არსებული ვითარება რადიკალურად განსხვავდება წინა პერიოდისგან: 2024 წლის ბოლოს პლანეტა შევიდა პლანეტის ბირთვზე გაზრდილი ენერგეტიკული ზემოქმედების ფაზაში. ხოლო, გათვლებით, 2030 წლისთვის ის მაქსიმალურ ფაზას მიუახლოვდება.

სიტუაციის გამწვავების კრიტიკული ფაქტორია გლობალური ოკეანის დაბინძურება ანთროპოგენური ფაქტორების, მათ შორის ნახშირწყალბადების, მიკრო და ნანოპლასტიკების გამო. ამ ანთროპოგენურმა ფაქტორმა მნიშვნელოვნად შეცვალა ოკეანის წყლის თბოგამტარობის თვისებები, არღვევს მის უნარს, ეფექტურად ამოიღოს სითბო დედამიწის შიგნიდან. ოკეანე, რომელიც ისტორიულად პლანეტის მთავარი თერმორეგულატორი იყო, დაკარგა სითბოს გამტარი ფუნქციის მნიშვნელოვანი ნაწილი. ეს იწვევს მანტიაში თერმული ენერგიის არანორმალურ დაგროვებას, რაც იწვევს მის ინტენსიურ დნობას, ვიდრე ოდესმე დედამიწის ისტორიაში.

გეოფიზიკური კვლევები აჩვენებს ღრმა ფოკუსის მიწისძვრების რაოდენობის უპრეცედენტო ზრდას, რაც მანტიის აქტიური დნობის პირდაპირი მაჩვენებელია. გამდნარი მაგმა, მოცულობის გაზრდით, ქმნის კოლოსალურ წნევას დედამიწის ქერქზე. ეს პროცესი შეიძლება შევადაროთ ბუშტის თანდათანობით გაბერვას – რაღაც მომენტში წნევა გადააჭარბებს გარსის სიმტკიცის ზღვარს.

ციმბირის რეგიონი განსაკუთრებით დაუცველია ამ პროცესების მიმართ მისი სპეციფიკური გეოლოგიური სტრუქტურის გამო: სწორედ აქ ამოდის მძლავრი მაგმატური პლუმი - მდნარი მანტიის მასალის აღმავალი ნაკადი, რომელიც გამოწვეულია ბირთვის ამ მიმართულებით 1997-1998 წლებში გადაადგილებით. ციმბირში ტემპერატურის ანომალიების ზრდა აჩვენებს, რომ მაგმის მოცულობა ციმბირის კრატონის ქვეშ აგრძელებს ექსპონენტურად ზრდას. გეოლოგიურ მონაცემებზე და თანამედროვე დაკვირვებებზე დაყრდნობით, მაღალი დარწმუნებით შეიძლება ითქვას, რომ ციმბირის პლუმი ამოფრქვევისთვის მზადყოფნის კრიტიკულ ფაზაშია.

განსაკუთრებით შემაშფოთებელია ის ფაქტი, რომ ციმბირის პლუმის პარალელურად, კრიტიკული ვითარება მარიანას თხრილის ტერიტორიაზე. ეს არის ოკეანის ფსკერის ყველაზე ღრმა წერტილი, სადაც ქერქი ყველაზე თხელი და დაუცველია. აქაც

მატულობს ცხელი მაგმა, რის შედეგადაც აღინიშნება სეისმური აქტივობის მნიშვნელოვანი ზრდა. ამ ადგილას არსებობს ოკეანის ფსკერის დაშლის რეალური საფრთხე და პლანეტის სიკვდილის სცენარი.

არსებობს ორი შესაძლო სცენარი, თუ როგორ განვითარდება მოვლენები. პირველი არის ციმბირის პლუმის რღვევა, რომელიც შეიძლება მოხდეს ნებისმიერ მომენტში მაგმის მზარდი წნევის გამო. მეორე არის მარიანას თხრილში დედამიწის ქერქის რღვევა, რომელიც შესაძლოა წინ უსწრებდეს ციმბირის კატასტროფას. ციმბირის პლუმი მხოლოდ მაშინ არ აფეთქდება, თუ ჯერ მარიანას თხრილი აფეთქდება. მარსის გეოლოგიური ისტორია გვიჩვენებს ასეთი სცენარის შესაძლო შედეგებს: მარინერის აუზი რჩება მუნჯი მოწმე ასეთი კატასტროფისა, როდესაც ოკეანის ქვეშ პლუმის გარღვევამ გამოიწვია გლობალური შედეგები მთელი პლანეტისთვის.

გეოფიზიკური აქტივობის ზრდის ამჟამინდელი ტენდენციების გათვალისწინებით გათვლების მიხედვით, მარიანას თხრილის გარღვევის კრიტიკულ წერტილამდე 2036 წლისთვის შეიძლება

მიაღწიოს. თუმცა, მნიშვნელოვანია გვესმოდეს, რომ ეს პერიოდი პირობითია. ციმბირში დედამიწის ქერქმა შესაძლოა გაცილებით ადრე ვერ გაუძლოს მზარდ წნევას. მიმდინარე მოვლენებიდან გამომდინარე, ციმბირის პლუმის გარღვევა ან დედამიწის ქერქის რღვევა მარიანას თხრილში, როგორც ჩანს, გარდაუვალი შედეგია იმ პროცესებისა, რომლებიც ხდება დედამიწის წიაღში. ერთადერთი გაურკვევლობა კატასტროფის ზუსტ დროსა და ადგილზეა, მაგრამ არა თავად მისი მოახლოების ფაქტზე.

შემდეგ, ჩვენ განვიხილავთ სამ შესაძლო სცენარს მოვლენების განვითარებისთვის ციმბირის პლუმზე. პირველი სცენარი არის ციმბირის პლუმის ერთჯერადი ამოფრქვევა. მოხდება ციმბირის პლუმის მოულოდნელი, ერთჯერადი გარღვევა. მეორე სცენარი არის ციმბირის პლუმის თანდათანობითი ამოფრქვევა. ლავის ნელი და თანდათანობითი ამოფრქვევა ციმბირში, ციმბირის ბილიკების ფორმირების მსგავსი. მესამე სცენარი არის დაგეგმილი კონტროლირებადი დეგაზაცია. შესაძლებელია, თუ კაცობრიობა მიიღებს აუცილებელ ზომებს დედამიწის ქერქში ციმბირის პლუმის მეორადი მაგმატური ცენტრების დეგაზაციისთვის.

სცენარი 1.

ციმბირის პლუმის ერთდროული ამოფრქვევა

ციმბირის პლუმის ერთჯერადი ამოფრქვევის შედეგად მოსალოდნელი ზიანის შესაფასებლად, შეიძლება მივმართოთ გეოლოგიური ისტორიის მაგალითებთან შედარების მეთოდს. თუმცა, გასათვალისწინებელია, რომ მსგავსი პირობები, რომლებიც ამჟამად არსებობს დედამიწაზე, კერძოდ, უძლიერესი 24000-წლიანი ციკლის დამთხვევა და „პლანეტის მთავარი გაგრილების სისტემის“ - ოკეანის ანთროპოგენური დაბინძურება, აქამდე არასოდეს ყოფილა. სწორედ ამ მიზეზით, ციმბირის პლუმის უეცარი რღვევა ითვლება ყველაზე სავარაუდო მოვლენად, თუ კაცობრიობა არ გადადგამს ნაბიჯებს ამ გახეტქვის რისკების შესამცირებლად.

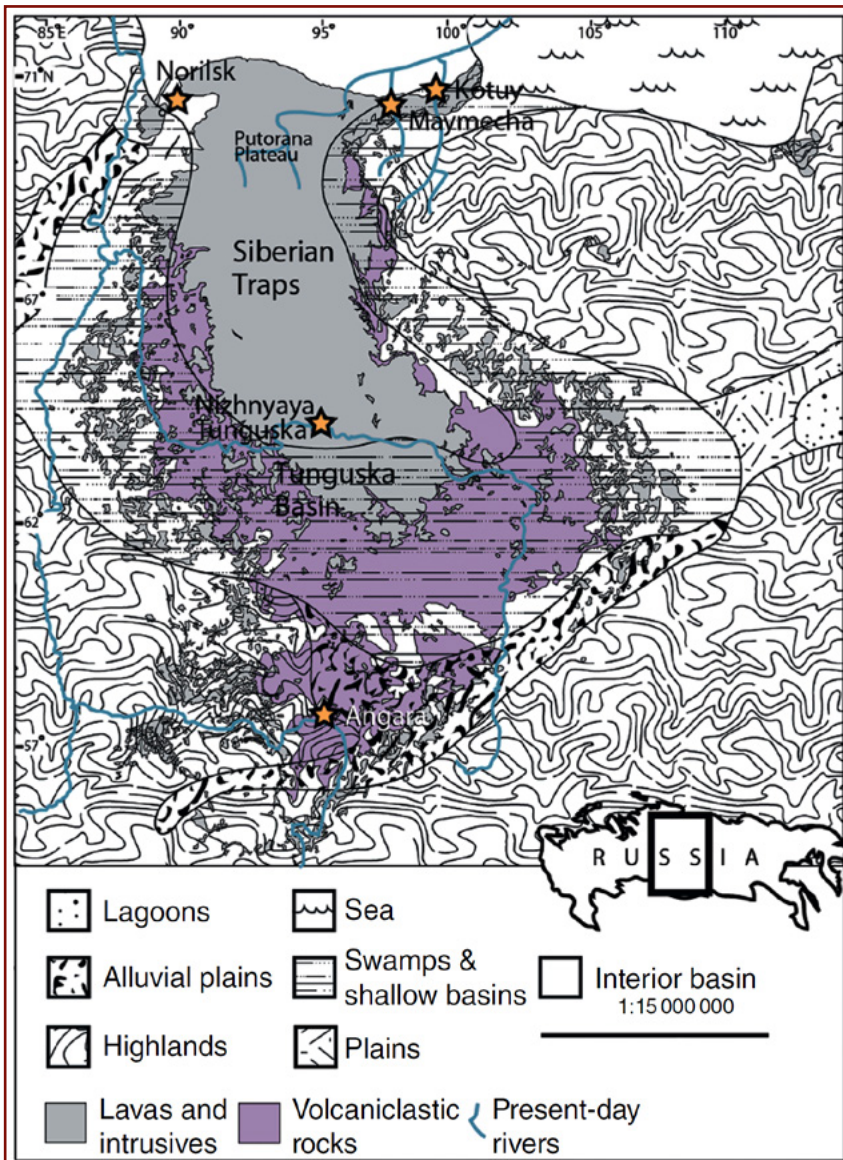
ამოფრქვეული მასალის მოცულობა გამოიყენება ვულკანური ამოფრქვევის სიმძლავრის შესაფასებლად. მაგალითად, 2,1 მილიონი წლის წინ იელოუსტონის სუპერვულკანის ერთ-ერთი ყველაზე ძლიერი ამოფრქვევის დროს, ამოფრქვეული მაგმის მოცულობა იყო 2500 კმ³, რაც დადგინდა ჩრდილოეთ ამერიკაში ტუფის საბადოების შესწავლის შედეგად.⁴⁷ ამ ამოფრქვევის დროს ფერფლისა და აირის გამონაბოლქვი 50 კმ სიმაღლემდე

გაიზარდა და მიაღწია სტრატოსფეროს ზედა საზღვარს. ამოფრქვევა შედარებული იყო ტობის სუპერვულკანის ამოფრქვევასთან კუნძულ სუმატრაზე, რომელიც მოხდა დაახლოებით 72,000–74,000 წლის წინ, რაც იყო ყველაზე ძლიერი ამოფრქვევა ბოლო 25 მილიონი წლის განმავლობაში.

ციმბირის ბილიკების ამოფრქვევისას დაახლოებით 250 მილიონი წლის წინ, ამოფრქვეული მასალის მოცულობამ, სხვადასხვა შეფასებით, შეადგინა 3-დან 4 მილიონ კმ³-მდე ლავა და ტუფი⁴⁸ (სურ. 77). ანუ, ციმბირის ბილიკების ამოფრქვევა იყო 1000-ჯერ მეტი ამოფრქვეული მასალის მოცულობით, ვიდრე ყველაზე ძლიერი ამოფრქვევა Yellowstone caldera-ს ან Toba სუპერვულკანი. ამრიგად, ციმბირის პლუმის პოტენციური ამოფრქვევის ერთჯერადი ბუნების გათვალისწინებით, მისმა გააქტიურებამ შეიძლება გამოიწვიოს ამოფრქვევა, რომლის სიმძლავრეც 1000-ჯერ აღემატება ცნობილ ისტორიულ მოვლენებს, როგორიცაა Yellowstone caldera ან Toba სუპერვულკანის ამოფრქვევა.

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

⁴⁸ 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>



ნახ.77.

ციმბირის ბილიკების პალეოგეოგრაფიის რუკა, რომელიც გვიჩვენებს ძირითადი ვულკანოკლასტური გამონაყარებისა და ადგილმდებარეობების მასშტაბებს. მალიჩის და სხვების (1974), ბლეკისა და სხვ. (1998).

წყარო: ბლეკი, ბ., მიტალი, ტ., ლინგო, ფ., ვალოვსკი, კ. გეოფიზიკური მონოგრაფიების სერიაში (ed. Ernst, R. E., Dickson, A. J. & Bekker, A.) 117–131 (Wiley, 2021). <https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch5>

ვარაუდობენ, რომ თუ ციმბირის პლუმის ერთჯე რადი გარღვევა მოხდება, ამოფრქვევა ფეთქებადი ხასიათის იქნება და ერთ კალდერას წარმოქმნის. ჰიპოთეზის თანახმად, ციმბირის პლუმის ამოფრქვევის კალდერას აქვს 75000 კმ² ფართობი, ასეთი ფართობის რადიუსი იქნება 150

კმ (ან, მაგალითად, 380 კმ 250 კმ-ზე). ციმბირის ბილიკების ამოფრქვევისას 250 მილიონი წლის წინ, ლავით დატბორილი ტერიტორიის ფართობი, ლიტერატურული მონაცემებით⁴⁹, 4-დან 7 მილიონ კმ²-მდე იყო⁵⁰. მსგავსი ტერიტორიები შესაძლოა ამჟერადაც დაზარალებს ამოფრქვევით.

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

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

მოსაზრება, რომ ლავის ნაკადები ვულკანურ ფენომენებს შორის ყველაზე დიდ საფრთხეს წარმოადგენს, არასწორია. სინამდვილეში, ნაცარი ხშირად ფატალური შედეგების მთავარი მიზეზია. სუპერვულკანებისთვის, რომლებიც ხასიათდებიან მაღალი ფეთქებადობით, მაგმის მნიშვნელოვან ნაწილს არ აქვს დრო, რომ გარდაიქმნას ლავაში. ამის ნაცვლად, ის ფრაგმენტდება აფეთქების შედეგად და წარმოქმნის ვულკანური ფერფლის უზარმაზარ ნაწილაკებს - ბასრი, დაკბილული მთის ქანების ცხელი ფრაგმენტები, რომლებიც ატმოსფეროში გადადის. შესუნთქვისას ეს ფერფლი წარმოქმნის ცემენტის მსგავს ნარევს ადამიანის ფილტვებში, რის შედეგადაც გარდაუვალი სიკვდილია.

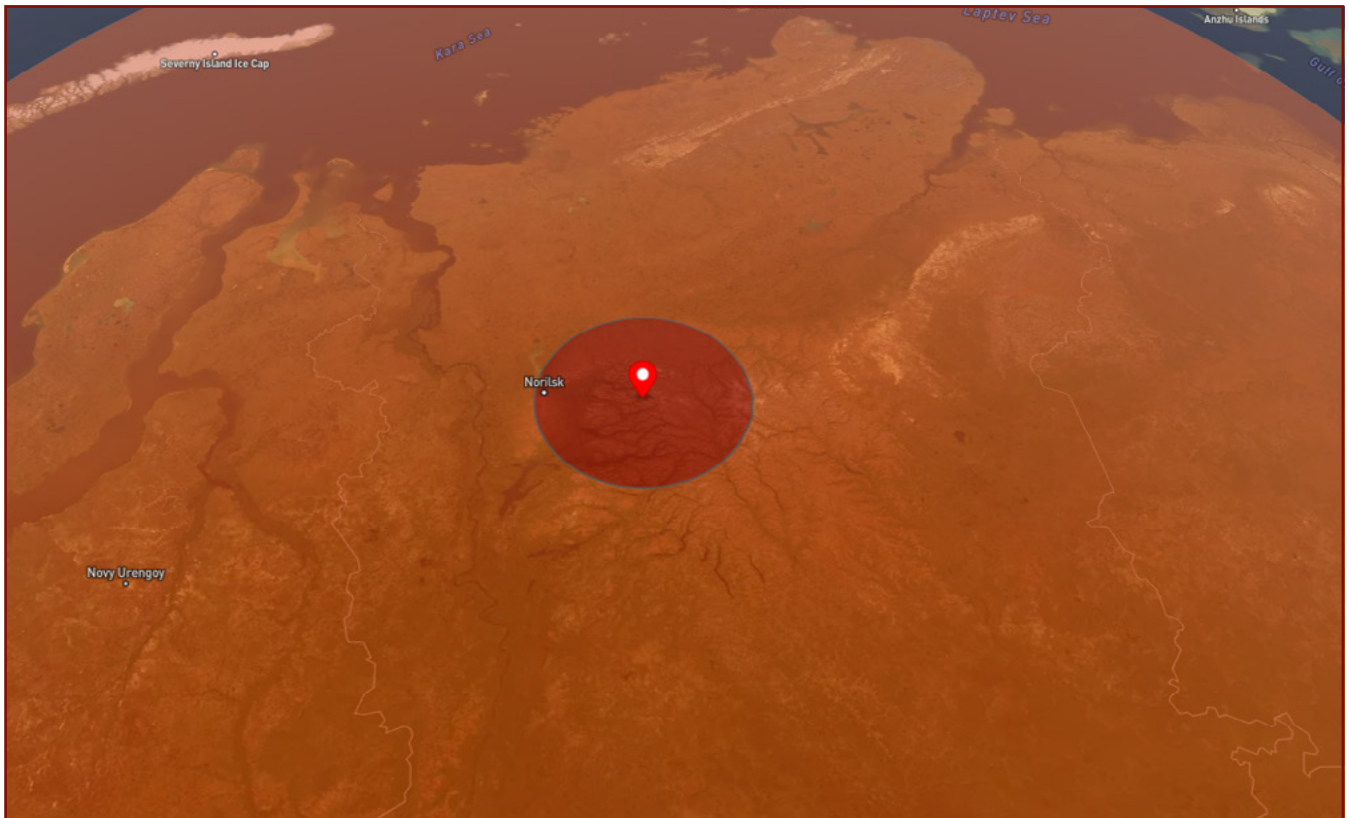
ვარაუდობენ, რომ ციმბირის პლუმის ამოფრქვევის დროს, ასეთი ცხელი ფერფლის გადაადგილების რადიუსი იქნება დაახლოებით 9000 კმ, ანუ ის მოიცავს დაახლოებით 255 მილიონი კმ² ფართობს. ვინაიდან დედამიწის მთელი ზედაპირის ფართობი 510 მილიონ კმ²-ზე ოდნავ მეტია, ფერფლის განადგურების რადიუსი, რომლის ჩასუნთქვაც არ შეიძლება, დაფარავს პლანეტის ნახევარს: ეს ტერიტორია იქნება დედამიწის ზედაპირის დაახლოებით 50%.

ამრიგად, ციმბირის პლუმის ერთდროული გარღვევის შემთხვევაში მოსალოდნელია სამი ლეტალური რადიუსი.

