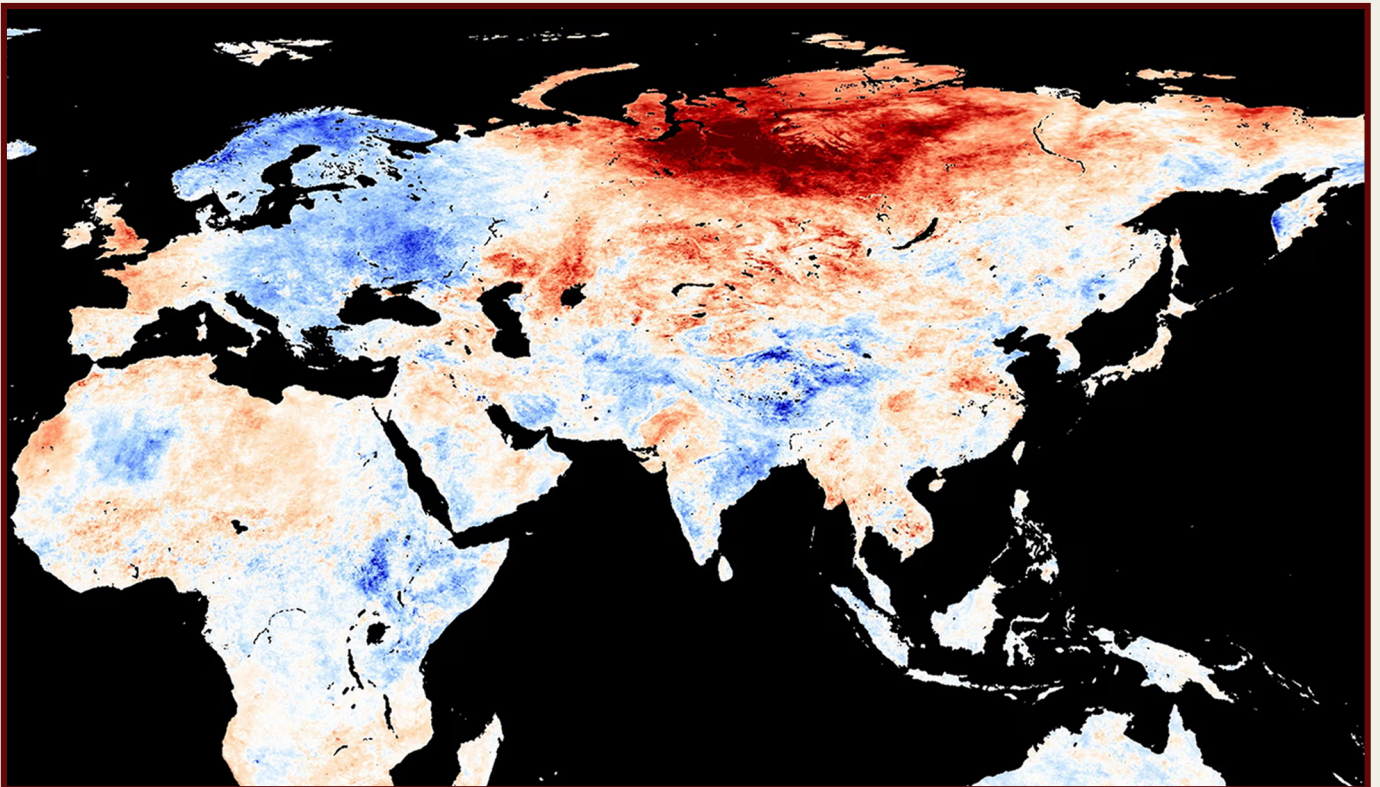


ПРО ЗАГРОЗУ ПРОРИВУ

МАГМАТИЧНОГО ПЛЮМУ В СИБІРУ

ТА ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ЦІЄЇ ПРОБЛЕМИ



**ПРО ЗАГРОЗУ ПРОРИВУ
МАГМАТИЧНОГО ПЛЮМУ В СИБІРУ
ТА ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ ЦІЄЇ ПРОБЛЕМИ**

Зміст

Стислий опис геодинамічної моделі зміни клімату на Землі у поточний період часу.....	4
Зміщення ядра у бік Сибіру 1998 року.....	16
Сибір і Сибірська Арктика нагріваються в 3–4 рази швидше решти світу.....	21
Непрямі ознаки підйому Сибірського плюму.....	25
Танення вічної мерзлоти.....	27
Прояви грязьового вулканізму.....	29
Нагрівання ґрунтів.....	31
Температура приземного повітря.....	32
Збільшення кількості блискавок.....	34
Виснаження озонового шару.....	36
Будова, можливі розміри та локалізація магматичного плюму на підставі літературних і спостережуваних даних.....	38
Локалізація магматичного плюму.....	44
Зростання сейсмічної активності як ознака дестабілізації тектонічних плит.....	48
Обґрунтування неминучості виверження Сибірського плюму.....	74
Сценарій 1. Одномоментне виверження Сибірського плюму.....	76
Активація супервулканів і вулканічних систем.....	83
Кислотні дощі.....	85
Вулканічна зима.....	86
Сценарій 2. Поступове виверження Сибірського плюму.....	88
Наслідки поступового прориву Сибірського плюму для Росії.....	94
Наслідки поступового прориву Сибірського плюму для всього світу.....	95
Довгострокові наслідки поступового прориву Сибірського плюму для планети.....	96
Сценарій 3. Планова контрольована дегазація.....	97
Існуючі методики вулканічної геоінженерії.....	97
Приклад програми планової дегазації Сибірського плюму.....	104
Обґрунтування вибору місця закладення науково-дослідних свердловин для моніторингу динаміки сучасного магматичного плюму Сибіру.....	106
Особливості буріння та проведення блокування магматичних каналів під час планової дегазації.....	110
Вибір оптимального часу для буріння свердловин під час планової дегазації.....	111
Сценарії результатів проведення планової дегазації Сибірського плюму.....	112
Висновки.....	114
Додаток 1.....	115
Перелік літератури.....	117

Стислий опис геодинамічної моделі зміни клімату на Землі у поточний період часу

Останні 30 років на Землі відбувається безпрецедентне та синхронне зростання кліматичних змін, аномалій та екстремальних явищ в усіх оболонках планети та її геофізичних параметрах. Прогрес цих змін прискорюється експоненційно. Комплексний аналіз наукових даних свідчить, що основними причинами зростання аномалій в усіх оболонках Землі є астрономічні цикли, що відбуваються з усією Сонячною системою кожні 12 000 років.