გავლენის პირველი (ცენტრალური) ზონა

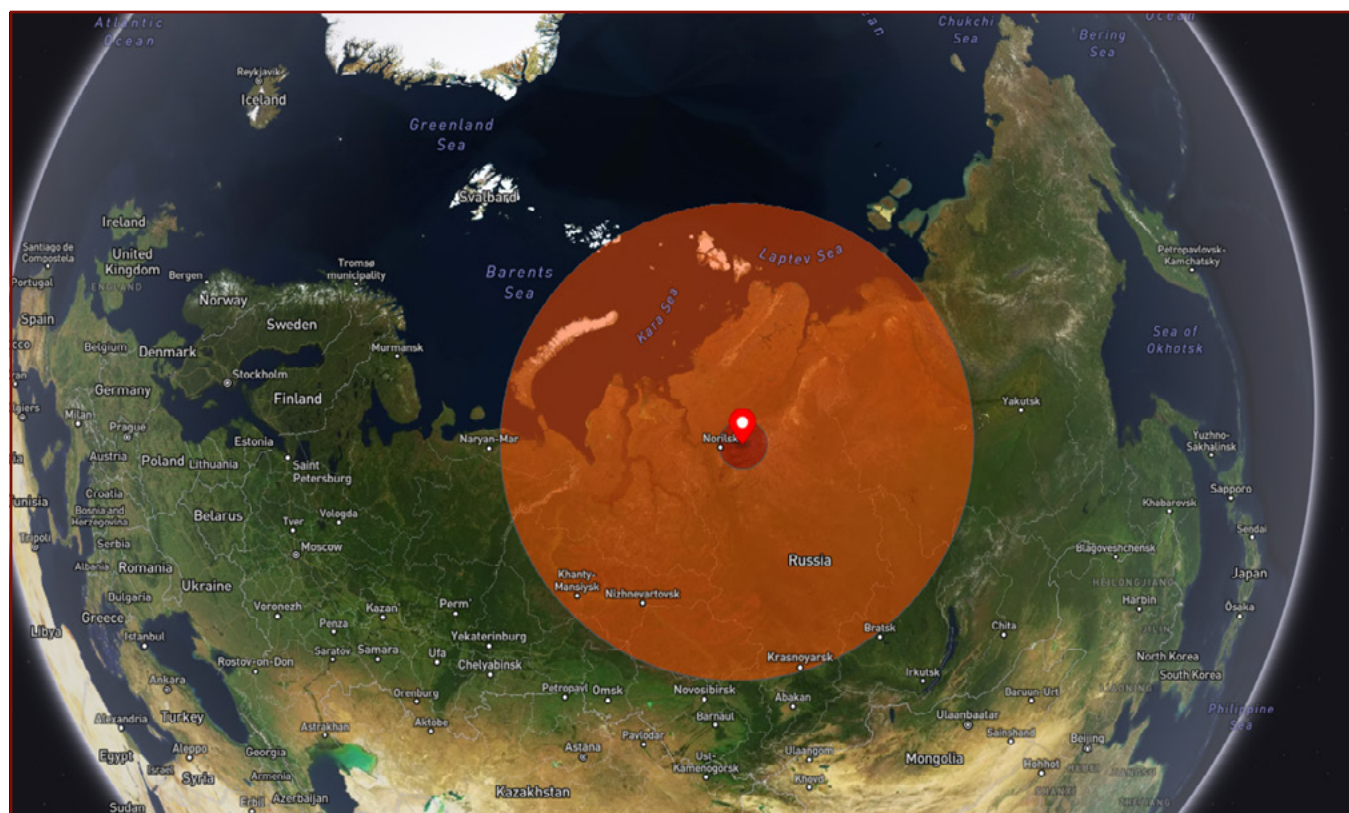
ეს ტერიტორია 150 კმ რადიუსით, ცენტრით პუტორანას პლატოს ჩრდილო-დასავლეთ ნაწილში, სადაც მოსალოდნელია კალდერას წარმოქმნა (სურ. 78). ამ ზონაში შედის ქალაქები ნორილსკი, დუდინკა და ტალნახი კრასნოიარსკის მხარე. როდესაც პლუმი გააქტიურდება ამ ზონაში, ყველა ობიექტი მყისიერად განადგურდება ამოფრქვევის საწყის ფაზაში დარტყმითი ტალღის და ცხელი პიროკლასტური ნაკადების გამო.

გავლენის მეორე ზონა (რადიუსი 1500 კმ) ეს ლავისა და მძიმე ვულკანური მასალების გავრცელების არეალი (ნახ. 79). იგი მოიცავს ჩრდილოეთ ციმბირის უზარმაზარ ტერიტორიებს, მათ შორის იამალო-ნენეცის ავტონომიური ოკრუგის, ტაიმირის ნახევარკუნძულის, ხანტი-მანსის ავტონომიური ოკრუგის ნაწილს, კრასნოიარსკის მხარის ჩრდილოეთს, იაკუტიის დასავლეთ ნაწილს და რუსეთის ევროპული ნაწილის ჩრდილო-აღმოსავლეთს. ეს რადიუსი მოიცავს ისეთ დიდ ქალაქებს, როგორიცაა იგარკა, ნოვი ურენგოი, ნადიმი, სალესხარდი, ვორკუტა, ნარიან-მარი, მირნი, კოგალიმი, ლესოსიბირსკი, სურგუტი, კრასნოიარსკი, ხანტი-მანსიისკი, ტომსკი, ნიჟნევარტოვსკი. ამოფრქვევის პირველ საათებში ეს ტერიტორია დაექვემდებარება ცხელი გაზის, ფერფლისა და ლავის სწრაფ (700 კმ/სთ-მდე) ნაკადებს. ეს ნაკადები გაანადგურებს ყველა ცოცხალ არსებას და დაფარავს ტერიტორიას ვულკანური მასალების ძლიერი ფენით, დამარხავს ქალაქებს და ბუნებრივ რესურსებს.



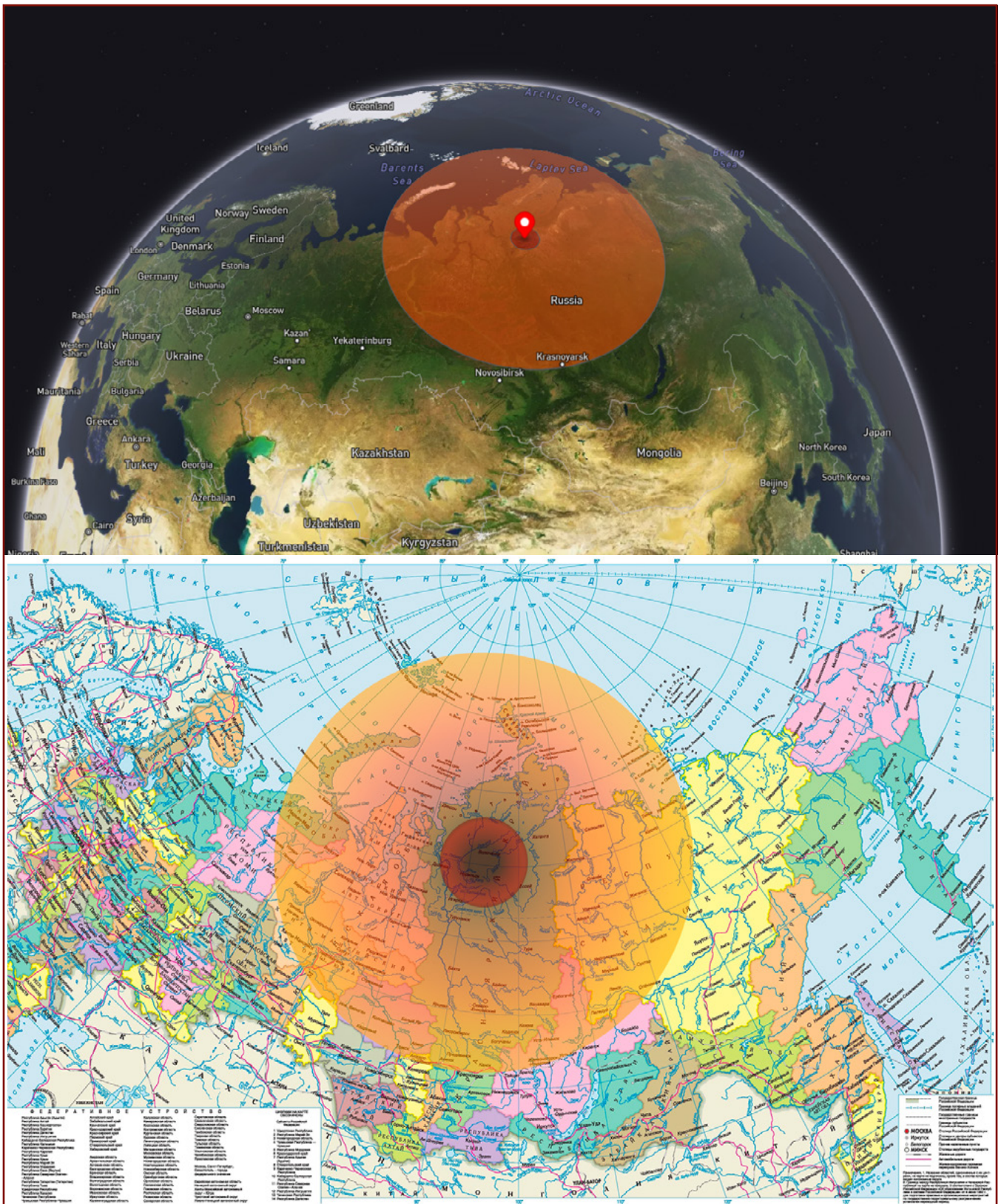
ნახ.78.

კალდერის ფორმირების ზონა წითლად არის ნაჩვენები, დაახლოებით 150 კმ რადიუსით.



ნახ.79.

ნარინჯისფერ ზონაში ჩანს ლავის დაღვრა და მძიმე პიროკლასტური ფრაქციების ამოფრქვევა - რადიუსი დაახლოებით 1500 კმ-ია.

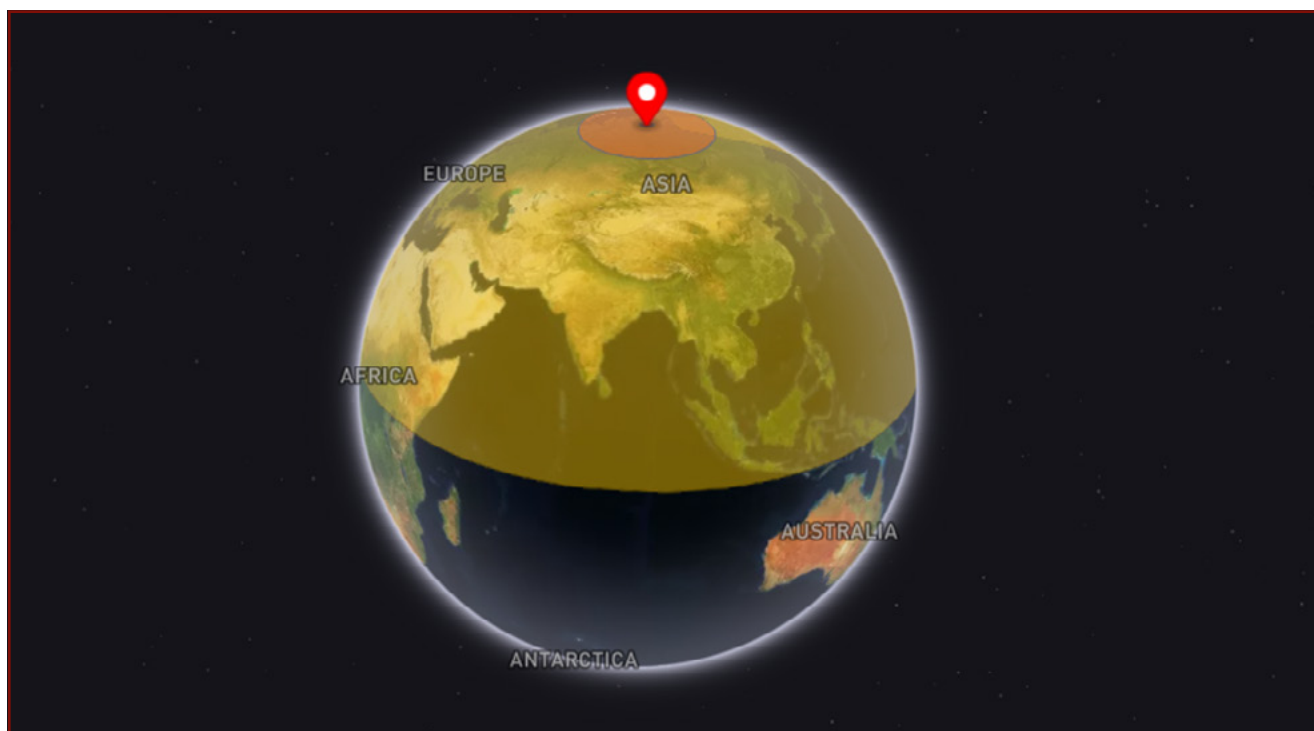


ნახ.79.

ნარინჯისფერ ზონაში ჩანს ლავის დაღვრა და მძიმე პიროკლასტური ფრაქციების ამოფრქვევა - რადიუსი დაახლოებით 1500 კმ-ია.

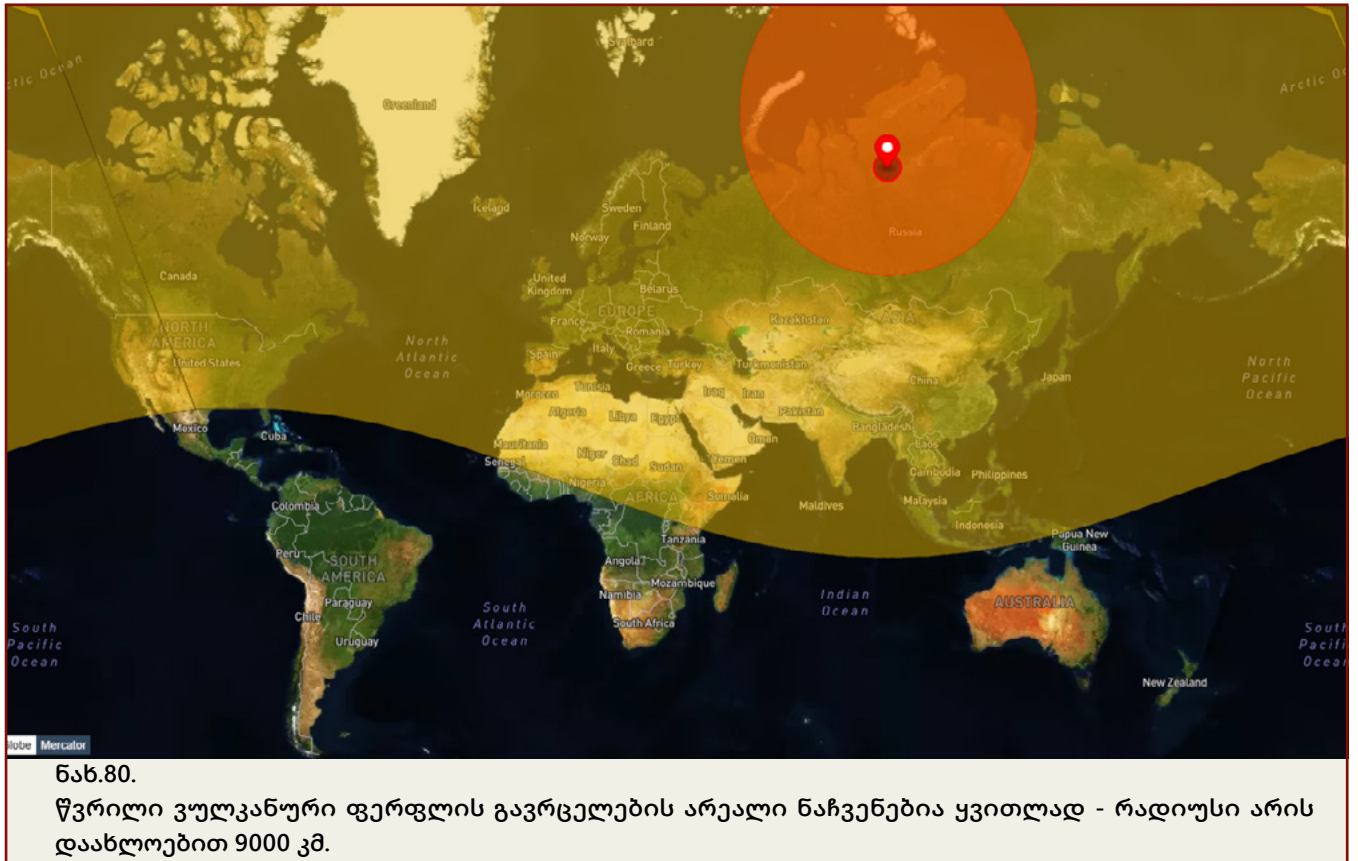
გავლენის მესამე ზონა (დაახლოებით 9000 კმ რადიუსით) ეს წვრილად გაფანტული პიროკლასტური მასალების და ვულკანური ფერფლის გავრცელების არეალი, რომელიც მოიცავს დედამიწის ზედაპირის დაახლოებით 50%-ს (ნახ. 80). საწყის ეტაპზე (ამოფრქვევიდან პირველ დღეს) რუსეთის ფედერაციის, კონტინენტური აზიის, ევროპის,

არაბეთის ნახევარკუნძულის, აფრიკის კონტინენტის ჩრდილოეთ ნაწილისა და ჩრდილოეთ ამერიკის ტერიტორიები ექვემდებარება ფერფლის ემისიების მაქსიმალურ ზემოქმედებას. მომდევნო 7-10 დღის განმავლობაში ფერფლის მასები გავრცელდება ავსტრალიის კონტინენტზე, სამხრეთ ამერიკასა და ანტარქტიდაზე.



ნახ.80.

წვრილი ვულკანური ფერფლის გავრცელების არეალი ნაჩვენებია ყვითლად - რადიუსი არის დაახლოებით 9000 კმ.



გეოლოგიური პროცესების კვლევა აჩვენებს, რომ ციმბირის პლუმის გააქტიურება გამოიწვევს დამატებითი კატასტროფული მოვლენების მთელ სერიას. მოსალოდნელია ძლიერი დარტყმითი ტალღა, განსაკუთრებული სიმძლავრის მიწისძვრები (დაახლოებით 10 მაგნიტუდა), დესტრუქციული ცუნამის წარმოქმნა და დედამიწაზე სხვა ძირითადი ვულკანური სისტემების შესაძლო გაღვიძება. ამოფრქვევის დროს გამოთავისუფლებულ ენერგიას შეუძლია

ჯაჭური რეაქცია დაიწყოს, რაც გამოიწვევს სუპერვულკანების და დიდი ვულკანური უბნების გააქტიურებას პლანეტაზე. ეს დასკვნები ეფუძნება ენერგეტიკული პროცესების მათემატიკურ გამოთვლებს და მათ გავლენას დედამიწის ქერქზე.

შემდეგი, ჩვენ განვიხილავთ დამატებით რისკ-ფაქტორებს, რომლებიც საფრთხეს უქმნის კაცობრიობას ციმბირის პლუმის ერთჯერადი გარღვევის შედეგად.

დარტყმის ტალღა

ღია წყაროების თანახმად, იელოუსტოუნის სუპერვულკანის ამოფრქვევამ შეიძლება გამოუშვას დაახლოებით 900 000 მეგატონის ენერგია და გამოიწვიოს 11.2 მაგნიტუდის მიწისძვრა. ვინაიდან მაგნიტუდის შკალა ლოგარითმულია (თითოეული ერთეულის ზრდა ნიშნავს ენერგიის 32-ჯერ ზრდას), ციმბირის პლუმის ამოფრქვევა, რომელიც 1000-ჯერ უფრო ძლიერია, ვიდრე Yellowstone, შეიძლება გამოიწვიოს 13.2 მაგნიტუდის მიწისძვრა. ეს არის 350 000-ჯერ უფრო ძლიერი ვიდრე ყველაზე ძლიერი დაფიქსირებული მიწისძვრა - დიდი ჩილეს მიწისძვრა (მაგნიტუდა 9.5, 1960 წ.) - და შედარებულია დიდი ასტეროიდის დაცემასთან.

გამოთავისუფლებული ენერგია დაახლოებით 10^{24} J შექმნის მძლავრ დარტყმის ტალღას მსოფლიო მასშტაბით. ამოფრქვევის ცენტრში, წნევა იმდენად მაღალი იქნება, რომ ქანები მყისიერად აორთქლდება და ატმოსფეროს ზედა ფენებში გადაიყრება. ზეზგერითი დარტყმის ტალღა გამოიწვევს განადგურებას ათასობით კილომეტრის მანძილზე რამდენიმე წუთში, ტუნგუსკას

მეტეორიტის დაცემის მსგავსი, მაგრამ ბევრად უფრო ძლიერი.

ციმბირის ტაიგაში მასშტაბური ხანძარი გაჩნდება და ვრცელი ტერიტორიები ვულკანური ფერფლის სქელი ფენით დაიფარება. იქნება მუდმივი ყინვის სწრაფი დნობა ათასობით კილომეტრზე, რასაც თან ახლავს სათბურის გაზების გამოყოფა. ლანდშაფტი დაექვემდებარება ფართომასშტაბიან განადგურებას დედამიწის ქერქში არსებული ხარვეზების გააქტიურებით. სეისმური ტალღები მთელ პლანეტაზე გავრცელდება, რაც გამოიწვევს ახალ მიწისძვრებს 10 ბალზე მეტი მაგნიტუდის.

ასობით მეტრის სიმაღლის გიგანტური ცუნამი წარმოიქმნება არქტიკულ ოკეანეში, რომელიც საფრთხეს შეუქმნის რუსეთის, კანადის, გრენლანდიისა და სკანდინავიის სანაპიროებს. მეორადი ცუნამი დაატყდება თავს ინდონეზიის, იაპონიის, ავსტრალიის, ჩრდილოეთ და სამხრეთ ამერიკის სანაპიროებს. გლობალური ატმოსფერული არეულობა გამოიწვევს სუპერძლიერი ქარიშხლებისა და შტორმების წარმოქმნას.

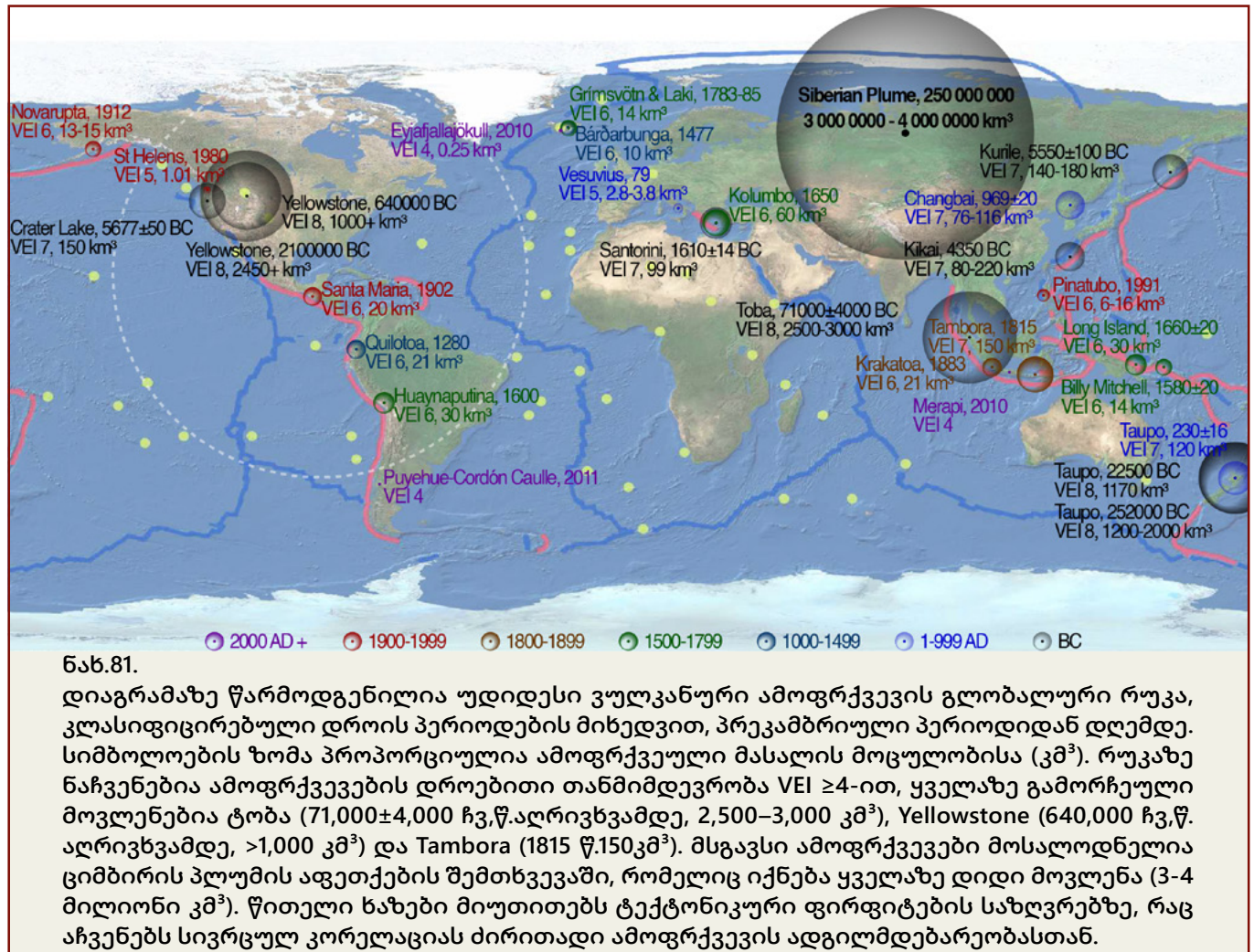
სუპერვულკანების და ვულკანური სისტემების გააქტიურება

ამოფრქვევის სეისმური ტალღები გავრცელდება არა მხოლოდ ჰაერში და დედამიწის ზედაპირზე, არამედ მანტიის სიღრმეშიც. ვინაიდან ყველა სუპერვულკანი ერთმანეთთან

დაკავშირებულია მანტიის გამდნარი ფენების მეშვეობით, ციმბირის პლუმის ამოფრქვევის შედეგად ასეთი სიძლიერის სეისმური ტალღები სავარაუდოდ გამოიწვევს სხვა სუპერვულკანების

ამოფრქვევის ჯაჭვურ რეაქციას პირველი დღის განმავლობაში (ნახ. 81). მოსალოდნელია უდიდესი ვულკანური სისტემების გააქტიურება, მათ შორის Yellowstone და Long Valley calderas

(ჩრდილოეთ ამერიკა), Phlegraean Fields (აპენინის ნახევარკუნძული), Toba (Sunda Archipelago), Aira (იაპონიის კუნძულები) და Taupo ვულკანური კომპლექსი (ახალი ზელანდია).



სუპერვულკანების გარდა, წყნარი ოკეანის ცეცხლოვანი რკალის და სხვა სეისმურად აქტიური ტერიტორიების გასწვრივ, სავარაუდოდ, ამოიფრქვევა მრავალი ვულკანი. დიდია ვულკანური აქტივობის განახლების ალბათობა ისეთ ვულკანებზე, როგორიცაა ფუჟიამა (იაპონია), კრაკატოა და მერაპი (ინდონეზია), ვეზუვიუსი და ეტნა (იტალია), პოპოკატეპეტლი (მექსიკა), კამჩატკას ვულკანური ჯგუფები, ანდების და ალასკანის ვულკანური სარტყელი, აგრეთვე ყინულის ქვეშა ვულკანური

სარტყლები. მოსალოდნელია ხანგრძლივად მიძინებული ვულკანური სტრუქტურების ხელახალი გააქტიურება, მათ შორის არარატის სტრატოვულკანი (ანატოლიის პლატო), ელბრუსის ვულკანური მასივი (კავკასიის რეგიონი), ლაახერის ვულკანი (ცენტრალური ევროპა), კილიმანჯარო და ნიირაგონგო სტრატოვულკანები (აღმოსავლეთ აფრიკის რიფტის ვულკანური სისტემა) და აღმოსავლეთ აფრიკის ვულკანური სისტემა.

მჟავა წვიმა

ვულკანური ფერფლისა და გოგირდის დიოქსიდის კატასტროფული გამონაბოლქვი ამოფრქვევის შედეგად გამოიწვევს ნალექებს მთელს პლანეტაზე მჟავა წვიმის სახით. ემისიების მასშტაბის საილუსტრაციოდ განვიხილოთ 630 000 წლის წინ იელოუსტონის სუპერვულკანის ამოფრქვევა, რომელმაც ატმოსფეროში გამოუშვა დაახლოებით 500 მეგატონა გოგირდის დიოქსიდი. ციმბირის პლუმის ჰიპოთეტური ამოფრქვევის სიმძლავრემდე ამ მონაცემების მასშტაბირება ვარაუდობს გოგირდის დიოქსიდის ემისიის მოცულობას დაახლოებით 1,500,000 მეგატონს (ან $1,5 \times 10^{12}$ ტონას), რაც დაახლოებით მილიონჯერ აღემატება ტამბორას ემისიას 1815 წელს („წელი ზაფხულის გარეშე“). ხაზგასმით უნდა აღინიშნოს, რომ ეს გაანგარიშება არ ითვალისწინებს ემისიებს სხვა ვულკანებიდან, რომლებიც შეიძლება გააქტიურდეს ჯაჭვური რეაქციის ფარგლებში.

გოგირდის დიოქსიდის ემისიების ასეთი კონცენტრაცია გამოიწვევს სტრატოსფეროში აეროზოლური ნაწილაკების გლობალურ წარმოქმნას, რომლებიც თანდათანობით გამოირეცხება ატმოსფეროდან ათწლეულების განმავლობაში მჟავა წვიმის სახით. მჟავა ნალექის ძირითადი პერიოდი კლიმატური პროცესებისა და ატმოსფერული ცირკულაციის მიხედვით, პროგნოზირებულია 3-დან 10 წლამდე. ასეთი გამონაბოლქვის ეპიცენტრთან უფრო ახლოს მდებარე რეგიონები, როგორიცაა თანამედროვე ციმბირი,

დაექვემდებარება ნალექებს 1,5-ზე ნაკლები pH-ით, რაც მსგავსია განზავებული გოგირდმჟავასი. ეს გაანადგურებს მცენარეულობას, მათ შორის ფესვებს, ფოთლებსა და ტოტებს, ასევე გამორეცხავს მინერალებს ნიადაგიდან, რაც მას სიცოცხლისთვის შეუთავსებელს გახდის. წყლის ეკოსისტემები ასევე გახდება ძალიან მჟავა, წყალ საცავები გადაიქცევა მჟავა ტბებად, pH 2–3, რაც მათ ტოქსიკურს გახდის სიცოცხლის უმეტესი ფორმებისთვის. გარდა ამისა, წყალმომარაგებაში შესული მჟავა სასმელ წყალს უვარგისს გახდის კომპლექსური ფილტრაციის გარეშე. ინფრასტრუქტურა, მათ შორის ცემენტის, მარმარილოსა და ლითონებისგან დამზადებული შენობები, დაექვემდებარება დაჩქარებულ კოროზიას სულფატური ნაერთების ზემოქმედებით.

თუმცა, მჟავა წვიმის მაქსიმალური კონცენტრაცია გაგრძელდება ამოფრქვევის შემდეგ მხოლოდ პირველი თვეების განმავლობაში, რის შემდეგაც ნალექი თანდათან ლოკალიზდება გარკვეულ რეგიონებში. ვულკანური ზამთრის დაწყებასთან ერთად ნალექების უმეტესი ნაწილი გადაიქცევა თოვლში, რაც შეამცირებს მჟავა დატვირთვას ეკოსისტემებზე, მაგრამ ამ დროისთვის მჟავა ნალექებით გამოწვეული ფლორისა და ფაუნის გლობალური განადგურება უკვე შეუქცევადი იქნება. ეკოსისტემების დაზიანება შესამჩნევ გავლენას მოახდენს ბუნებრივ და ანთროპოგენურ პროცესებზე გლობალური გაგრილების დაწყებამდე დიდი ხნით ადრე.

ვულკანური ზამთარი

ციმბირის პლუმის ამოფრქვევის ერთობლივი ზემოქმედება, რამდენიმე ვულკანის ერთდროულად გააქტიურებასთან ერთად, ექნება კოლოსალური კატასტროფული ეფექტი, რაც გამოიწვევს გლობალური კლიმატური და გარემო პირობების ცვლილებას. ვულკანური ფერფლის, გაზების (განსაკუთრებით გოგირდის დიოქსიდის - SO_2) და აეროზოლების ფართომასშტაბიანი გამონაბოლქვი ატმოსფეროში ათწლეულების განმავლობაში მზის სხივისთვის გადაულახავ ბარიერს შექმნის.

სულფატის აეროზოლების მაღალი კონცენტრაცია სტრატოსფეროში აირეკლავს მზის რადიაციის უმეტეს ნაწილს, რაც გამოიწვევს პლანეტის ენერგეტიკული ბალანსის დარღვევას. მოსალოდნელია სითბოს შეყვანის მკვეთრი შემცირება, რაც გამოიწვევს კლიმატის ექსტრემალურ გაგრილებას, მდგომარეობას, რომელიც შეიძლება შეფასდეს, როგორც "ჰიპერვულკანური ზამთარი". ასეთი პროცესების შედეგად დედამიწა გადაიქცევა „ყინულის ბურთად“, სადაც სიცოცხლის შენარჩუნების პირობები შენარჩუნდება მხოლოდ შეზღუდულ რეგიონებში, ძირითადად ეკვატორულ ზონაში.

პოტენციური ზემოქმედების შეფასება ეფუძნება მნიშვნელოვანი ამოფრქვევის ისტორიულ მონაცემებს. მაგალითად, იელოუსტონის მაქსიმალური ამოფრქვევის დროს 2,1 მილიონი წლის წინ, პლანეტის ტემპერატურა დაეცა საშუალოდ 3-5 °C-ით. გათვლებით,

ციმბირის პლუმის ამოფრქვევისას, რომლის მასშტაბები აღნიშნულ მოვლენაზე მრავალჯერ აღემატება, დედამიწაზე საშუალო ტემპერატურა ~24-31 °C-ით დაეცემა. პოლარულ ზონებში, მოსალოდნელია, რომ ტემპერატურა დაეცემა 28-36 °C-მდე ან მეტზე, რაც გამოიწვევს ძირითადი წყლის ობიექტების სრულ გაყინვას, მათ შორის ჩრდილო ატლანტის და წყნარი ოკეანის დიდ ტერიტორიების. შუა განედებზე ტემპერატურის ვარდნა 24-31°C-ით იქნება, რაც გაანადგურებს მთელ მცენარეულობას და გამოიწვევს ორგანიზმების მასობრივ სიკვდილს.

ოკეანის ეკოსისტემები მკვეთრად დარღვეული იქნება. გაყინვა დაიწყება ოკეანეების ზედაპირულ და სანაპირო ზონებში, რაც გამოიწვევს საზღვაო ბიოტას გადაშენებას გლობალურ დონეზე. ეკვატორულ რეგიონებში ტემპერატურა 20-27°C-ით დაიკლებს, რაც ტროპიკულ ზონებსაც კი ზედმეტად ცივს გახდის სიცოცხლის შესანარჩუნებლად.

პრაქტიკულად მთელი მიწის ზედაპირი უნაყოფო გახდება გლობალური სიცივის, დაჩრდილვისა და ფოტოსინთეზის შეწყვეტის გამო. დარღვეული იქნება კვების ჯაჭვები, რაც გამოიწვევს სოფლის მეურნეობის კოლაფსს და მასობრივ გადაშენებას, როგორც ფლორისა და ფაუნის, ასევე კაცობრიობის დიდი ნაწილის. ექსტრემალურ პირობებთან ადაპტირებული ცალკეული მიკრობული ეკოსისტემები სიცოცხლისუნარიანი დარჩება.

გრძელვადიანი სტრატოსფერული სულფატის აეროზოლები ათწლეულების განმავლობაში გააგრძელებენ მზის შუქის დაბლოკვას. თუმცა „ჰიპერვულკანური ზამთრის“ ეფექტი გაცილებით დიდხანს შეიგრძნება. ფერფლისა და აეროზოლების დალექვის შემდეგაც კი, პლანეტას ასობით ან თუნდაც ათასობით წელი დასჭირდება

ბუნებრივი კლიმატისა და ეკოლოგიური ბალანსის აღდგენას ოკეანეების გაყინვის, მყინვარების წარმოქმნისა და ბიოსფეროში რადიკალური ცვლილებების გათვალისწინებით.

დასკვნები პირველი სცენარისტვის. ციმბირის პლუმის ერთდროული გარღვევა

ციმბირის პლუმის ერთდროული ამოფრქვევა იქნება კატასტროფული გეოლოგიური და კლიმატური მოვლენა, რომელიც გამოიწვევს გლობალურ ცვლილებებს ატმოსფეროში, ჰიდროსფეროში და ბიოსფეროში. პუტორანას პლატოზე მძლავრი აფეთქება მყისიერად გაანადგურებს ყველაფერს 150 კმ რადიუსში, წარმოქმნის გიგანტურ კალდერას, ხოლო პიროკლასტური ნაკადები და ლავა დაფარავს 1500 კმ რადიუსის ტერიტორიას და ციმბირს გადამწვარ უდაბნოდ აქცევს. პლანეტის ზედაპირის ნახევარი ფერფლის ფენით იქნება დაფარული. 13,2 მაგნიტუდის მიწისძვრა, რომელიც გამოიწვევს პლუმის აფეთქებით, წარმოქმნის დესტრუქციულ სეისმურ ტალღებს, რომლებიც გავრცელდება მთელ პლანეტაზე, გააქტიურებს რღვევის ხაზებს, მეორად მიწისძვრებს და მეგაცუნამებს ასობით მეტრის სიმაღლეზე, დატბორავს კონტინენტების სანაპირო ზონებს.

1,5 მილიონი მეგატონა SO_2 გამონაბოლქვი გამოიწვევს მყავა წვიმას

1,5-ზე დაბალი pH-ით, რაც გაანადგურებს ნიადაგებს, მცენარეულობას და წყლის ეკოსისტემებს. წყალსაცავები ცხოვრებისთვის უვარგისი გახდება, და მიწა სწრაფად დაკარგავს ნაყოფიერებას. ფოტოსინთეზისა და კვების ჯაჭვების დაშლა გამოიწვევს ფლორის, ფაუნის და, შესაბამისად, ადამიანის ცივილიზაციის მასობრივ გადაშენებას.

სუპერვულკანების მასიური გააქტიურება, მათ შორის Yellowstone, Campi Flegrei და Toba, გააუარესებს კლიმატის გლობალურ ცვლილებას ვულკანური ფერფლის, გოგირდის დიოქსიდის (SO_2) და აეროზოლების ემისიების გაზრდით. სტრატოსფეროში მათი დაგროვება დაბლოკავს მზის შუქს, რაც გამოიწვევს პლანეტის გაციებას („ჰიპერვულკანური ზამთარი“) და ტემპერატურის ათეულობით გრადუსით ვარდნას. პოლარულ რეგიონებში ტემპერატურა დაეცემა $28-36^{\circ}C$ -ით, ზომიერ რეგიონებში $24-31^{\circ}C$ -ით და ტროპიკებში $20-27^{\circ}C$ -ით, რაც გამოიწვევს ოკეანეების გაყინვას, ოკეანის ცირკულაციის შეჩერებას,

ეკოსისტემების დაშლას და გიგანტური მყინვარების წარმოქმნას ხმელეთზე.

„ჰიპერვულკანური ზამთრის“ ზემოქმედება დედამიწას პრაქტიკულად დაუსახლებელს გახდის და ბუნებრივი პირობების აღდგენას ათასობით-მილიონობით წელი

დასჭირდება. ეს მოვლენა იქნება ყველაზე დიდი გადაშენება პლანეტის გეოლოგიურ ისტორიაში.



სცენარი 2.

ციმბირის პლუმის თანდათანობითი ამოფრქვევა

ციმბირის პლუმის ამოფრქვევის მეორე სცენარი მოიცავს არა ერთიან აფეთქებას, არამედ გაზის ამოფრქვევების თანდათანობით სერიას და ლავის ნაკადებს რღვევებსა და დედამიწის ქერქის დასუსტებულ ზონებში. ეს პროცესი შეიძლება შევადაროთ ციმბირის ბილიკების ფორმირებას, რომელიც მოხდა პერმის პერიოდის ბოლოს 250 მილიონი წლის წინ იმავე რეგიონში.

ციმბირის ბილიკების პროვინციების ფორმირება ხმელეთის ვულკანიზმის ყველაზე დიდი გამოვლინება იყო. ამ დროს დედამიწამ განიცადა ყველაზე

დიდი ეკოლოგიური კატასტროფა თავის ისტორიაში - პერმია-ტრიასული მასობრივი გადაშენება, რომლის დროსაც გაქრა საზღვაო სახეობების 90%-მდე და ხმელეთის 70%-მდე (სურ. 82, 83).