Гіпотезу про зовнішній астрономічний вплив підтверджено спостереженням схожих кліматичних, геодинамічних і магнітних аномалій на інших планетах Сонячної системи та їхніх супутниках, що відбуваються в поточний період часу синхронно зі змінами на Землі. Так, наприклад, на Урані, Юпітері та Венері фіксується збільшення швидкості

вітрів і розмірів ураганів. Водночас на Марсі спостерігається танення льодовикових шапок на полюсах, а також вулканічна активність на Венері та Марсі продовжує зростати. Крім того, на Марсі посилюється сейсмічна активність, що вказує на появу аномальної геодинамічної активності.

Критичні зміни в системі Землі внаслідок астрономічної циклічності 12 000 років у поточному циклі розпочалися з 1995 року, коли було зафіксовано значні геофізичні аномалії, включно з різким прискоренням обертання Землі (Рис. 1) та зміщенням її осі¹ (Рис. 2) й початком різкого дрейфу північного магнітного полюсу² (Рис. 3). Ці зміни вказують на значні зміни в ядрі Землі.

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.

Відхилення тривалості доби за період з 1962 по 2023 рік

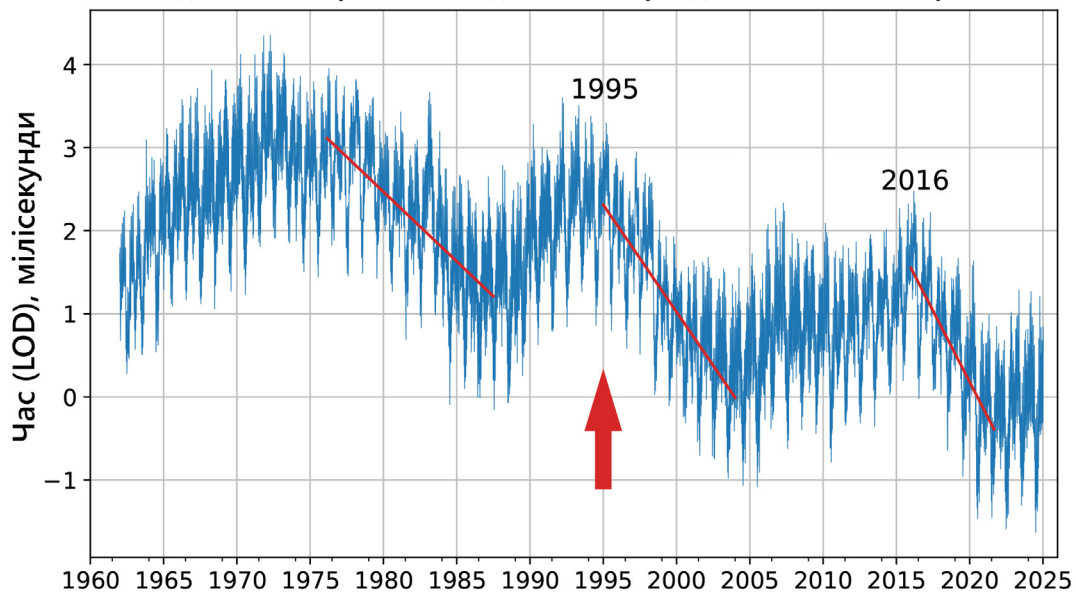


Рис. 1

Відхилення тривалості доби в мілісекундах за період з 1962 по 2023 рік.

Джерело даних: Центр орієнтації Землі в Паризькій обсерваторії (IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory). Довжина доби — параметри орієнтації Землі:

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

На рисунку червоні лінії — це лінії трендів, які показують, з якою швидкістю скорочується доба. Наприклад, лінія зліва більш полого, тоді як лінія праворуч, лінія прискорення з 2016 року, вже практично вертикальна, тобто доба скорочується в рази швидше, а це означає, що планета обертається швидше.

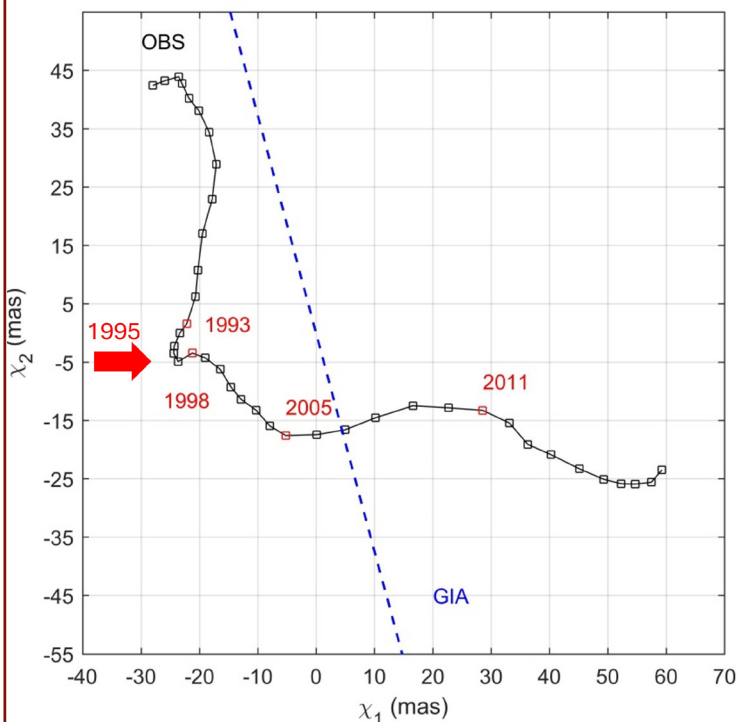


Рис. 2

Довгострокова траєкторія спостережуваного збудження після видалення річних і чандлерівських циклів методом ковзного середнього (чорна лінія з квадратами) та напрям полярного дрейфу, зумовленого GIA (синя штрихова лінія). Розмір підмножини ковзного середнього прийнято рівним 84 місяцям, що є найменшим спільним кратним 12 місяців (річний цикл) і 14 місяців (цикл Чандлера), згідно з дослідженням Лю (Liu) та співавторів (2017).