გეოლოგიური მტკიცებულებები⁵¹ მიუთითებს, რომ ციმბირის ამოფრქვევები აღმოსავლეთ ციმბირის კრატონში შეიძლება იყოს უჩვეულოდ ფეთქებადი (Campbell et al. 1992), პიროკლასტური საბადოებით 800 მ სისქემდე (Khain 1985). აფეთქების სიმძლავრე იმდენად მაღალი იყო, რომ ზოგჯერ 10 კმ სიღრმიდან გამოჰყავდა დანალექი ქანები.



ნახ.82.
მხატვრის მიერ
გამოსახული
ამოფრქვევები ციმბირში
პერმის-ტრიასული
გადაშენების
მოვლენის დროს.

ილუსტრაცია: სურათი
ტიგრან ნშანიანის მიერ
შესრულებული

ნახ.83.
მხატვრის რენდერი:
ლისტროზავრი,
მასობრივი გადაშენება
გადარჩენილი, დომინირებს
განადგურებულ
ლანდშაფტზე,
რომელიც ასახავს
ცვალებად ეკოსისტემას
პერმის-ტრიასული
კრიზისის შემდეგ.

ილუსტრაცია: ხულიო
ლასერდა



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

ვულკანური აქტივობა რეგიონში რამდენიმე ეტაპად მიმდინარეობდა, რამაც რადიკალურად შეცვალა გეოლოგიური ლანდშაფტი. თავდაპირველად, მაგმამ შეაღწია დანალექ ფენაში და წარმოქმნა სხვადასხვა ინტრუზიული სხეულები, როგორიცაა ზღურბლები. შემდეგ ამოფრქვევის ბუნება შეიცვალა ფეთქებადად, რამაც გამოიწვია უზარმაზარი პიროკლასტური მასალის გათავისუფლება და ძლიერი ვულკანური საბადოების წარმოქმნა. ამ პროცესის კულმინაცია იყო ბაზალტის ლავის კოლოსალური მოცულობის გადმოღვრა, რომელიც ასობით ათასი კუბური კილომეტრია. ვულკანური ქანების მთლიანი მოცულობა, მათ შორის შეღწევა, პიროკლასტური საბადოები და ლავის ნაკადები, შეფასებულია დაახლოებით 3 მილიონი კმ³. მნიშვნელოვანია აღინიშნოს, რომ ეს მაჩვენებელი მხოლოდ დღემდე შემორჩენილ ქანებს ასახავს და დარწმუნებით შეიძლება ითქვას, რომ ამოფრქვევის საწყისი მასშტაბი გაცილებით დიდი იყო, მაგრამ მოგვიანებით ეროზიას დაექვემდებარა.

ციმბირის ხაფანგების ფორმირებამ გამოიწვია ნახშირორჟანგის (CO₂), გოგირდის დიოქსიდის (SO₂), წყალბადის ქლორიდის (HCl), და სხვა აქროლადი ნივთიერებების კოლოსალური გამონაბოლქვი. ამ გაზებმა მკვეთრად გაზარდა სათბურის ეფექტი და გამოიწვია ვულკანური ზამთრის შემდეგ სწრაფი დათბობა. ატმოსფეროში CO₂ კონცენტრაციამ მიაღწია 8000 ppm, რაც 20-ჯერ აღემატება თანამედროვე დონეს. შედეგად, ტროპიკული ზღვების ტემპერატურა 22-25 °C-დან 30 °C-მდე

გაიზარდა და ოკეანეებმა დაიწყეს მჟავიანობა, კლავდნენ ორგანიზმებს კარბონატული ჩონჩხებით.

გოგირდის საერთო ემისია იყო 7800 გიგატონამდე, ქლორი 8700 გიგატონამდე და ფტორი 13600 გიგატონამდე⁵².

ვულკანური ფერფლი და აეროზოლები ბლოკავდა მზის შუქს, არღვევდა ფოტოსინთეზს, იწვევდა ტყეების მასიურ განადგურებას და არღვევდა კვების ჯაჭვებს, რაც ამწვავებს როგორც მცენარეთა, ასევე ცხოველთა სახეობების გადაშენებას. იმდროინდელი ეკოლოგიური კრიზისი ემსახურება შესაძლო შედეგების მასშტაბის მტკიცებულებას ციმბირის პლუმის თანდათანობითი ამოფრქვევის შემთხვევაშიც კი.

კვლევის თანახმად, ამოფრქვევის პერიოდი, რომელიც დაიწყო 250 მილიონი წლის წინ, გამოწვეული იყო მანტიის პლუმის აწევით - მაგმის მძლავრი ნაკადი, რომელიც ამოდის დედამიწის სიღრმიდან თანამედროვე პუტორანას პლატოს მიდამოში. ამ სცენარის გამეორება დღეს გამოიწვევს უზარმაზარ ლავის პლატოების წარმოქმნას - პლანეტის ზოგიერთი უდიდესი გეოლოგიური წარმონაქმნი, რომელიც გაანადგურებს თითქმის მთელ სიცოცხლეს რამდენიმე ათასი კილომეტრის რადიუსში, რომელიც მოიცავს ციმბირს და მეზობელ რეგიონებს. გეოლოგიური ჩანაწერებიდან ჩანს, რომ მსგავსი კატასტროფები, რომელსაც თან ახლდა გადმოსხმა გიგანტური ბაზალტის ველების⁵³, განმეორებით ხდებოდა, ყოველ ჯერზე იწვევდა ფართომასშტაბიან მასობრივ გადაშენებას (სურ. 84).

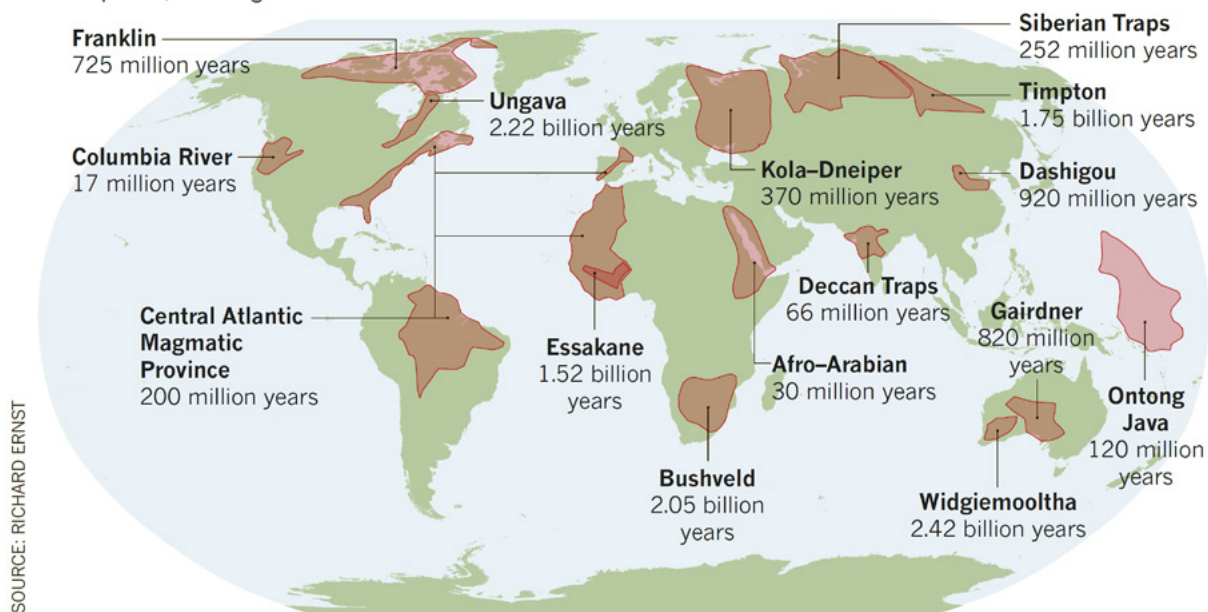
⁵²Benjamin A. Black, Linda T. Elkins-Tanton, Michael C. Rowe, Ingrid Ukstins Peate, Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps, Earth and Planetary Science Letters, Volumes 317–318, 2012, Pages 363–373, ISSN 0012-821X, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001>

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

EARTH'S BIGGEST ERUPTIONS

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

■ Eruptions, showing extent of lava flow



ნახ.84.

სურათზე ნაჩვენებია დედამიწის ისტორიაში უდიდესი ვულკანური ამოფრქვევის რუკა, სადაც ნაჩვენებია ამ მოვლენების შედეგად წარმოქმნილი ლავის პლატოების გეოგრაფიული მდებარეობა და ასაკი.

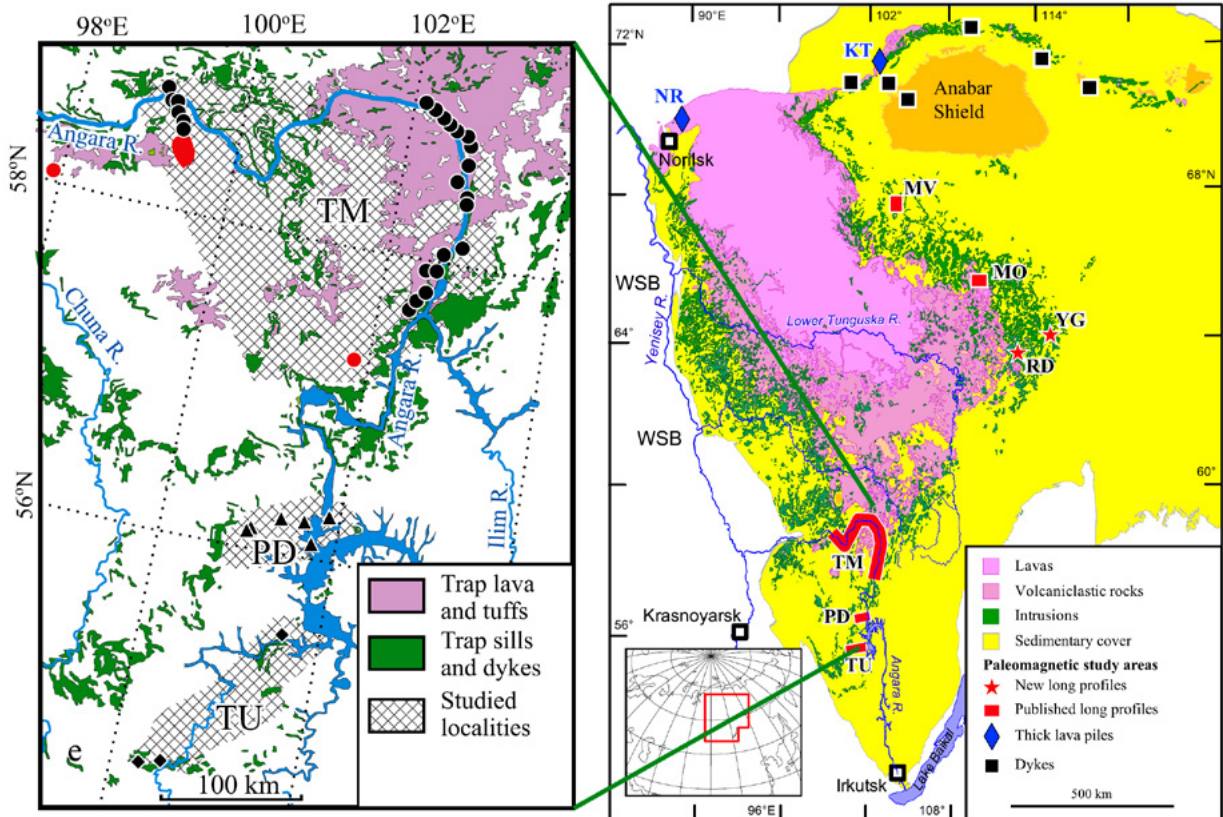
ილუსტრაცია: რიჩარდ ერნსტი

წყარო: Witze, ა. გამოვლინდა დედამიწის დაკარგული ისტორია პლანეტების ცვლის ამოფრქვევების შესახებ. Nature 543, 295–296 (2017).

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

როგორც წინა გეოლოგიურ ეპოქაში, მაგმა ამოვა მანტიიდან და შეაღწევს დედამიწის ქერქის ბზარებში, ისევე როგორც რბილი ნივთირება მკვრივი ფილტრისგავლით. ეს პროცესი გამოიწვევს ზედაპირის გადახურებას, მრავალი ქერქშიდა მაგმის შეჭრის წარმოქმნას და ლითოსფეროს დნობას. ნახაზი 85 გვიჩვენებს ციმბირში გაფანტული ქანების განაწილებას: ლავის ნაკადები ნაჩვენებია

მეწამულში, ხოლო მაგმატური სხეულები, რომლებიც გამაგრებულია დედამიწის ქერქში, მწვანეში. რუკაზე მწვანე უბნები გვიჩვენებს, თუ როგორ შეაღწია მაგმამ, დედამიწის ქერქის ეროზიით, ბზარებში და შეაღწია ამ დასუსტებულ ზონების გასწვრივ. მაგმას ასეთმა გაზრდილმა წნევამ შეიძლება კვლავ გამოიწვიოს მსგავსი პროცესი.



ნახ.85.

მარჯვნივ: ციმბირის ბილიკების პროვინციის მიმოხილვის რუკა (გამარტივებული და შეცვლილი Svensen et al., 2009 წ.). მიმოხილვის რუკაზე ნაჩვენებია ძირითადი გეოლოგიური სტრუქტურები სხვადასხვა ფერებში: ლავის ნაკადები ნაჩვენებია ვარდისფრად, ინტრუზიული სხეულები მწვანეში და დანალექი საფარი ყვითლად. მარცხნივ: ნახატის მარცხენა მხარეს დეტალური რუკა გვიჩვენებს ნაფანგის მაგმატიზმის განაწილებას: ლავები და ტუფები გამოსახულია მეწამულში, ზღურბლები და დიურები მწვანეში.

წყარო: Konstantinov, K. M., Bazhenov, M. L., Fetisova, A. M., & Khutorskoy, M. D. (2014). ბილიკების შეჭრის პალეომაგნეტიზმი, აღმოსავლეთ ციმბირი: შედეგები ბაზალტის დატბორვისა და ბიოსფეროს პერმო-ტრიასული კრიზისის შესახებ. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 242–253.

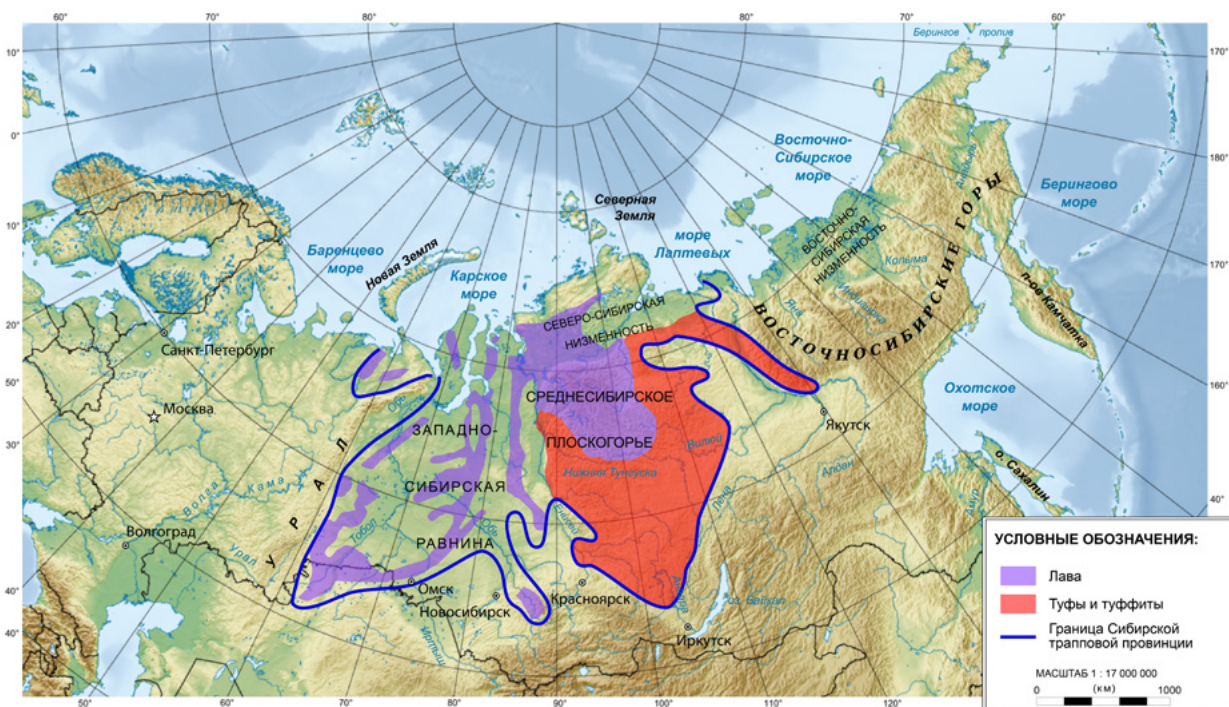
თანდათანობითი ამოფრქვევის სცენარი შედარებულია ციმბირის პლუმის ერთჯერად აფეთქებასთან, მაგრამ დროთა განმავლობაში გადაჭიმულია. ეს შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ვულკანების სერია, რომელიც ყოველ კვირას იფეთქებს, უეცარ ბზარებთან ერთად, რომლითაც ბაზალტის ლავები გადმოედინება დასავლეთ ციმბირში. რუკაზე (სურ. 86) ლავის ნაკადების უბნები მონიშნულია მეწამულში. აღმოსავლეთ ციმბირის პლატფორმის უფრო მკვირივი და სტაბილური ქერქის მიდამოში ლავები გავრცელდა, ხოლო დასავლეთ ციმბირის

ტერიტორიაზე, რომელიც ხასიათდება უფრო თხელი, ახალგაზრდა და ჰეტეროგენული ქერქით, ამოფრქვევები მოხდა წაგრძელებული დეპრესიების ან ნაპრალების გასწვრივ. რუკაზე წითელი უბნები მიუთითებს ტუფის ზონებზე, რომლებიც შედგება ცემენტირებული პიროკლასტური ნამსხვრევებისა და ფერფლისგან.

უნდა აღინიშნოს, რომ ამოფრქვევები აღმოსავლეთ და დასავლეთ ციმბირში განსხვავდება. აღმოსავლეთ ციმბირის ქვეშ, მაგმა ეჯახება მკვირვ არქეის

კრატონს, რაც ქმნის მნიშვნელოვან ბარიერს. როდესაც ის იზრდება, მაგმა "გამოჭამს" მასპინძელ ქანებს, გაცივდება და გაჯერებულია არასტაბილური კომპონენტებით, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ფეთქებადი ამოფრქვევები მაღალი ფერფლის გამონაბოლქვით

და მჟავე ბლანტი მაგმის შესაძლო წარმოქმნით. დასავლეთ ციმბირში, სადაც ქერქი თხელი და ახალგაზრდაა, ვარაუდობენ, რომ თხევადი ბაზალტის ლავების გავრცელება მოხდება.



ნახ.86.

ციმბირის ბილიკების პროვინციის რუკა. რუკაზე ნაჩვენებია ძირითადი გეოლოგიური სტრუქტურები, მათ შორის ლავის ნაკადების (იისფერი) და ტუფებისა და ტუფიტების (მარჯნის ფერი) ადგილები. ცისფერი ხაზები აღნიშნავს ციმბირის ბილიკების პროვინციის საზღვრებს.

წყარო: wikipedia.org, Masaitis-ის მიხედვით, 1983 წ.

ლავის ნაკადებითა და ტუფებით დაფარული ფართობი, სავარაუდოდ, დაახლოებით 7 მილიონი კმ² იქნება დასავლეთ და აღმოსავლეთ ციმბირში, რაც შედარებულია თანამედროვე ავსტრალიის ტერიტორიასთან. თუმცა, დეგრადაციის ქვეშ მყოფი ტერიტორიები, სავარაუდოდ, ათობით მილიონ კვადრატულ

კილომეტრს აღემატება. ეს ტერიტორიები დაექვემდებარება ფართომასშტაბიან ხანძრებს, ეროზიას მჟავა წვიმის, ფერფლის ჩამოვარდნის, მეწყერებისა და ვულკანური ნალექების შემცველი ღვარცოფებებს. ციმბირში ყველა მუდმივი ყინული დაექვემდებარება განადგურებას.