Джерело: Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). Полярний дрейф у 1990-х рр. пояснюється змінами в запасах наземної води. Листи геофізичних досліджень, 48(7). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>

Швидкість руху північного магнітного полюса (км/рік)

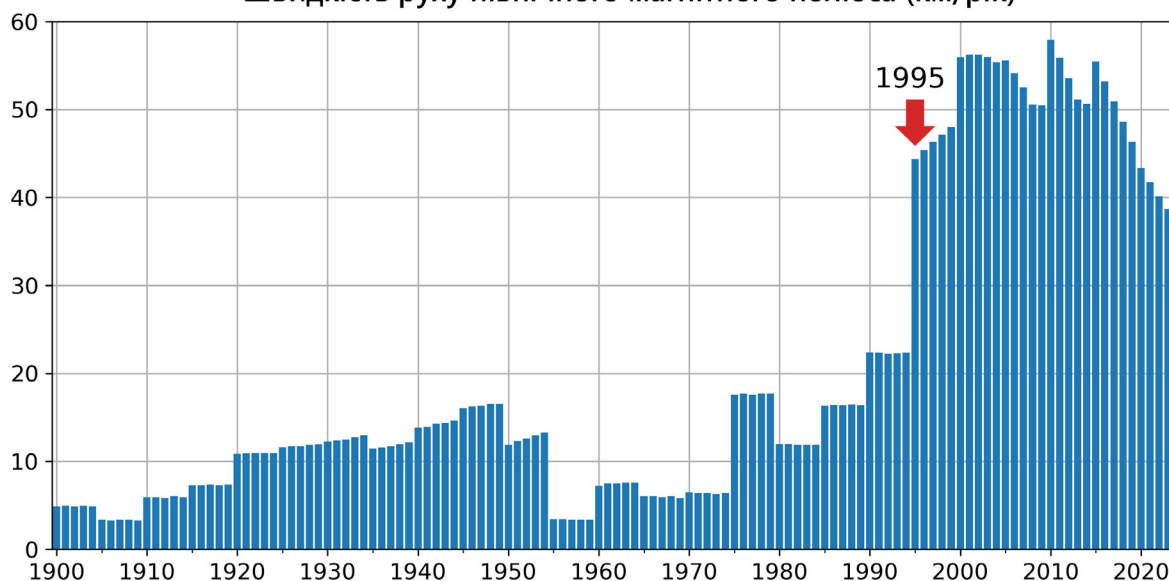


Рис. 3

Швидкість руху північного магнітного полюса (км/рік)

Джерело: дані положення північного магнітного полюса NOAA:

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

Згідно з гіпотезою, у цей момент часу Сонячна система почала входити до зони, в якій розпочався істотний зовнішній космічний вплив на планети, а саме на їхні ядра. Зміни, що відбулися з ядром Землі 1995 року, свідчать про збільшення нагріву зовнішнього ядра, з чого можна зробити висновок, що до ядра Землі почала надходити додаткова енергія. Такі глибокі зміни в ядрі Землі вимагають витрат у квадрильйони разів більше енергії, ніж людська цивілізація виробила за весь час свого існування. Надходження до ядра Землі енергії зовнішнього впливу призвело до активізації процесів, пов'язаних із розплавленням мантії, та підйому магми до поверхні, що спричинило ланцюгову реакцію сейсмічної та вулканічної активності, а також збільшення нагріву з надр і зростання кліматичних катаклізмів у всьому світі.

Так, наприклад, з 1995 року спостерігається значне зростання сейсмічної активності, що проявляється у збільшенні частоти, магнітуди та енергії землетрусів. Ця тенденція спостерігається як на континентах, так і на океанічному дні (Рис. 4), та охоплює регіони, які раніше не проявляли сейсмічної активності, що вказує на глобальний характер змін.

Важливо зазначити, що зростання кількості землетрусів магнітудою 5,0 і вище не пов'язане з поліпшенням технологій сейсмомоніторингу (Рис. 5), а відображає реальні зміни в геодинамічній системі Землі. Сумарні дані Міжнародного сейсмологічного центру підтверджують, що кількість землетрусів значно збільшилася за останні 25 років і продовжує зростати (Рис. 6).

Зростання кількості землетрусів на дні океану вздовж серединно-океанічних хребтів

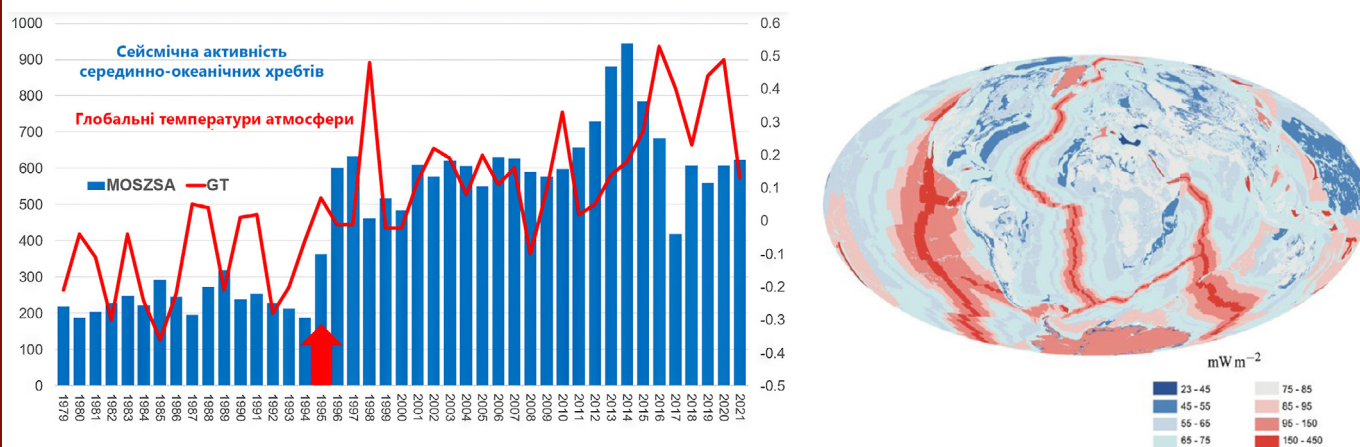


Рис. 4

Однчасне зростання кількості землетрусів на дні океану та глобальних температур атмосфери (ліворуч). Геотермальний нагрів серединно-океанічних хребтів (праворуч),
Davies & Davies, 2010 p.

Джерело: 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>

Схема ілюструє різкий стрибок кількості землетрусів 1995 року на дні океану вздовж серединно-океанічних хребтів і тісну кореляцію сейсмічності на дні океану з температурами атмосфери, що вказує на додаткове глибинне джерело нагріву як океану, так і атмосфери.

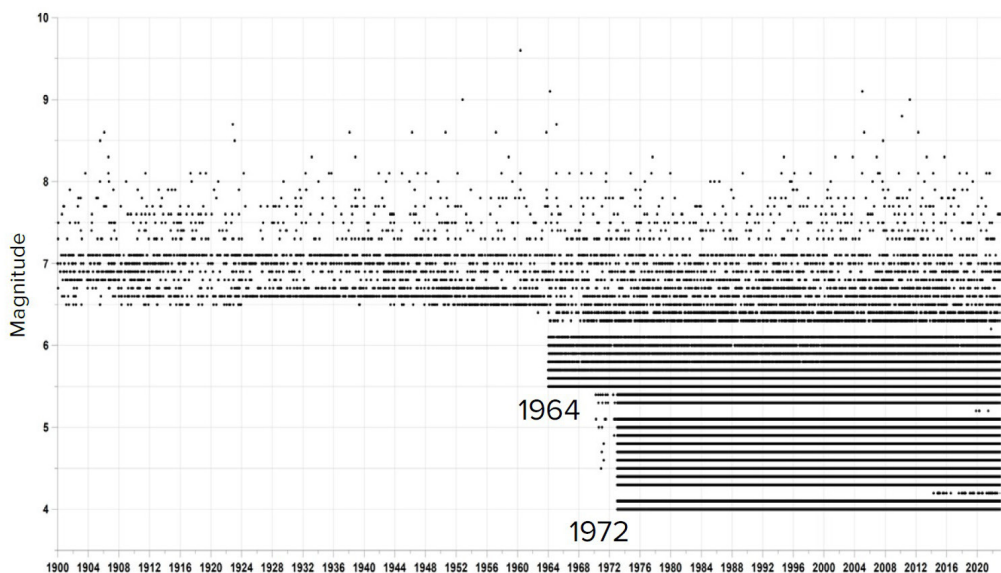


Рис. 5

На графіку чорними крапками відображено землетруси різної сили в різні роки.

До 1964 р. фіксувалися тільки землетруси магнітудою від 6,5 і вище. З 1964 р. (зі встановленням більш чутливих датчиків) — від 5,5 і вище. З 1972 р. — від 4,0 і вище, незалежно від місця.



Рис. 6
Землетруси магнітудою 5,0 і вище з 1979 по 2023 рік, згідно з базою даних ISC.

Вибірку даних було проведено за алгоритмом максимальних значень магнітуди, що містяться в базі даних ISC по кожній з подій (див. Додаток 1).

Крім того, поблизу вулканів спостерігається збільшення сейсмічної активності, зокрема й на супервулканах, таких як Єллоустоун у США, Кампі Флегрей в Італії, Таупо в Новій Зеландії та інші вулкани, що вивергалися в минулі цикли 12 000 років. Також зростає загальна кількість днів вивержень вулканів, що супроводжується аномальними виверженнями, під час яких лава, що викидається, перегріта й має нетиповий склад, характерний для магми з глибоких шарів мантії^{3,4,5,6,7}.

Особливу увагу привертає збільшення кількості глибокофокусних землетрусів, що відбуваються на глибинах понад 300 кілометрів, іноді до 750 кілометрів під поверхнею Землі. Ці явища виникають не в земній корі, а в мантії,

де матеріал мантії зазвичай деформується плавно, а не руйнується, що робить природу таких землетрусів незвичайною.

Оскільки ці землетруси відбуваються в умовах екстремального тиску та високих температур, можна зробити висновок, що це потужні вибухи, які за енергією можна порівняти з одночасним детонуванням величезної кількості атомних бомб усередині мантії Землі. Крім того, глибокофокусні землетруси часто запускають сильні землетруси в земній корі, посилюючи їхній руйнівний вплив^{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>