აღსანიშნავია, რომ ტაიმირის ნახევარკუნძულზე, პუტორანას პლატოს დასავლეთით, არის ნიკელის, სპილენძის და პლატინის ჯგუფის ლითონების მსოფლიოში უდიდესი საბადოები, რომლებიც შემუშავებულია ნორილსკის ნიკელის კომპანიის მიერ. ეს საბადოები მაგმური წარმოშობისაა და ჩამოყალიბდა დაახლოებით 250 მილიონი წლის წინ ციმბირის ბილიკების ცეცხლოვანი პროვინციის ამოფრქვევის დროს, რამაც ხელი შეუწყო უნიკალური მადნის გროვების ფორმირებას. იმდროინდელ მაგმებში ნიკელის მაღალი კონცენტრაცია, სავარაუდოდ, დაკავშირებული იყო დედამიწის ბირთვიდან ზედაპირზე

ნივთიერებების ამოღებასთან. ამჟამად ციმბირში შეინიშნება მაგმატური პლუმის ზრდა, რომლის აჩქარება გამოიწვია 1998 წელს ბირთვის გადაადგილებამ ტაიმირის ნახევარკუნძულის მიმართულებით, რომელიც დაადგინა მეცნიერებათა დოქტორმა იური ბარკინმა. უახლოეს მომავალში ციმბირის პლუმის გარღვევის მაღალი რისკია ქალაქ ნორილსკის მიდამოში, იმავე ადგილას, სადაც ეს მოხდა 250 მილიონი წლის წინ.

შემდეგ ჩვენ განვიხილავთ ამ სცენარის შედეგებს რუსეთისთვის და მსოფლიოსთვის.

ციმბირის პლუმის თანდათანობითი გარღვევის შედეგები რუსეთისთვის

არსებობს კვლევები, რომლებიც ზუსტად განსაზღვრავს ასთენოსფერული გამდნარი ლინზების მდებარეობას სამხრეთ ციმბირის ლითოსფეროში, რაც აიხსნება ამ რეგიონის თხელი ქერქით. თუმცა, ციმბირის ჩრდილოეთი ნაწილი სეისმურ რუქებზე პრაქტიკულად შეუსწავლელი რჩება, რაც წარმოადგენს „ცარიელ ადგილს“ ქვედა ქერქისა და მანტიის კვლევებში. ეს შეუძლებელს ხდის ლავის პირველი გარღვევისა და გაზით გაჯერებული მაგმების ამოფრქვევის ადგილების პროგნოზირებას, განსაკუთრებით ციმბირის პლუმის ზონაში წიაღის სრულფასოვანი მონიტორინგის არარსებობის გათვალისწინებით.

ცნობილია, რომ მოსალოდნელი

კატასტროფის პირველი ნიშნები იქნება უფრო ხშირი მიწისძვრები და ადგილობრივი გაზის გამონაბოლქვი დედამიწის ქერქის ციმბირის ბლოკის კიდეებზე. როგორც მაგმა მოძრაობს ზედაპირისკენ, მუდმივი ყინული დაიწყებს სწრაფად დნობას, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ინფრასტრუქტურის განადგურება გაყინულ ნიადაგებზე. ასევე, ნიადაგის გაცხელების შემდეგ შესაძლებელია გაზის ჰიდრატების აფეთქება (ყინულის სტრუქტურაში მეთანი), რაც გამოიწვევს დიდი კრატერების გაჩენას და დასახლებული უბნების განადგურებას. მასიური ხანძრები გარდაუვალი გახდება მეთანის გამოყოფის, ნიადაგის გადახურებისა და ვულკანური აირების

გამოყოფის გამო. ნახშირწყალბადების საბადოები ციმბირში და ქვანახშირის აუზები, როგორცაა კუზბასი, შეიძლება დაიწვას, როგორც ეს მოხდა პერმ-ტრიასულ პერიოდში⁵⁴, როდესაც ქვანახშირის საბადოები დაექვემდებარა თერმულ გათბობას 600 °C-მდე.

ამოფრქვევები დაიწყება მოულოდნელად, რომელიც მოიცავს ბევრ ადგილს ფართო ფართობზე. 7-8 მაგნიტუდის მიწისძვრები, ბზარები და ხარვეზები გამოიწვევს ლავის დაღვრას ასობით ათასი კვადრატულ კილომეტრზე. ლავის ნაკადების მიმდებარე ტერიტორიებზე მცენარეების, ცხოველების და ადამიანების მასიური სიკვდილი იქნება ტოქსიკური გამონახოლქვის გამო, რომელიც ქმნის შხამიან „კოქტეილს“ ატმოსფეროში. მილიონობით ადამიანი დაიღუპება პირველ დღეებში, ხოლო ვულკანური ფერფლი გაანადგურებს სატრანსპორტო კავშირებს, დაილექება გზებსა და ლიანდაგებზე, შეაფერხებს ხილვადობას და დაანგრევს ინფრასტრუქტურას. ავიაცია ასევე მთლიანად შეჩერდება თვითმფრინავებისა და ვერტმფრენების ძრავებისთვის ფერფლის საფრთხის გამო.

მუდმივი ყინულის დნობა კიდევ უფრო გაამწვავებს სიტუაციას: დაიწყება საკომუნიკაციო გზების, მილსადენების, შენობების და კომუნიკაციების ნგრევა. ბევრი ქალაქი დარჩება წყლის, საკვებისა და ელექტროენერგიის გარეშე, რაც გამოიწვევს ჰუმანიტარულ კრიზისს. მასობრივი ევაკუაცია შეუძლებელი იქნება ამოფრქვევის ზონის დიდ

ნაწილზე, რადგან ლავა, გაზები, ხანძარი და მჟავე წვიმა სატრანსპორტო მარშრუტებს გამოუსადეგარს გახდის. პანიკა მილიონობით ადამიანს დაატყდება თავს; ციმბირის მილიონობით მაცხოვრებლის ევაკუაცია გამოიწვევს სოციალურ არასტაბილურობას და მასობრივ არეულობას.

ქვეყნის ეკონომიკას კატასტროფული ზარალი შეექმნება: ნავთობის, გაზის, ქვანახშირის, ალმასის და ლითონების წარმოება შეწყდება ინფრასტრუქტურის ფიზიკური განადგურების გამო, რაც გამოიწვევს საწარმოების გათიშვას, ნედლეულის და ელექტროენერგიის დეფიციტს. ვულკანური აქტივობა გაანადგურებს რეგიონის ბუნებრივ რესურსებს, მათ შორის ნავთობსა და ქვანახშირს, გაანადგურებს ქვეყნის ძირითად ეკონომიკურ აქტივებს.

ამოფრქვევიდან ათწლეულების შემდეგ ციმბირი დარჩება ეკოლოგიური კატასტროფის ზონად. კატასტროფა, რომელიც დაატყდება თავს რუსეთს, შეუქცევად შეცვლის მის გეოგრაფიას, ეკონომიკასა და საზოგადოებას. ქვეყნის ტერიტორიის მხოლოდ 25% დარჩება საცხოვრებლად ვარგისი, მაგრამ მას ეკოლოგიური და სოციალური კრიზისების უზარმაზარი ზეწოლა დაემუქრება.

ეკონომიკური პოზიციები, ისტორიული ძეგლები და ბუნებრივი რესურსების უმეტესი ნაწილი დაიკარგება და ციმბირი გახდება შეუფერებელი თანამედროვე ცივილიზაციის არსებობისთვის.

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>

ციმბირის პლუმის თანდათანობითი გარღვევის შედეგები მთელი მსოფლიოსთვის

ციმბირის პლუმის ამოფრქვევის გლობალური შედეგები გავლენას მოახდენს მთელ მსოფლიოში და ეს მოხდება რამდენიმე ეტაპად.

პირველ დღეებში სატრანსპორტო კავშირები ციმბირის გავლით ევროპასა და აზიას შორის შეწყდება და საჰაერო მიმოსვლა ატმოსფეროში ვულკანური ფერფლის გამო შეჩერდება. ეს პროცესები შეაფერხებს გლობალურ ლოჯისტიკას, რაც გამოიწვევს ფართომასშტაბიან სასურსათო კრიზისს, ვინაიდან რუსეთი, როგორც სურსათის ერთ-ერთი წამყვანი ექსპორტიორი, შეწყვეტს ხორბლის და სხვა პროდუქტების მიწოდებას. რუსეთიდან ნავთობის, გაზის და სხვა ნედლეულის ექსპორტის შეფერხება გამოიწვევს ფასების ზრდას, ენერგეტიკულ კრიზისს და ეკონომიკურ არასტაბილურობას ბევრ ქვეყანაში. გლობალური ეკონომიკა ფინანსური და სოციალური შოკების ჯაჭვურ რეაქციას წააწყდება.

ფერფლისა და გოგირდის აეროზოლების ღრუბლები გამოიწვევს გლობალურ დაბნელების ეფექტს, რაც ამცირებს მზის შუქის რაოდენობას პლანეტამდე. ეს გამოიწვევს "ვულკანურ ზამთარს", რომლის ტემპერატურა 2-3 °C-ით დაიკლებს. მჟავა წვიმა და ნიადაგის დაბინძურება ზიანს მიაყენებს სოფლის მეურნეობას არა მხოლოდ რუსეთში, არამედ მთელ მსოფლიოში. მასობრივი შიმშილი, წყლის დეფიციტი, ტოქსიკური ჰაერი და კლიმატური სისტემის კოლაფსი გამოიწვევს მილიარდობით ადამიანისა და ცხოველის თანდათანობით სიკვდილს.

რამდენიმე წელიწადში სოციალური სისტემები დაინგრევა.

დროთა განმავლობაში, ვულკანური ფერფლი დაიწყებს დალექვას, მაგრამ იქნება დრამატული კლიმატის ცვლილებები. პერმაფროსტის დნობის გამო მეთანისა და ნახშირორჟანგის გამოყოფა გამოიწვევს სათბურის ეფექტის ზრდას. ტემპერატურა დაიწყებს თანდათან მატებას 5-10 °C-ით, რაც გამოიწვევს არასტაბილურ კლიმატს, რომელიც ხასიათდება ტემპერატურის მკვეთრი რყევებით. ოზონის დაქვეითება გაზრდის ულტრაიისფერი გამოსხივების დონეს ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში, რაც გააუარესებს ამოფრქვევის შედეგებს.

ციმბირიდან დაშორების მიუხედავად, ევროპას სერიოზული შედეგები მოჰყვება ციმბირის პლუმის ამოფრქვევისგან: ნაცარი დაფარავს ჩრდილოეთ და აღმოსავლეთ ევროპას, რაც მოსახლეობაში უამრავ რესპირატორულ დაავადებას გამოიწვევს. მჟავა წვიმა გაანადგურებს ტყეებს, ურბანულ ინფრასტრუქტურას და სასოფლო-სამეურნეო მიწებს. დროებითი გაგრილების ფაზის შემდეგ დაიწყება მკვეთრი დათბობა, რასაც თან მოჰყვება გვალვები სამხრეთში და წყალდიდობები ცენტრალურ და ჩრდილოეთ ევროპაში. მასობრივი მიგრაცია რუსეთიდან, აზიიდან და ახლო აღმოსავლეთიდან გამოიწვევს დემოგრაფიულ კრიზისს და გააძლიერებს კონკურენციას რესურსებისთვის. ევროპის ქვეყნებს მოუწევთ უწყვეტი გარემოსდაცვითი, ეკონომიკური და სოციალური გამოწვევებთან გამკლავება.

აზია, რომელიც ყველაზე ახლოს არის ამოფრქვევის ეპიცენტრთან, მიიღებს ძირითად დარტყმას. ჰაერის დაბინძურება მტვრისგან და ფერფლისგან გამოიწვევს დახრჩობას და მჟავე წვიმას, განსაკუთრებით ჩინეთში, მონღოლეთსა და ყაზახეთში. სოფლის მეურნეობა ჩრდილოეთ ჩინეთში, კვების ძირითად რეგიონში, განადგურდება მზის ნაკლებობით და ნიადაგის ხარისხის გაუარესებით. ტემპერატურის უკიდურესობა დაანგრევს ინფრასტრუქტურასა და სასოფლო-სამეურნეო სისტემებს

მთელს კონტინენტზე. ოკეანის ტემპერატურის თანდათანობითი მატება გამოიწვევს წყლის დეოქსიგენაციას, რაც გაანადგურებს საზღვაო ეკოსისტემებს და გამოიწვევს მეთევზეობის კოლაფსს.

რაც დრო გავა, მიმდინარე ამოფრქვევის შედეგები მხოლოდ უფრო დამანგრეველი გახდება. გაუარესდება კლიმატური და ეკოლოგიური კრიზისები, კაცობრიობა დაკარგავს უამრავ თანამედროვე ტექნოლოგიას და ცოდნას, შეექმნება ღრმა ჩავარდნა განვითარებაში. მსოფლიო ცივილიზაცია დაშლის პირას იქნება.

ციმბირის პლუმის თანდათანობითი გარღვევის გრძელვადიანი შედეგები პლანეტაზე

ციმბირის პლუმის თანდათანობითი ამოფრქვევა გამოიწვევს უზარმაზარ გრძელვადიან შედეგებს, რომლებიც რადიკალურად შეცვლის პლანეტას მილიონობით წლის განმავლობაში. ატმოსფერო დაექვემდებარება გლობალურ დაბინძურებას ტოქსიკური ნივთიერებებით, რაც გამოიწვევს პლანეტარული მასშტაბით მჟავე წვიმის წარმოქმნას და ოზონის შრის განადგურებას. ოკეანეები კრიტიკულად გამჟავდება, რაც გამოიწვევს ზღვის ორგანიზმების მასიურ სიკვდილს. ეს პროცესები გამოიწვევს საზღვაო ეკოსისტემების დაშლას, გლობალური კვების ჯაჭვების მოშლას და მთელი ზღვის ბიომრავალფეროვნების კოლაფსს.

ხმელეთზე მასობრივი გადაშენება გარდაუვალი გახდება ატმოსფეროში ტოქსიკური გამონაბოლქვის, ნიადაგის ეკოსისტემების განადგურებისა და მცენარეების უმეტესობის გაქრობის

გამო. დამბინძურებლების დაკარგვა გამოიწვევს ხმელეთის ეკოსისტემების დაშლას. მოსალოდნელია, რომ გადაშენება შეეხება ყველა არსებული სახეობის 75-დან 95%-მდე.

ამოფრქვევა გამოიწვევს რთულ კლიმატურ, ბიოლოგიურ და გეოლოგიურ კრიზისს, რომელიც მთლიანად გარდაქმნის დედამიწის ბიოსფეროს. ეს პროცესი გამოიწვევს კაცობრიობის ცივილიზაციის კოლაფსს, მილიარდობით ადამიანის სიკვდილს და ადამიანთა გადარჩენილი გაფანტული ჯგუფების დაბრუნებას ქვის ხანის განვითარების დონეზე. ამ კატასტროფის მასშტაბები შეედრება დედამიწის ისტორიაში უდიდეს მასობრივ გადაშენებას, რომელიც გახსნის ბიოსფეროს ახალ ევოლუციურ ეტაპს მინიმუმ მილიონობით წელიწადის შემდეგ.

სცენარი 3.

დაგეგმილი კონტროლირებადი დეგაზაცია

ვულკანური გეოინჟინერიის არსებული მეთოდები

დასავლეთ ციმბირის ფირფიტისა და აღმოსავლეთ ციმბირის კრატონის ქვეშ მზარდი სტრესის გათვალისწინებით, რომელიც დაკავშირებულია ციმბირის პლუმის აწევასთან, აუცილებელია სასწრაფო ზომების მიღება შესაძლო კატასტროფული შედეგების შესამცირებლად. ერთ-ერთი ასეთი გამოსავალია მეორადი მაგმის კამერებიდან წნევის, ლავისა და აირების კონტროლირებადი გამოყოფა, ანუ დაგეგმილი კონტროლირებადი დეგაზირება.

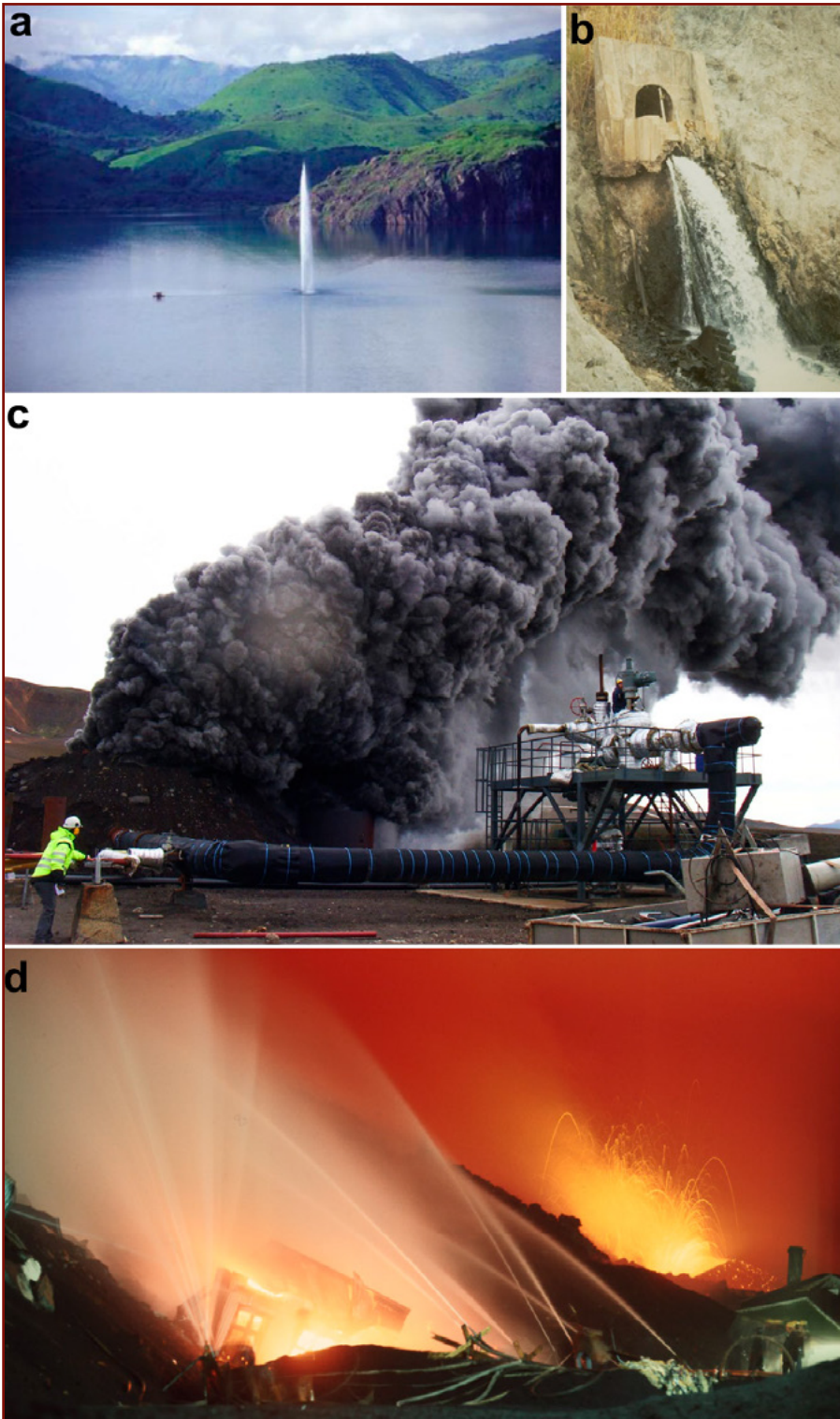
თანამედროვე სამეცნიერო კვლევები განიხილავს მაგმის კამერების დეგაზაციას, როგორც პერსპექტიულ მეთოდს ფართომასშტაბიანი ამოფრქვევის თავიდან ასაცილებლად. ეს მიდგომა იძლევა საფუძველს ვულკანური გეოინჟინერიის ტექნოლოგიების გამოყენებისთვის არა მხოლოდ ვულკანებზე ან სუპერვულკანებზე, არამედ მაგმური პლუმის აქტივობის მართვისთვის. კონტროლირებადი დეგაზირების კონცეფცია აისახა არაერთ სამეცნიერო პუბლიკაციაში და სხვადასხვა ქვეყნის სპეციალისტების მიერ შემუშავებულ პატენტებში.