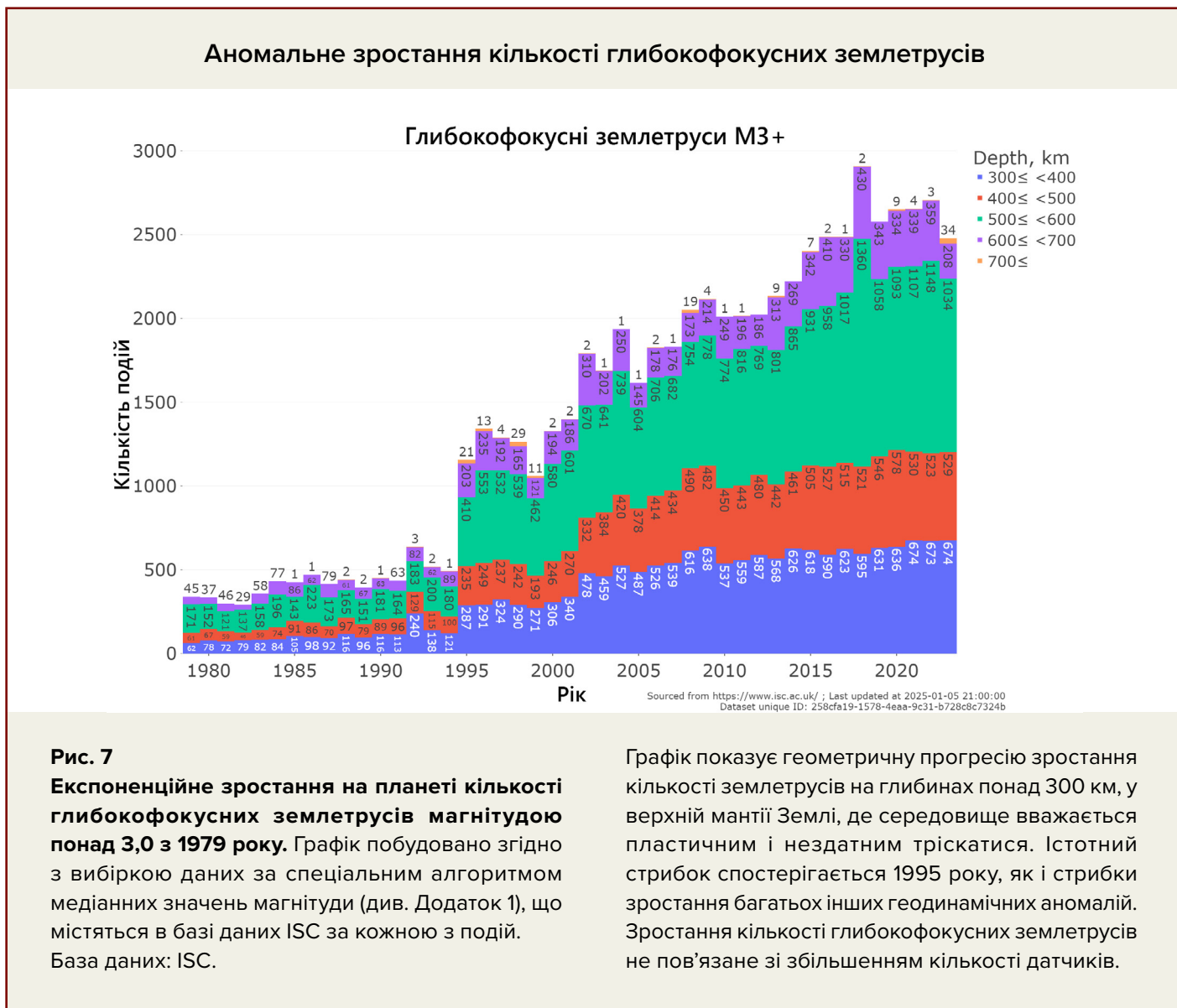
⁷D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports*, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>

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>

З 1995 року спостерігається стрімке експоненційне зростання кількості таких глибоких землетрусів (Рис. 7, 8), що збігається з іншими геодинамічними аномаліями, які розпочалися в той самий період. Зростання

цих внутрішньомантіїних вибухів вказує на збільшення енергії в глибинах планети та інтенсивне плавлення мантії, що може призвести до масштабних вивержень вулканів.



Аномальне зростання кількості глибокофокусних землетрусів

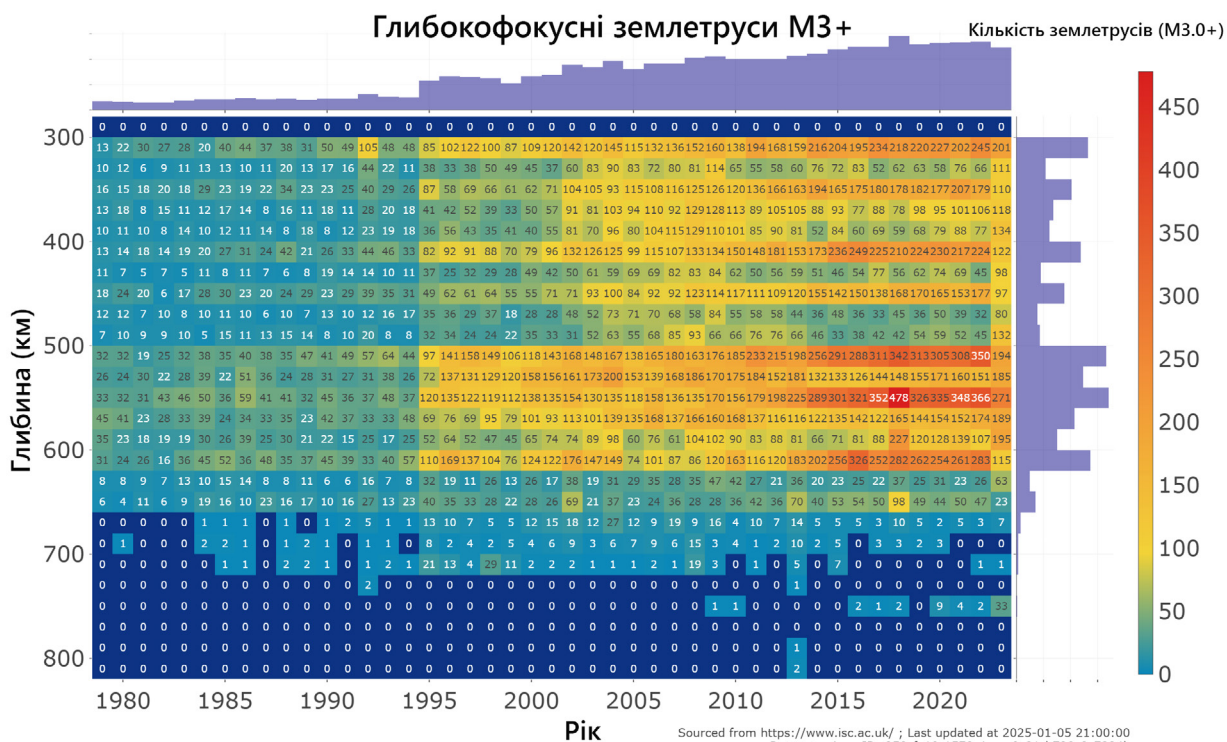


Рис. 8

Кількість глибокофокусних землетрусів магнітудою понад 3,0 за роками та глибинами.
База даних ISC.