ვულკანური გეოინჟინერიის თეორიული საფუძვლები ჩაეყარა მე-20 საუკუნიდან და პრაქტიკული ექსპერიმენტები ჩატარდა გასული საუკუნის განმავლობაში. ვულკანური ჩარევის მეთოდები მოიცავდა კრატერების

ბურღვას, ვულკანური ტბების დრენაჟს, ლავის არხების შექმნას, ლავის ნაკადების გაციებას ზღვის წყლით, ლავის ნაკადების დაბომბვას და სათბურის გაზების (ნახშირორჟანგი და მეთანის) ამოტუმბვას (სურათი 87).

1960-იანი წლებიდან შეერთებული შტატების გეოლოგიური სამსახური (USGS) აწარმოებს ბურღვას ლავის ტბის რაიონებში ჰავაის კილაუეას ვულკანზე ლავის გადამისამართების მიზნით. მსგავსი ინიციატივები ხორციელდება იაპონიაში, ისლანდიასა და იტალიაში. მაგალითად, იაპონიამ გამოსცადა ტექნოლოგიები მაგმის კამერებში წნევის შესამცირებლად, ხოლო ისლანდიას ჰქონდა ლავის გადამისამართების წარმატებული გამოცდილება ჰეიმას კუნძულზე, სადაც ნაკადები გაცივდა წყლის ჭავლით. იტალიაში მუშავდება ადრეული გაფრთხილების სისტემები და ლავის ნაკადის მართვის ტექნიკა; ამის მაგალითია 1983 წელს ეტნაზე ლავის ბარიერების აფეთქებით განადგურება.

დღეს ტარდება საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციები და სიმპოზიუმები ღრმა ბურღვის შესახებ ვულკანური და გეოთერმული აქტივობის სფეროებში, რაც აფართოებს ვულკანური გეოინჟინერიის გამოყენების პერსპექტივებს ამოფრქვევების თავიდან ასაცილებლად და მათი შედეგების შესამცირებლად გლობალურ დონეზე.



ნახ.87.

ა) ნახშირორქანის გაჟონვა ნიოსის ტბიდან, კამერუნი, ჰალბვაქსის და სხვ. (2020).

ბ) სადრენაჟო გვირაბი კელუდის ვულკანის კრატერის კედელში, ინდონეზია (გლობალური ვულკანიზმის პროგრამის სურათი GVP-01120).

გ) 2009 წელს კრაფლაში, ისლანდიაში, მაგმის ჯიბეში ბურღვა (სურათი GO Friðleifsson/IDDP-ის მიერ). დ) ლავის ნაკადების გაციება ინექციური ზღვის წყლით ჰეიმაიში, ისლანდია 1973 წელს, Tristin H. Benediktsson.

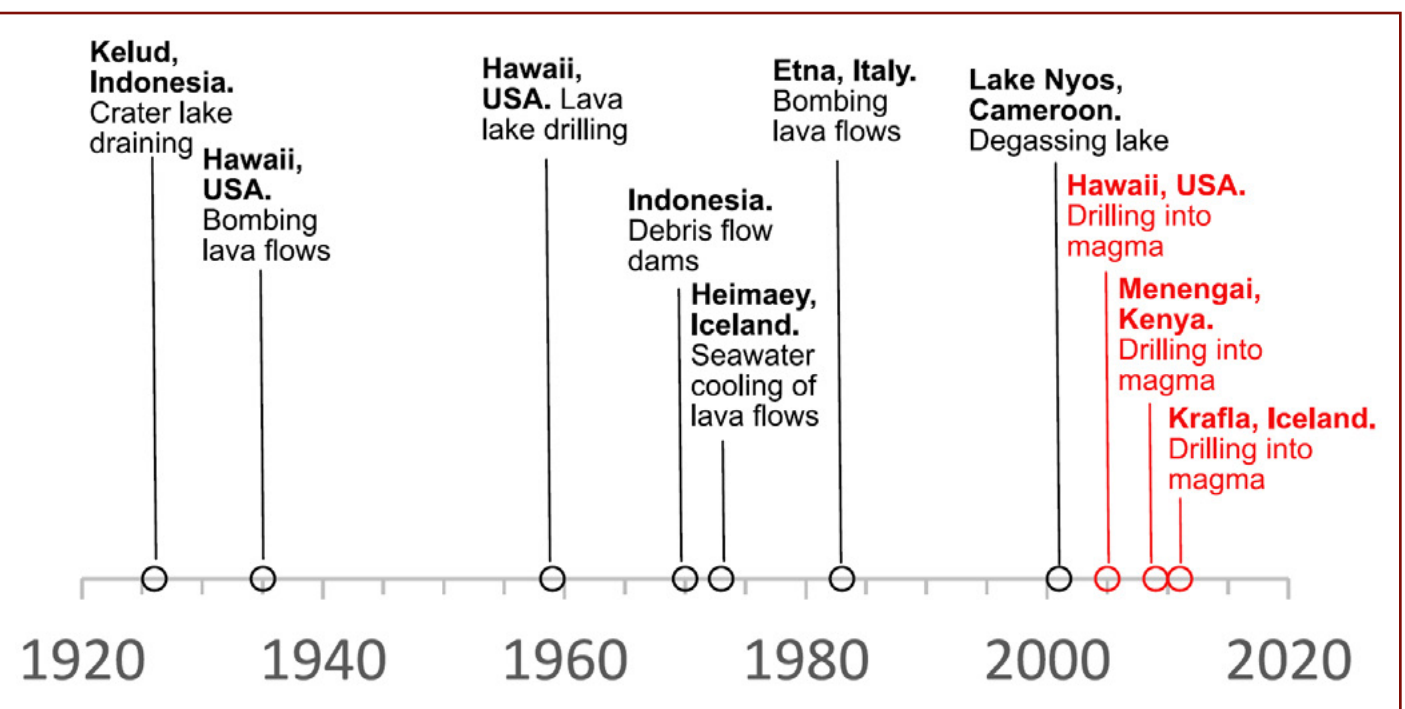
წყარო: Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). ვულკანის გეოინჟინერიის ეთიკა. დედამიწის მომავალი, 11(10), e2023EF003714. <https://doi.org/10.1029/2023EF003714>

დიაგრამაზე (სურ. 88) ნაჩვენებია ვულკანური გეოინჟინერიის ყველაზე თვალსაჩინო შემთხვევების ქრონოლოგია. შავი წრეები წარმოადგენს მიზანმიმართულ ჩარევებს, ხოლო წითელი წრეები წარმოადგენს უნებლიე ზემოქმედებას ვულკანურ აქტივობაზე.

ასევე არსებობს დაპატენტებული მეთოდები ვულკანური და

სუპერვულკანის ამოფრქვევის გეგმიური გაჟონვისა და რისკების შესამცირებლად.

მაგალითად, ორი რუსი სპეციალისტის მიერ დაპატენტებული ერთ-ერთი ტექნოლოგიის პრინციპია ლავის მსგავსი უკონტროლო ვულკანური ამოფრქვევის თავიდან აცილება ჭაბურღილების დახრილი ბურღვისა და მაგმის კამერებში წნევის რეგულირების გზით (სურ. 89).



ნახ.88.

ვულკანური გეოინჟინერიის ზოგიერთი თვალსაჩინო შემთხვევის ქრონოლოგია. შავი წრეები წარმოადგენს მიზანმიმართულ ჩარევებს, ხოლო წითელი წრეები წარმოადგენს უნებლიე ვულკანურ ჩარევებს.

წყარო: Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). ვულკანის გეოინჟინერიის ეტიკა. დედამიწის მომავალი, 11(10), e2023EF003714

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



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

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

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.04.2007

(45) Опубликовано: 10.01.2009 Бюл. № 1

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

(72) Автор(ы):

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

(73) Патентообладатель(и):

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

(54) СПОСОБ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЛАВИНООБРАЗНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ

(57) Реферат:

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

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

5 0 8 C 1

RU 2 343 508 C 1

ნახ.89.

პატენტი: ლავის მსგავსი ვულკანური ამოფრქვევის პრევენციის მეთოდი. გამოგონება ეხება უკონტროლო ზვავის მსგავსი ვულკანური ამოფრქვევის თავიდან აცილების მეთოდებს და მაგმის კონტროლირებადი ტრანსპორტირების ორგანიზებას მისი მშენებლობაში გამოსაყენებლად. ეს ზრდის მიდგომის ეფექტურობას.

გამოგონების არსი:

მეთოდი გამოიყენება წნევის გასაკონტროლებლად მეორად მაგმატურ კამერებში ვულკანების ქვეშ, რომლებიც ავლენენ სოლფატარტის აქტივობას. ამისათვის, არხების დახრილი ბურღვა ხორციელდება მეორადი მაგმის კამერის ძირში. შეკუმშული აირი იკვებება ამ ცეცხლსასროლი იარაღით. ისინი ზრდიან წნევას მეორად მაგმა კამერაში და ანელებენ მაგმის დინებას პირველადი კამერიდან. ამავედროულად, მეორადი მაგმის კამერაში დაგროვილი მაგმა ამოღებულია და ტრანსპორტირებულია მშენებლობისთვის გაბურღული არხებით. ამავედროულად, ისინი არ აძლევენ საშუალებას წნევამ მიაღწიოს კრიტიკულ მნიშვნელობას, რომლის დროსაც ხდება ლავის მსგავსი ამოფრქვევა.

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

კიდევ ერთი ტექნოლოგია შეიმუშავა ამერიკელმა გამომგონებელმა (სურ. 90). ტექნოლოგია აღწერს ვულკანური მაგმის კამერებიდან მაგმის ამოტუმბვის მეთოდებს, როგორცაა Yellowstone Supervolcano-ში, შესაძლო კატასტროფული ამოფრქვევის თავიდან

ასაცილებლად. ძირითადი იდეა არის ხელოვნური არხების (მილების) შექმნა მაგმის ზედაპირზე გამოსატანად, სადაც მისი დამუშავება და გამოყენება შესაძლებელია, მაგალითად, ენერგიის გამომუშავებისთვის.

(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

* cited by examiner

(30) **Foreign Application Priority Data**

Feb. 4, 2002 (GB) 0202465.1

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

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

(57) **ABSTRACT**

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

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.

(58) **Field of Classification Search** **405/52; 405/258.1; 130; 131; 303; 165/45; 166/302; 166/304; 57-62**

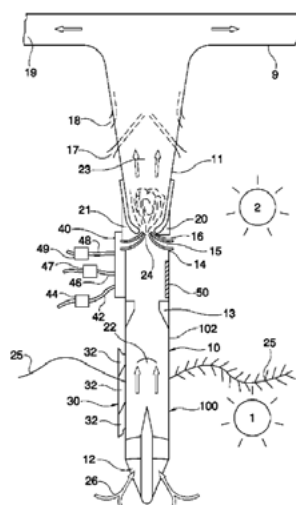
See application file for complete search history.

(56) **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

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

25 Claims, 2 Drawing Sheets



ნახ.90.

პატენტი: მაგმის ევაკუაციის სისტემები სუპერვულკანის აფეთქებების თავიდან ასაცილებლად. მოწყობილობა აკონტროლებს ვულკანური მაგმის გადატუმბვას აფეთქებების თავიდან ასაცილებლად.

მაგმას ამოტუმბვა ხდება ერთი საევაკუაციო მილით, რომელშიც მაგმის ნაკადი თბება, რათა თავიდან აიცილოს იგი მილში. მცირე წვის კამერები შეიძლება გამოყენებულ იქნას ორთქლის მიწოდებისთვის, რაც თავის მხრივ ათბობს და ასტაბილურებს მაგმის ნაკადს. საჭიროების შემთხვევაში, სტაბილურობა შენარჩუნებულია ცენტრალური გაგრილებით მილის კედლებზე განთავსებული საქმენებიდან წყლის ჭავლების გამოყენებით.

წყარო:

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

წარმატებული დეგაზირების კიდევ ერთი მაგალითია იაპონური პროექტი „უნზენის ვულკანის სამეცნიერო ბურღვა“ (USDV). ეს არის 6-წლიანი ინიციატივა, რომელიც დაიწყო 1999 წლის აპრილში, რათა შეისწავლოს უნზენის ვულკანის ზრდის ისტორიის, მიწისქვეშა სტრუქტურისა და მაგმის ასვლის პროცესები (ნახ. 91). პირველი ეტაპი მოიცავდა ვულკანის ფერდობებზე ორი ჭაბურღილის გაბურღვას და მისი

სტრუქტურის მოდელის შექმნას. მეორე ფაზა ფოკუსირებული იყო 1990-1995 წლების ამოფრქვევის მაგმა მილსადენის გაბურღვაზე, რათა გაანალიზოს დეგაზირების მექანიზმი. წარმატებული ბურღვის მისაღწევად შემუშავდა სტრატეგია, რომელიც მოიცავდა ვერტიკალურ ბურღვას, რასაც მოჰყვა ჭაბურღილის დახრილობის გაზრდა (ნახ. 92).

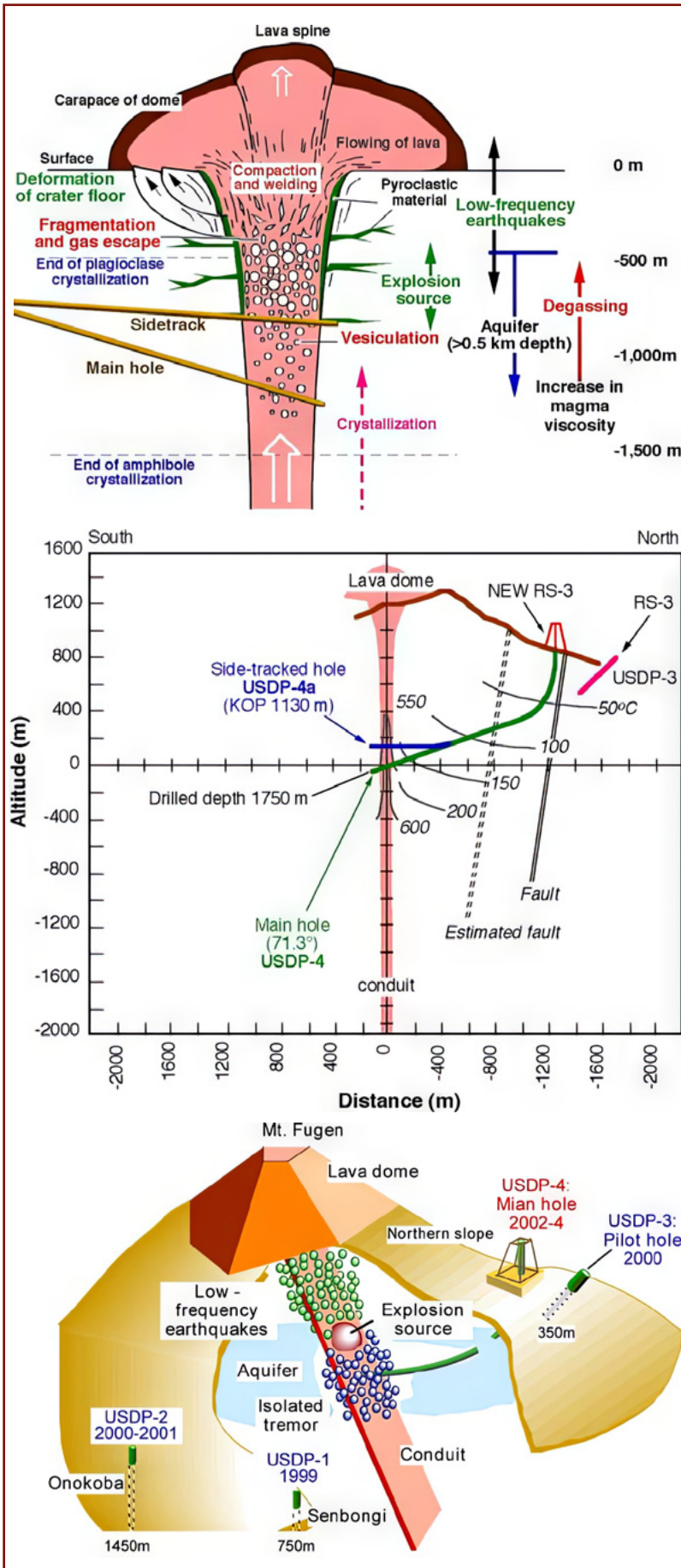


ნახ. 91.
საბურღი მოწყობილობა უნზენის ვულკანის ბურღვისთვის 1995 წ.

წყარო:

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





ნახ.92.

ა) ლავის გუმბათისა და უნზენის ვულკანის შახტის ზედა ნაწილის გამოსახულება. ქაფიანი მაგმის ეფექტური დეგაზირება მოხდა ლილვის ზედა ნაწილში მისი გახლეჩვისა და კალცინაციის დროს. მაღაროს მდგომარეობა შესწავლილი იქნა მთავარი არხის (USDP-4) ბურღვით 2003 წელს, ხოლო ბირთვის უწყვეტი სინჯები განხორციელდა 2004 წელს გვერდითი არხის(USDP-4a) ბურღვით.

წყარო: USDP Project. მიწისძვრის კვლევის ინსტიტუტი, ტოკიოს უნივერსიტეტი. წვდომის რეჟიმი: 2024 წლის 31 დეკემბერი <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20>

ბ) მაღაროს ბურღვის ტრაექტორიები. ახალი RS-3 და RS-3 პუნქტებიდან იგეგმება ძირითადი და გვერდითი არხების და საპილოტე ჭაბურღილის გაბურღვა.

წყარო: USDP Project. ტოკიოს უნივერსიტეტის მიწისძვრის კვლევის ინსტიტუტი. მონაცემები აღებულია 2024 წლის 31 დეკემბერს ვებ გვერდიდან <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20>

გ) მაღაროს ბურღვის სამგანზომილებიანი სქემა

წყარო: ვულკანური სიტხეების კვლევის ცენტრი. უნზენის ვულკანის მაღაროს სისტემის მიმოხილვა. ტოკიოს უნივერსიტეტის მიწისძვრის კვლევის ინსტიტუტი. მონაცემები აღებულია 2024 წლის 31 დეკემბერს <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/vrc/usdp/conduit.html>

დღეს კაცობრიობას აქვს საკმარისი ტექნოლოგიური და საინჟინრო პოტენციალი ვულკანურ სისტემებში შეღწევისთვის, მაგრამ დაგეგმილი დეგაზაციის ყოველი შემთხვევა მოითხოვს ყველაზე ფრთხილად მომზადებას, მონაცემთა დიდი მასივის ანალიზს და ყველაზე ზუსტ გამოთვლებს. და ამ შემთხვევაშიც რისკები რჩება.

მოყვანილი მაგალითები გამოსცადეს ჩვეულებრივ ვულკანებზე, რომლებიც, რა თქმა უნდა, განსხვავდებიან ზომით ციმბირის გიგანტური მაგმატური პლუმის მასშტაბისგან. ეს პლუმი გაცილებით დიდ საფრთხეს უქმნის, ვიდრე თუნდაც ერთი სუპერვულკანი, რომელიც შედარებულია ათასობით Yellowstone calderas-ის აფეთქების ენერგიასთან. თუმცა, ამ პრობლემის განხილვა აქტუალური გახდა სწორედ იმიტომ, რომ არსებობს მისი გადაჭრის პოტენციური მიდგომები.

სწორი მიდგომით, კაცობრიობას შეუძლია შეიმუშაოს მაგმატური პლუმის დეგაზაციის პროგრამა, რომელიც ეფუძნება სპეციალისტების გლობალურ განვითარებას. მისი მთავარი მიზანი იქნება ციმბირის პლუმის აწევის შედეგების მინიმუმამდე დაყვანა მეორადი მაგმის კამერებში ლავისა და აირების წნევის შემცირებით, რაც თავიდან აიცილებს ფართომასშტაბიან უკონტროლო ამოფრქვევებს.

ასეთი პროგრამის განხორციელება მოითხოვს მჭიდრო საერთაშორისო თანამშრომლობას და მეცნიერებისა და ინჟინრების ძალისხმევას კონსოლიდაციას მთელი მსოფლიოდან. მხოლოდ ერთიანი მიდგომა მოგვცემს საშუალებას შევიმუშავოთ ეფექტური გადაწყვეტილებები, რომლებიც მიზნად ისახავს მთელი კაცობრიობის უსაფრთხოების უზრუნველყოფას.