Зростання кількості глибокофокусних землетрусів вказує на розплавлення мантії, що нагрівається від ядра. Розплавлена магма в мантії через відцентрові сили починає різко підніматися до поверхні Землі, розмиваючи й нагріваючи літосферу зсередини більше, ніж зазвичай. Саме підйом магми спричиняє збільшення геотермального потоку з надр, активацію магматичних плюмів під льодовиками Західної Антарктиди та центральної Гренландії, що прискорює танення льодовиків і вічної мерзлоти знизу догори.

Наразі океан нагрівається як ніколи раніше, що значно посилює екстремальні природні явища — повені, урагани та тропічні циклони.

Океан відіграє ключову роль у регулюванні тепла на планеті, адже він здатний поглинати й перерозподіляти надлишкове тепло, запобігаючи катастрофічним наслідкам. Однак зараз, коли посилюється нагрівання Землі через геодинамічну активність, спричинену астрономічними циклами, океан втратив свою функцію відводити тепло від надр. Це сталося через антропогенне забруднення океану. Пластикові відходи розкладаються до мікропластику та нанопластику, знижуючи теплопровідність води (Рис. 9).

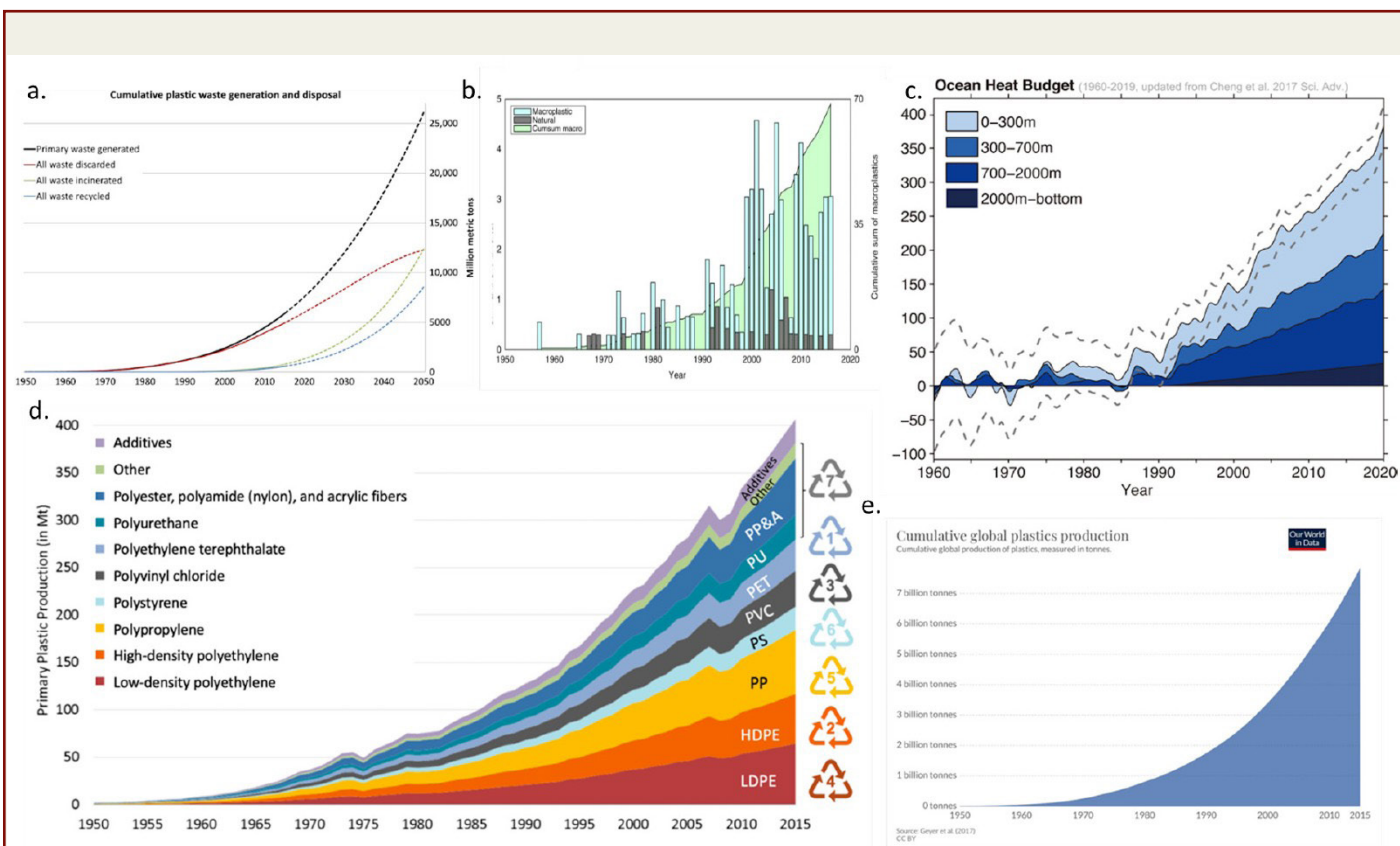


Рис. 9

Графік зміни температури океану за 1960–2019 рр. і зіставлення його з графіками зростання виробництва синтетичних полімерів, використання їх у різних галузях господарства та утилізації відходів пластику в океані (з різних джерел).

а) Сумарна кількість вироблених та утилізованих пластикових відходів

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>

б) Сумарна кількість макропластику в океані та річні показники

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>

с) Зміна температури Світового океану 1960–2019 рр. (Purkey and Johnson, 2010; з оновленням даних дослідження Cheng і співавторів, 2017)

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>

д) Світове виробництво первинного пластику за типами

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>

е) Сумарна кількість виробленого пластику з 1950 року

Джерело даних: Plastic Marine Pollution Global Dataset

Зростання температури води відбувається не лише на поверхні, але й по всій її товщі та на дні. Причиною нагріву океану є магма, яка піднімається та особливо сильно нагріває океанічну кору, яка є тоншою та вразливішою порівняно з континентальною.

Історичні дані з геологічних і крижаних кернів свідчать про те, що Земля стикалася з подібними катастрофічними циклами кожні 12 000 років¹⁰. А кожні 24 000 років планетарні катастрофи були в рази потужнішими, про що свідчать дослідження попільних шарів вивержень вулканів у кернах льоду¹¹ (Рис. 10) та інші геохронологічні дослідження. Саме до такого циклу наразі входить Земля. Однак поточний цикл посилюється антропогенними чинниками, зокрема забрудненням океанів, що дедалі більше погіршило здатність океанів регулювати енергетичний баланс Землі.

Внаслідок нагрівання океанів пластикові відходи розкладаються на мікропластик і нанопластик, що додатково знижує теплопровідність океанів. Ця втрата теплопровідності критично важлива в періоди посиленої геодинамічної активності, спричиненої астрономічними циклами. Накопичення надлишкової енергії в надрах Землі призвело до збільшення кількості глибокофокусних землетрусів і швидкого

формування нових магматичних вогнищ, що ще більше посилює нестабільність планети. Цей замкнений цикл прискорює нагрівання й дестабілізацію планети, наближаючи Землю до неминучої загибелі.

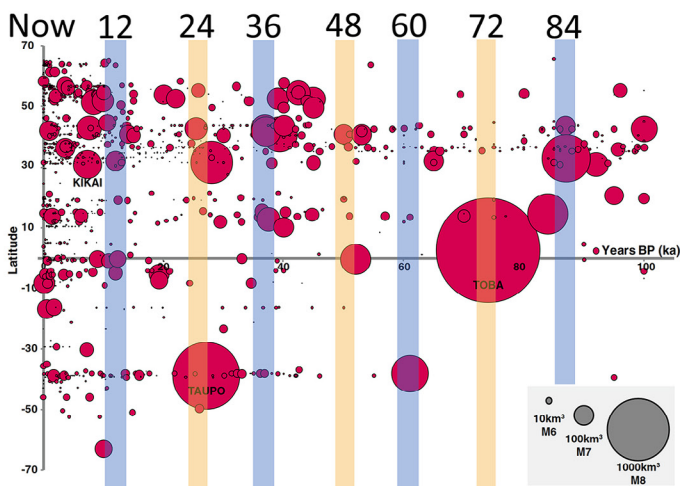
Математичне моделювання свідчить, що економічні та соціальні системи світу можуть зруйнуватися протягом найближчих 4–6 років через зростаючі збитки від кліматичних катастроф. Експоненційне зростання кількості катастрофічних подій загрожує зробити Землю непридатною для життя протягом наступного десятиліття (Рис. 11). На відміну від попередніх циклів, поточний стан планети, який посилюється забрудненням, викликаним діяльністю людини, залишає мало надії на виживання екосистем і самої планети Земля. **Важливо розуміти, що вирішення питання з океаном може уповільнити розвиток катаклізмів, але не зупинить їх.**

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

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

Катастрофічні виверження вулканів із циклом 12 000 років

Виверження світового масштабу з 2013 р. н. е. по 100 000 кал. р. між 70° пн. ш. і 70° пд. ш.



Шкала вулканічної активності

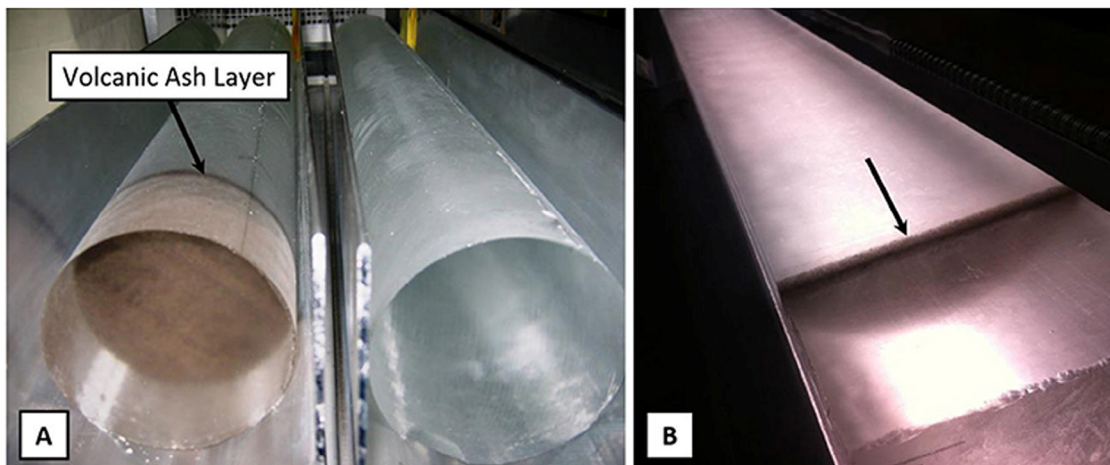
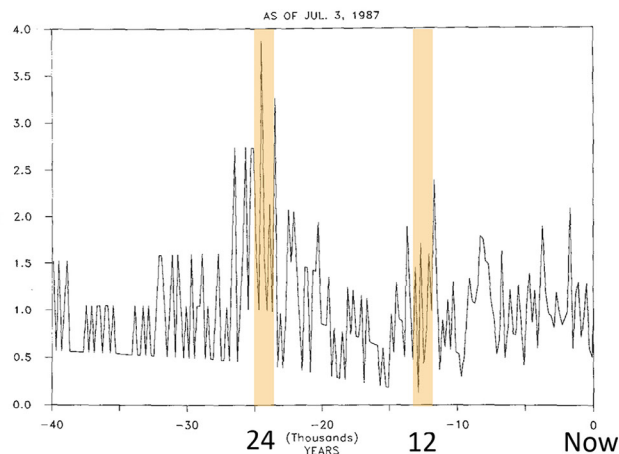


Рис. 10

Дані досліджень попільних шарів вивержень вулканів за останні 100 000 років у ядрах льоду Антарктики та Арктики з робіт різних авторів.