ციმბირის პლუმის დაგეგმილი დეგაზირების პროგრამის მაგალითი

პროგრამა შეიძლება მოიცავდეს ერთდროულად რამდენიმე სფეროს განვითარებას:

1. მონიტორინგის ქსელის შექმნა

1.1 რეგიონში სეისმური და თერმული აქტივობის მონიტორინგისთვის საჭირო იქნება მაღალმგრძნობიარე სენსორებისა და სატელიტური დაკვირვებების ქსელის შექმნა. ეს საშუალებას მოგვცემს დროულად გამოავლინოს მეორადი კერები.

1.2 საჭირო იქნება მეორადი მაგმატური კამერების დეტალური რუკების

შექმნა სეისმური კვლევის მეთოდების გამოყენებით. მნიშვნელოვანი იქნება მაგმის წნევისა და მოცულობის წინასწარ შეფასება თითოეულ მეორად კამერაში.

1.3 შემდეგ საჭირო იქნება კვლევითი და მონიტორინგის ჭაბურღილების გაბურღვა და წნევის, ტემპერატურის და სეისმური აქტივობის სენსორების დაყენება ანომალიურ ზონებში.

2. მაგმატური არხების კონტროლირებადი დეგაზირებისა და ბლოკირების ტექნოლოგიის შემუშავება

2.1 საჭირო იქნება უსაფრთხო ზონებში

ღრმა დახრილი ჭაბურღილების (8 კმ-მდე სიღრმე) ბურღვის გეგმის შემუშავება. საჭირო იქნება დახრილი ჭაბურღილების ტრაექტორიების დეტალური გაანგარიშება მეორადი წყაროების მისაღწევად. საჭირო იქნება საბურღი ტექნოლოგიების გამოყენება, რომლებიც მდგრადია მაღალი ტემპერატურისა და წნევის მიმართ, ანუ სითბოს მდგრადი მასალების გამოყენება ჭაბურღილების კედლების გასამაგრებლად, ჭაბურღილების წნევისა და ტემპერატურის მონიტორინგის სისტემის შექმნა.

2.2 საჭირო იქნება შემუშავება აირებისა და ლავის მოცილების პროცესი ეტაპობრივი კონტროლი წნევის მეორად კამერებში სისტემის მეშვეობით. ეს მოითხოვს დეგაზირების სიჩქარის კონტროლს, რათა თავიდან აიცილოს წნევის უეცარი ვარდნა და კომპრესორის სისტემის გამოყენება გაზის წნევის გასაკონტროლებლად. ატმოსფეროში ტოქსიკური გამონაბოლქვის თავიდან ასაცილებლად საჭირო იქნება ფილტრაციისა და გაგრილების სისტემა. ლავას და აირების გამოყვანა განხორციელდება მანამ, სანამ წნევა არ დასტაბილურდება თითოეულ კერაში.

2.3 ამის შემდეგ საჭირო იქნება მიზნობრივი ბირთვული აფეთქების გეგმის შემუშავება კონკრეტულ ჭაბურღილებში, რათა მოხდეს მეორადი მაგმის კამერის ზემოთ ფენების დალუქვა. ეს ხელს შეუშლის ზედმეტი მაგმის ზედაპირზე ამოსვლას და მინიმუმამდე შეამცირებს ფერფლის გამოყოფას.

ზეწოლის თანდათანობითი

განთავისუფლება უზრუნველყოფს ციმბირის სტაბილურობას და დაიცავს ძირითად პოპულაციის ცენტრებს, გარდა ნორილსკისა და მიმდებარე თემებისა.

2.4 წყაროებიდან ლავის ამოღების პროცესში საჭირო იქნება მისი დაღვრის კონტროლი, თუ ეს შესაძლებელია. საჭიროა მისი მიმართვა სპეციალურად მომზადებული არხებით არქტიკის ზღვებისკენ. შესამუშავებელია პროგრამა მაგმის მშენებლობისთვის გამოსაყენებლად (მაგალითად, ხელოვნური კუნძულების შესაქმნელად ან სანაპირო ზოლის გასაძლიერებლად).

3. მოსახლეობის ევაკუაცია

საჭირო იქნება ადრეული გაფრთხილების სისტემის დანერგვა და გაუთვალისწინებელი სიტუაციებისთვის ევაკუაციის გეგმების შემუშავება. ასევე საჭირო იქნება რისკის ზონებიდან მოსახლეობის უსაფრთხო ევაკუაციის დაგეგმილი ორგანიზაცია და მისი ადაპტაცია, სოციალური უზრუნველყოფა, გრძელვადიანი განსახლების შესაძლებლობის გათვალისწინებით.

4. ინფრასტრუქტურის შენარჩუნება

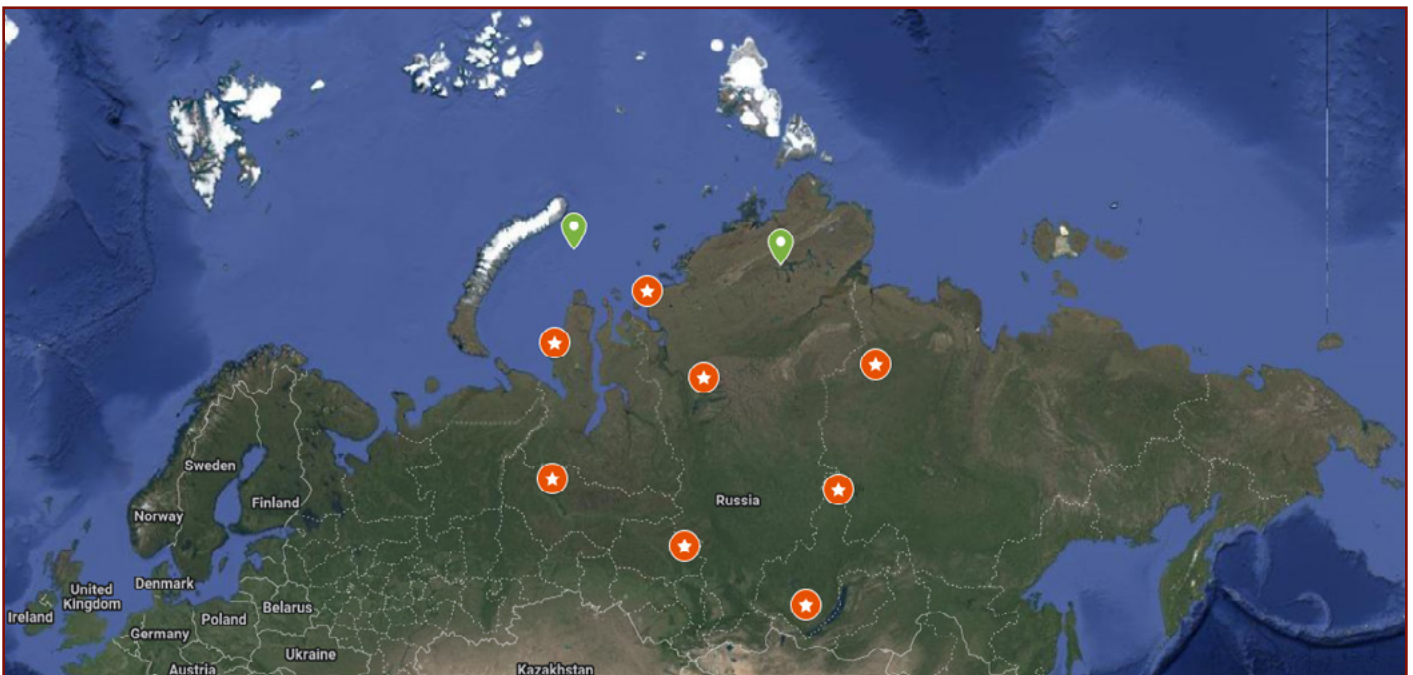
უნდა შემუშავდეს გეგმები სტრატეგიული აქტივების დაცვისა და ევაკუაციისთვის ლავის დატბორვის რისკის ქვეშ მყოფი ტერიტორიებიდან. რეგიონის ევაკუირებული სტრატეგიული რესურსებისთვის, როგორცაა ნავთობი, გაზი, ფერადი და ძვირფასი ლითონები, მადნები, სასუქები, საკვები, წყალი და მედიკამენტები, სარეზერვო ობიექტების შექმნა უსაფრთხო ადგილებში.

კვლევითი ჭაბურღილების ადგილმდებარეობის არჩევის დასაბუთება ციმბირის თანამედროვე

იმის გასაგებად, თუ რამდენად სწრაფად და რა მიმართულებით ხდება პლუმის დანერგვა და განღვრა მისი თავის, შეჭრა ბზარებში დედამიწის ქერქში, პირველი ნაბიჯი არის გეოთერმული და გეოფიზიკური პარამეტრების სიღრმეზე მონიტორინგი. ასეთი კვლევებისთვის საჭიროა ახალი ჭაბურღილების გაბურღვა და ტემპერატურის, წნევის რეგულარული

გაზომვები, აირის შემადგენლობისა და მაგმატური პროცესების გაზრდილი მარკერების აღება, სეისმური ხმაური და სხვა პარამეტრები.

ამ კვლევებისთვის გამოვლინდა 10 წერტილი სამეცნიერო კვლევითი ჭაბურღილების ბურღვისთვის (სურ. 93, 94).



ნახ.93.

კვლევითი ჭაბურღილების ბურღვისთვის 10 რეკომენდებული პუნქტის წინასწარი ლოკაცია

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

ნახ.94.

ცხრილი 10 რეკომენდებული ჭაბურღილები სამეცნიერო-კვლევითი ბურღვისთვის ციმბირის პლუმის წინსვლის მონიტორინგისთვის, ჭაბურღილის სახელწოდების, კოორდინატების, ანლომდებარე დასახლების ან ინფრასტრუქტურის ჩათვლით, მონაკვეთის გეოლოგიური სტრუქტურა.

ამ ჭაბურღილების შერჩევის კრიტერიუმები ეფუძნებოდა შემდეგ პრინციპებს:

1. ჭაბურღილის მდებარეობა თერმული და გეოდინამიკური ანომალიების უდიდეს კვეთასთან შედარებით, რომელიც დაკავშირებულია პლუმის თავის განლაგებასა და გავრცელებასთან. ამ პრინციპიდან გამომდინარე, დაიგეგმა ერთი ჭაბურღილის სავარაუდო აწევის ცენტრალური ნაწილის მიდამოში, დაიგეგმა 7 ჭაბურღილი მაგმის სავარაუდო გავრცელების პერიმეტრის გასწვრივ. კიდევ ერთი ჭაბურღილი დაიგეგმა ბაიკალის რეგიონში, მაგმის სავარაუდო აქტიური მოძრაობის მიმართულებით აღმოსავლეთ ციმბირის კრატონის ფუძის ქვეშ. კიდევ ერთი ჭაბურღილი იყო დაგეგმილი ყარას ზღვის რეგიონში, მონიტორინგისთვის პლუმის მოძრაობის არქტიკული შელფის ოკეანის ქერქის ქვეშ.

2. ჭაბურღილების მდებარეობა შეირჩა ოპტიმალურად შემდგომი სეისმური ტომოგრაფიის სამუშაოებისთვის, რათა ჭაბურღილების სეისმური სენსორებიდან მიღებული ინფორმაცია, შემდგომში გარდაქმნისას, უზრუნველყოს ყველაზე მკაფიო 3D გამოსახულება. ანუ ისე, რომ ჭაბურღილების სეისმური სენსორების ბადე ოპტიმალურად განლაგდეს მიწისქვეშა სეისმური ტომოგრაფიისთვის.

3. ჭაბურღილის ადგილები შეირჩა საბურღი აღჭურვილობის მიწოდებისა და მისასვლელი გზების (ტრანსპორტის ხელმისაწვდომობის) შესაძლებლობის გათვალისწინებით. ვინაიდან დასავლეთ და აღმოსავლეთ ციმბირის ჩრდილოეთს აქვს უკიდურესად ძნელად გასავლელი ტერიტორიები, ჭაობიანი ლანდშაფტები, რამდენიმე გზა და ექსტრემალური კლიმატური პირობები, საბურღი ადგილების არჩევანი ეფუძნებოდა

არსებული ინფრასტრუქტურის მდებარეობას სამეცნიერო კვლევების ჩასატარებლად: გზების რაოდენობა, დასახლებული ტერიტორიები და მოქმედი საბურღი ადგილები. ორი პუნქტი შეირჩა გაზპრომისა და როსნეფტის საკუთრებაში არსებულ ნავთობის საბადოებზე, დანარჩენი მდებარეობს ნავთობის, გაზის და სხვა მინერალების საბადოების მახლობლად. უნდა აღინიშნოს, რომ თუ შეუძლებელია ჭაბურღილების გაბურღვა მითითებულ კოორდინატებში, დასაშვებია ჭაბურღილების გადაადგილება 10-20 კმ-ით ნებისმიერი მიმართულებით.

ჭაბურღილის ტესტირების რეკომენდებული მეთოდები.

მანტიის პლუმის ყოვლისმომცველი მონიტორინგისა და შესწავლისთვის აუცილებელია კვლევის ჭაბურღილების სენსორებიდან შემდეგი პარამეტრების შეგროვება.

- 1. ტემპერატურის მონიტორინგი:** ტემპერატურის გაზომვა სხვადასხვა სიღრმეზე თერმული ანომალიების ანალიზისა და გეოთერმული ნაკადის გაძლიერების მიზნით მაგმის მოძრაობის შედეგად პლუმის გავრცელების ადგილებში.
- 2. წნევა:** ჭაბურღილის წნევის განსაზღვრა მაგმისა და სითხის ფაზის აქტივობის გამო ჰიდროდინამიკური პირობების ცვლილებების შესაფასებლად.
- 3. გაზის სინჯის აღება:** ღრმა წარმონაქმნებიდან მომდინარე აირების ნიმუშების შეგროვება მათი შემადგენლობისა და მაგმატური აქტივობის შესაძლო გავლენის შესასწავლად.

4. სეისმური კვლევა: როგორც სტანდარტული, ასევე ფართოზოლოვანი სეისმური სენსორების დაყენება სეისმური აქტივობის ჩასაწერად, რათა შეიქმნას დედამიწის ქერქისა და მანტიის დეტალური სეისმური ტომოგრაფი, პლუმის მდგომარეობის უწყვეტი მონიტორინგისთვის.

5. რეზერვუარის სითხის შემადგენლობა: წყალსაცავის სითხეების შემადგენლობის შესწავლა შესაძლო თერმული ან მაგმური დატენვის გამოსავლენად.

6. გეომექანიკური კვლევები: ქანებში დაძაბულობის გაზომვა ლითოსფეროს დაძაბულობის

მდგომარეობის გასაანალიზებლად, რომელიც განიცდის დეფორმაციას პლუმის შეჭრის შედეგად.

7. ელექტრომაგნიტური

მეთოდები: ელექტრომაგნიტური კვლევების ჩატარება მაგმის შეყვანასთან დაკავშირებული მედიის ელექტრული თვისებების ცვლილებების ჩასაწერად.

შეგროვებული მონაცემები საფუძვლად დაედება მანტიის პლუმის დინამიკის ყოვლისმომცველი მოდელის ასაგებად, ასევე ციმბირის გეოლოგიურ პროცესებზე მისი გავლენის შესაფასებლად.

მაგმატური არხების ბურღვისა და ბლოკირების თავისებურებები დაგეგმილი დეგაზაციის დროს

დაგეგმილი დეგაზირების დროს ჭაბურღილების ბურღვის მთავარი მიზანი იქნება წნევის შემცირება პლუმის მეორად მაგმატურ კამერებში, მაგმის აფეთქებების თავიდან აცილება და გაზისა და ლავის კონტროლირებადი გამოყოფის ორგანიზება.

საწყის ეტაპზე ბურღვა განხორციელდება ოპერატორების მონაწილეობით, რადგან არაღრმა სიღრმეზე პროცესი წარმოადგენს სტანდარტულ ტექნოლოგიურ ამოცანას პერსონალისთვის მინიმალური რისკებით. ამ მიზნით გამოყენებული იქნება ტემპერატურისა და წნევის მონიტორინგის სისტემებით აღჭურვილი ტრადიციული საბურღი დანადგარები,

რაც პროცესის გაკონტროლებასა და ნორმიდან გადახრებზე ოპერატიულად რეაგირების საშუალებას იძლევა.

კრიტიკულ სიღრმეზე მიღწევისას და მაგმატური სისტემის აქტიურ ზონებთან მიახლოებისას, ადამიანებისთვის რისკი მნიშვნელოვნად იზრდება. ამ ეტაპზე სამუშაოები სრულად ავტომატიზირებული იქნება. გამოყენებული იქნება სპეციალიზებული საბურღი დანადგარები ავტომატური კონტროლით. ბურღვის პროცესი დისტანციურად გაკონტროლდება პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით, რომელიც აანალიზებს შემოსულ მონაცემებს რეალურ დროში და არეგულირებს აღჭურვილობის

მოქმედებებს. კონტროლის სიზუსტის გასაუმჯობესებლად, ოპერატორები გამოიყენებენ ვირტუალური რეალობის ტექნოლოგიებს, რომლებიც უზრუნველყოფენ აღჭურვილობის დეტალურ კონტროლს საშიშ ზონაში ფიზიკური ყოფნის გარეშე. ეს შეამცირებს ავარიების ალბათობას, რომლებიც დაკავშირებულია მაღალი წნევის აირების გამოყოფასთან ან დარტყმის ტალღით აღჭურვილობის განადგურებასთან.

საბურღი კომპლექსისა და გარემოს მონიტორინგი დრონებისა და რობოტების გამოყენებით განხორციელდება. კამერებით, თერმოგამომსახველობითა და სენსორებით აღჭურვილი დრონები დააფიქსირებენ გაზის გაჟონვას, თერმულ ანომალიებს და სეისმურ აქტივობას. უშუალოდ საბურღ ზონაში მომუშავე რობოტები შეაგროვებენ მონაცემებს ტემპერატურის, წნევის და გარემოს ქიმიური შემადგენლობის შესახებ და გადასცემენ მას ავტომატიზირებულ საკონტროლო ცენტრებში. ეს ტექნოლოგიები შეამცირებს ადამიანების ყოფნას მაღალი რისკის ადგილებში და უზრუნველყოფს მაღალი სიზუსტისა და უსაფრთხოების დონეს.

ბურღვის დასრულების შემდეგ, შემდეგი ეტაპი მოიცავს კონტროლირებად დეგაზაციას - წნევის თანდათანობით გათავისუფლებას და დიდი მოცულობის ლავას მოცილებას. საბოლოო ეტაპებზე, მაგმისა და

აირების მოცულობის მნიშვნელოვანი შემცირების შემდეგ, შესაძლოა საჭირო გახდეს კონტროლირებადი აფეთქების განხორციელება მაგმის ასვლის გზების დასახურად. ერთ-ერთი შემოთავაზებული მეთოდი გულისხმობს მიმართულ ბირთვულ აფეთქებას გაბურღულ ხვრელში. მისი მიზანია ტექტონიკური სტრესების მოხსნა და სტაბილური სტრუქტურული ბარიერების შექმნა, რომლებიც ბლოკავს მაგმატურ არხებს.

ეს მიდგომა გულისხმობს ქანების განადგურებას მაღალი სტრესის ზონებში, რასაც მოჰყვება მათი შერწყმა და გაციება თერმული ენერგიის გავლენით. ეს მოემსახურება მონოლითური ბარიერის ფორმირებას, რომელსაც შეუძლია მთლიანად ან ნაწილობრივ დაბლოკოს მაგმის წვდომა ზედაპირზე. თერმოდინამიკურ ფორსირებას ასევე შეუძლია შეამციროს ტექტონიკური სტრესი, რაც ამცირებს შემდგომი ამოფრქვევის ალბათობას.

ბირთვული აფეთქებების განხორციელებისთვის საჭიროა გამოთვლების მაღალი სიზუსტე, მათ შორის ლითოსტატიკური წნევის, ქანების სიხისტისა და სიმკვრივის შეფასება, აგრეთვე მაგმური დნობის მახასიათებლები. ეს ფაქტორები უნდა იქნას გათვალისწინებული მეთოდის მაქსიმალური ეფექტურობის მისაღწევად და შესაძლო რისკების მინიმიზაციისთვის.

ჭაბურღილების ბურღვისთვის ოპტიმალური დროის შერჩევა დაგეგმილი დეგაზაციის დროს

ამჟამად, ჩვენი სპეციალისტების ძირითადი ყურადღება გამახვილებულია დაგეგმილი დეგაზაციის ბურღვის ოპტიმალური ვადების შესწავლაზე. მიუხედავად იმისა, რომ ჯერ კიდევ ნაადრევია საბოლოო დასკვნების გამოტანა, წინასწარი გათვლები უკვე მიუთითებს დეგაზაციის დაწყების ყველაზე ხელსაყრელი დროის ზუსტად შერჩევის შესაძლებლობაზე. მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ თუ დრო სწორად არის შერჩეული, შესაძლო გართულებების რისკი შეიძლება რამდენჯერმე შემცირდეს.

ბურღვის პროცესის დროს აუცილებელია გავითვალისწინოთ არა მხოლოდ ქანების ფიზიკური და მექანიკური მახასიათებლები, მათ შორის მათი სიმტკიცე და დაბზარვა, არამედ დროის პარამეტრები, რომლებიც დაკავშირებულია ციურ მექანიკასთან. გამოთვლები უნდა ეფუძნებოდეს

დედამიწის პოზიციის ანალიზს ეკლიპტიკაზე, მთვარის ფაზაზე, ისეთი ძირითადი პლანეტების მდებარეობაზე, როგორიცაა იუპიტერი და მზის აქტივობის ამჟამინდელი დონე. გარდა ამისა, მნიშვნელოვანი ფაქტორია ღრმა ფოკუსის მიწისძვრების მონიტორინგი მომავალი ბურღვის რეგიონში, რადგან მათ შეუძლიათ მნიშვნელოვნად გაზარდონ ადგილობრივი სეისმური აქტივობა.

ამჟამად ჩამოყალიბებულია ზოგადი წარმოდგენა პროცესის მექანიზმისა და ძირითადი შაბლონების შესახებ, მაგრამ ეს მონაცემები საჭიროებს შემდგომ მრავალჯერად შემოწმებას. მიღებული შედეგები არა მხოლოდ გულდასმით უნდა შემოწმდეს ჩვენი სამეცნიერო ჯგუფის მიერ, არამედ დადასტურდეს დამოუკიდებელი კვლევებითა და სხვა სპეციალისტების მოდელებით.

ციმბირის პლუმის დაგეგმილი დეგაზაციის შედეგების სცენარები

ციმბირის პლუმის დაგეგმილი დეგაზაციის დროს შესაძლებელია სამი ძირითადი სცენარი, რომელიც გამოითვლება პროექტის ორი ეტაპის გათვალისწინებით: ადრეული და შემდგომი ეტაპები. მოდით შევხედოთ მათ უფრო დეტალურად.

1. მინიმალური ზიანი რუსეთის

ტერიტორიაზე

თუ მეორადი მაგმატური კამერებიდან გაზების და ჭარბი ლავის გამონადენის პროცესი მოდელირებული იქნება ექსპერტთა საერთაშორისო ჯგუფის მიერ და გამოთვლები საგულდაგულოდ და ზუსტად შესრულდება ყველა გეოლოგიური მახასიათებლის

გათვალისწინებით, დეგაზაციის ორივე ეტაპი უბედური შემთხვევისა და გართულებების გარეშე წარიმართება. მაშინ რუსეთის ტერიტორიის დაზიანება მინიმუმამდე შემცირდება: ზარალი იქნება ქვეყნის ტერიტორიის 5-7%, უკიდურეს შემთხვევაში 10%-მდე (ზარალის რადიუსი არის დაახლოებით 500-600 კმ). ამ სცენარის ფარგლებში შესაძლებელია კრასნოიარსკის ტერიტორიის დიდი ქალაქების დაცვა და სიცოცხლის დაკარგვის თავიდან აცილება. უფრო მეტიც, ვარაუდობენ, რომ თუ მოვლენები დადებითად განვითარდება, ლავის ნაკადი შეიძლება გადაიმართოს არქტიკული ზღვებისკენ, რაც საშუალებას მისცემს რუსეთს გაზარდოს თავისი ტერიტორია სანაპირო ზოლის გაფართოებით.

2. საშუალო ზიანი რუსეთის ტერიტორიისთვის

ეს სცენარი ვარაუდობს, რომ გაჟონვის ადრეული ეტაპი წარმატებული იქნება, მაგრამ შემდგომ ეტაპებზე შეიძლება წარმოიშვას გაუთვალისწინებელი გართულებები, როგორცაა მოულოდნელი გაზის აფეთქება ან ლავის ნაკადი. ვინაიდან ამ დროისთვის ზოგიერთი აირი და ლავა უკვე გამოიყოფა, შედეგები ნაკლებად დამლუპველი იქნება. შეიძლება მოხდეს ბაზალტის ლავის ნაკადი, ტიპიური ისლანდიისთვის ან ჰავაიისთვის, ან ზომიერად ფეთქებადი ამოფრქვევა. ამ შემთხვევაში ტერიტორიის შესაძლო დაკარგვა გაიზრდება 25-30%-მდე (დაახლოებით 4-5 მილიონი კმ²). შედეგებმა შეიძლება გავლენა მოახდინოს ქალაქებზე აქტიური ზონიდან 1000 კილომეტრის რადიუსში. თუმცა, ეს სცენარი არ გამოიწვევს ცივილიზაციის

გლობალურ კატასტროფას ან შეუქცევად განადგურებას რუსეთის ტერიტორიაზე. კაცობრიობა შეძლებს გაუმკლავდეს ახალ კლიმატსა და გარემოს გამოწვევებს.

3. მაქსიმალური ზიანი რუსეთს და მთელ მსოფლიოს

ეს სცენარი ვარაუდობს, რომ დაგვიანებული წამოწყება ან სპეციალისტების არასაკმარისი კვალიფიკაცია სერიოზულ პრობლემებს გამოიწვევს. კვლევის ნაკლებობამ, არასწორმა გაანგარიშებამ ან რბილ ან დაბზარულ ქანებში ბურღვამ შეიძლება შეაფერხოს ოპერაცია. თუ გართულება ხდება დეგაზირების ადრეულ ეტაპზე, როდესაც კერაში წნევა ყველაზე მაღალია, ამან შეიძლება გამოიწვიოს ორი კატასტროფული შედეგიდან ერთ-ერთი: ციმბირის პლუმის მთელი სისტემის მყისიერი აფეთქება ან ნელი, მაგრამ ფართომასშტაბიანი ლავის გამონადენი, ციმბირის ბილიკების ფორმირების მსგავსი. მიუხედავად პოტენციური რისკებისა, ასეთი განვითარების ალბათობა უკიდურესად დაბალია, ვინაიდან ძნელი წარმოსადგენია ასეთი რთული პროექტის განხორციელება სათანადო საერთაშორისო მომზადების გარეშე.

ოპტიმისტური და ყველაზე სავარაუდო სცენარი ითვალისწინებს რუსეთის ტერიტორიის მხოლოდ 5-7%-ის დაკარგვას მინიმალური ზიანით. შემდგომ ეტაპებზე გართულებების შემთხვევაშიც კი ზიანი შეიძლება გაიზარდოს 25-30%-მდე, რაც მნიშვნელოვნად უფრო ხელსაყრელი რჩება, ვიდრე უმოქმედობის შედეგები. რუსეთისთვის ან მთელი მსოფლიოსთვის დაგეგმილი დეგაზაციის პროცესის დროს უფრო სერიოზული განადგურების რისკი უმნიშვნელოა.

დაგეგმილი დეგაზირების განხორციელება რუსეთს მისცემს უნიკალურ გამოცდილებას გლობალური გეოდინამიკური რისკების მართვაში, რაც გააძლიერებს მის, როგორც საერთაშორისო სამეცნიერო და ტექნოლოგიურ ლიდერის პოზიციას. პროექტის წარმატებით განხორციელება გამოავლენს ქვეყნის უნარს გაუმკლავდეს პლანეტარული მასშტაბის გამოწვევებს, რაც ხელს შეუწყობს გლობალური თანამშრომლობის გაძლიერებას ბუნებრივი კატასტროფების პრევენციის სფეროში. ეს არა მხოლოდ შიდა პოლიტიკურ და სოციალურ ვითარებას დაასტაბილურებს, არამედ გააძლიერებს საერთაშორისო თანამშრომლობას გლობალური პრობლემების გადასაჭრელად.

ციმბირის პლუმის კონტროლირებადმა გაჟონვამ შეიძლება გავლენა მოახდინოს არა მხოლოდ ადგილობრივ ტერიტორიაზე, არამედ სხვა ვულკანურ სისტემებზე, როგორიცაა Yellowstone და სტრატოვულკანები მთელს მსოფლიოში. მაგმატური რეზერვუარები და მათი დინამიკა ქმნის ერთიან ურთიერთდაკავშირებულ გლობალურ ქსელს, რომელიც ფუნქციონირებს როგორც ერთი გეომექანიკური მექანიზმი. ერთ სეგმენტში კონტროლირებადმა წნევის დაწევამ შეიძლება შეამციროს სტრესის სისტემა მაგმის რეზერვუარებში, რაც თავიდან აიცილებს ჯაჭვურ რეაქციებს და ამოფრქვევებს. ეს

შეიძლება მივიჩნიოთ, როგორც მანქანის საბურავის დეპრესია: წნევის დაქვეითება მის ერთ ნაწილში საშუალებას იძლევა გადანაწილდეს დატვირთვა და თავიდან აიცილოს რღვევა კრიტიკულად დაძაბულ ადგილებში. დეგაზირების მსგავსმა მიდგომამ შეიძლება ხელი შეუწყოს მაგმატური სისტემების სტაბილიზაციას მსოფლიო მასშტაბით.

ამრიგად, დაგეგმილი კონტროლირებადი დეგაზირების განხორციელება ნებისმიერ შემთხვევაში რჩება ერთადერთ შანსი გადავარჩინოთ როგორც რუსეთი, ისე მთელი კაცობრიობა, რაც შეუდარებლად უფრო მომგებიანი და გონივრულია ვიდრე უმოქმედობა. ეს სცენარი თავიდან აიცილებს გლობალურ კატასტროფას და აძლევს კაცობრიობას დროს შემდგომი გადაწყვეტილებების შემუშავებისთვის.

თუმცა, მიუხედავად მნიშვნელოვანი პერსპექტივისა, თუნდაც ოპტიმისტური სცენარის წარმატებით განხორციელება შთამბეჭდავი მასშტაბის გამოწვევა იქნება. აუცილებელია მოქმედება ახლავ, რადგან დაგვიანება ზრდის კატასტროფული მოვლენების ალბათობას. გასაკვირია, რომ ასეთი პროექტის განხორციელებას შეიძლება შეექმნას წინააღმდეგობები რუსეთში, ინფრასტრუქტურის განადგურების პოტენციური რისკების გათვალისწინებით და სტრატეგიულ რესურსებზე კონტროლის შესუსტება.

■ დასკვნები

ციმბირის პლუმი უქმნის გლობალურ გეოდინამიკურ საფრთხეს, რომელიც შედარებულია უდიდესი სუპერკულკანების ათასობით კატასტროფულ ამოფრქვევასთან. თუ უკონტროლო ამოფრქვევა მოხდება, მას შეიძლება ჰქონდეს შედეგებზემთელი პლანეტის მაშტაბით, მათ შორის გამყინვარების პერიოდის დაწყება, ეკოსისტემების განადგურება, ინფრასტრუქტურის განადგურება და კაცობრიობის დაკარგვა. ეს რისკები კარნახობს პრევენციული ზომების გატარების აუცილებლობას ციმბირის პლუმის მაგმატური სისტემის დაგეგმილი დეგაზაციის სახით.

უმოქმედობა ქმნის სპონტანური, უკონტროლო ამოფრქვევის საფრთხეს, რომლის შედეგები კატასტროფული იქნება არა მხოლოდ რუსეთისთვის, არამედ მთელი პლანეტისთვის. მაგმის კამერების კონტროლირებადი დეპრესია ხელს შეუწყობს უარესი სცენარის თავიდან აცილებას და კაცობრიობას აძლევს სასიცოცხლო დროს გრძელვადიანი გადაწყვეტილებების შემუშავებისთვის.

გარდა ამისა, ატმოსფერული წყლის გენერატორის ტექნოლოგიის ინტეგრირება ყოველდღიურ გამოყენებაში ციმბირის წიაღის გაჟონვასთან ერთად შექმნის ახალ შესაძლებლობებს ეკოლოგიური ბალანსის აღდგენისთვის. ეს ხელს შეუწყობს ოკეანის პლასტმასისგან გაწმენდას, წყლის ციკლის გაძლიერებას და პლანეტის თერმული ბალანსის

აღდგენას. ასეთი გადაწყვეტილებების ყოვლისმომცველ განხორციელებას შეუძლია კლიმატის სიტუაციის სტაბილიზაცია და მთელი კაცობრიობის მომავლის უზრუნველყოფა, 12000-წლიანი ციკლის განმავლობაში კატასტროფული მოვლენების გამომწვევი გარე კოსმოსური გავლენის პრობლემის გადაჭრის დროს.

ეს გამოწვევები მოითხოვს გადაუდებელ საერთაშორისო თანამშრომლობას სხვადასხვა დისციპლინის მეცნიერებს შორის, კვანტური ფიზიკოსების ჩათვლით, რათა შეიმუშაონ და განახორციელონ ყოვლისმომცველი გადაწყვეტილებები. თუმცა, გეოპოლიტიკური და სამხედრო კონფლიქტები ხელს უშლის ასეთ თანამშრომლობას. საჭიროა ომებზე გლობალური მორატორიუმი და სამხედრო რესურსების გადამისამართება კატასტროფების შერბილებისა და ჰუმანიტარული მცდელობებისკენ. კაცობრიობას მხოლოდ 4-6 წელი რჩება შედარებით სტაბილური დრო საჭირო ზომების მისაღებად.

თუ ღია თანამშრომლობის პირობები შეიქმნება, მაშინ მეცნიერები ნულიდან არ დაიწყებენ, ვინაიდან ამ მიმართულებით უკვე არსებობს რეალური განვითარება და მიზეზ-შედეგობრივი ურთიერთობების გააზრება. კაცობრიობის უუნარობა მიენიჭოს პრიორიტეტი გლობალურ ერთობას და სამეცნიერო თანამშრომლობას, გამოიწვევს შეუქცევად შედეგებს დედამიწაზე სიცოცხლისათვის.

■ დანართი 1

სეისმური აქტივობის ანალიზის მეთოდოლოგია მოიცავდა საერთაშორისო სეისმოლოგიური ცენტრის (ISC) ვებგვერდიდან მიღებული მონაცემების ჩამოტვირთვასა და სპეციალურ დამუშავებას. ვინაიდან მონაცემები შეიცავს სხვადასხვა წყაროს სხვადასხვა ქვეყნიდან და კვლევითი ინსტიტუტიდან, ასევე სხვადასხვა სიდიდის ტიპებს (Mw, Ms, Mb, ML, MD და ა.შ.), შესრულდა მონაცემთა დამუშავების გარკვეული ალგორითმი სხვადასხვა წყაროდან შესაბამისი სიდიდის ტიპის შესარჩევად. ჩვენ გამოვიყენეთ ორი განსხვავებული მიდგომა:

1. ტექსტში მოხსენიებულია, **მედიანური სიდიდის მნიშვნელობების სპეციალური ალგორითმის გამოყენებით**. მეთოდი გულისხმობს სასურველი სიდიდის შეფასების შერჩევას და მოვლენის ჩართვას ნიმუშში, თუ სასურველი შეფასება არის საჭირო სიდიდის დიაპაზონში. ჩვენ ვირჩევთ სასურველ სიდიდის შეფასებას შემდეგი სიდიდის ტიპების შეფასებებს შორის ძიებით (უპირატესობის მიხედვით): Mw, ML, MS, Mb, MD, MV. თუ არსებობს სიდიდეების ნიმუში ერთი მოვლენისთვის სასურველი ტიპისთვის, მაშინ ამ მოვლენისთვის შერჩეული ტიპის ყველა სიდიდის შეფასება მიიღება მედიანას გამოსათვლელად. შემდეგ მათთვის მედიანა მოიძებნება. თუ არ არის მოცემული მოვლენისთვის ზემოაღნიშნული უპირატესი ტიპებიდან რომელიმეს შეფასება (რაც იშვიათია,

მოვლენების მხოლოდ რამდენიმე პროცენტია მთელ მონაცემთა ბაზაში), მაშინ არჩეულია ნებისმიერი სიდიდის შეფასება მნიშვნელობით, რომელიც ემთხვევა ამ მოვლენისთვის ყველა სიდიდის ტიპებიდან გამოთვლილ მედიანას.

2. ტექსტში მოხსენიებული **ალგორითმი მაქსიმალური სიდიდის მაგნიტუდის**. არჩეულია სიდიდის შეფასება, რომელსაც აქვს ყველაზე მაღალი მნიშვნელობა მოცემული მოვლენისთვის ყველა სიდიდის შეფასებას შორის.

პირველი ალგორითმი საშუალოდ იწვევს სიდიდის მცირე შემცირებას მაქსიმალურ გადამცემ მნიშვნელობასთან მიმართებაში, მაგრამ გამოცდილებამ აჩვენა, რომ მედიანა ალგორითმი იძლევა გუტენბერგ-რიხტერის კანონის და სხვა კანონზომიერებების ადეკვატურ ქცევას და საკმაოდ კარგად ეთანხმება სხვა სეისმოლოგიური მონაცემთა ბაზების მონაცემებს, როგორიცაა US Geological Survey (USGS) და Seismology Research Institute (IRIS).

მეორე ალგორითმი საშუალებას გვაძლევს გამოვთვალოთ რომელიმე კვლევითი ინსტიტუტის მიერ რეგისტრირებული მიწისძვრების რაოდენობა შერჩეულზე მაღალი მნიშვნელობით. ეს ანალიზი საშუალებას გვაძლევს დავინახოთ მიწისძვრების რაოდენობის ტენდენცია შერჩეულ მაგნიტუდის დიაპაზონში.

ყველა გრაფიკი, რომელიც წარმოდგენილია განყოფილებაში

„სეისმური აქტივობის ზრდა, როგორც ფირფიტის დესტაბილიზაციის ნიშანი, ციმბირის მაგმატური პლუმის აქტივობის შედეგად“ აშენდა პირველი ალგორითმის, მედიანური სიდიდის მნიშვნელობების სპეციალური ალგორითმის გამოყენებით (ნახ. 44–75).

სიდიდის შერჩევის შემდეგ მიღებული მონაცემები გაფილტრული იქნა მოვლენების ტიპების მიხედვით ISC მონაცემთა ბაზაში, რათა გამოირიცხოს სამთო ოპერაციების დროს ადამიანის აქტივობით გამოწვეული მოვლენები: აფეთქებები, შესაძლებელი აფეთქებები, ქანების აფეთქება და ა.შ. გამორიცხული იყო მოვლენების შემდეგი ტიპები:

კმ = ცნობილი ნალმის აფეთქება — ცნობილი ნალმის აფეთქება

სმ = ნალმის სავარაუდო აფეთქება

kh = ცნობილი ქიმიური აფეთქება (არასტანდარტული IMS)

sh = სავარაუდო ქიმიური აფეთქება (არასტანდარტული IMS)

kx = ცნობილი ექსპერიმენტული აფეთქება — ცნობილი ექსპერიმენტული აფეთქება

sx = საეჭვო ექსპერიმენტული აფეთქება

kn = ცნობილი ბირთვული აფეთქება — ცნობილი ბირთვული აფეთქება

sn = სავარაუდო ბირთვული აფეთქება.

ასევე, რადგან რუსეთში ბევრი სამთო საწარმოა, ISC მონაცემთა ბაზა შეადარეს რუსეთის მეცნიერებათა აკადემიის ერთიანი გეოფიზიკური სამსახურის მონაცემებს 2025 წლის იანვრისთვის, რაც მიუთითებს რუსეთში ყველა ცნობილ აფეთქებებსა და ქანების აფეთქებაზე. ეს მოვლენები ასევე გამოირიცხა იმის უზრუნველსაყოფად, რომ აფეთქებებთან შესაბამისი მოვლენები არ დარჩენილა მიღებულ მონაცემებში.

ლიტერატურის სია

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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