Джерело:

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

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

Графіки ілюструють катастрофічну вулканічну активність кожні 12 000 років і ще сильнішу — кожні 24 000 років (з урахуванням похибки визначень віку). Такі катастрофічні події призводили до різких перепадів температур, стихійних лих, вулканічних зим і масових вимирань видів. Багато супервулканів, що вивергалися в минулі цикли, почали показувати аномальну активність у наші дні, після 1995 року.

Прогресія наростання катаклізмів на прикладі землетрусів

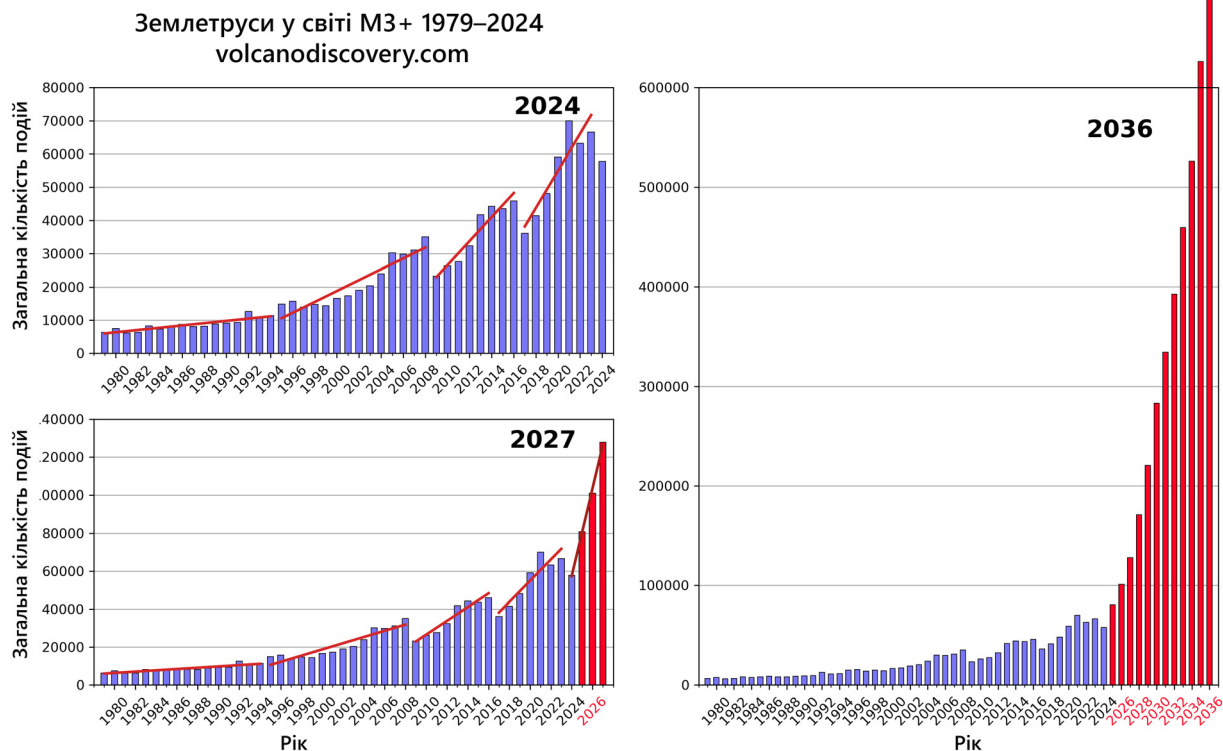


Рис. 11
Модель експоненційного зростання кількості природних катаклізмів на прикладі землетрусів до 2036 року

Графіки демонструють геометричну прогресію зростання кількості та сили землетрусів на планеті з урахуванням поточного тренду. На кожному наступному етапі кількість землетрусів

збільшується в 3 рази. Вже до 2028 року на Землі відбудуватиметься 1000 землетрусів на день магнітудою вище 3,0, тоді як вже зараз на день відбувається 125 землетрусів магнітудою вище 3,0. З високою ймовірністю вже через 6 років на Землі щодня відбудуватимуться землетруси, за своєю руйнівністю еквівалентні землетрусу в Туреччині та Сирії 6 лютого 2023 року.

Ця доповідь присвячена додатковій загрозі, викликаній змінами в ядрі внаслідок надходження до нього додаткової енергії. У 1997-1998 роках учені, використовуючи супутникові дані досліджень центра мас Землі, зафіксували безпрецедентне явище — скачок внутрішнього ядра Землі. Внаслідок цієї події ядро планети змістилося

на північ, по лінії від Західної Антарктиди до Східного Сибіру та півострова Таймир у Російській Федерації. Внаслідок цього зсуву ядра стався неконтрольований підйом магми в даному напрямку, за рахунок чого під Сибіром почало стрімко підніматися величезне магматичне вогнище.

Наразі Сибірський плюм уже досяг підшови земної кори в регіоні півночі Східно-Сибірського кратону й почав піднімати плиту. Це означає, що розпечена магма вже почала пропалювати собі шлях на поверхню. Неконтрольований прорив Сибірського плюму може призвести до глобального вимирання, не залишивши людству жодних шансів на виживання, оскільки, згідно з розрахунками, таке виверження в 1 000 разів перевершить за потужністю найсильніше виверження супервулкана Єллоустоун.

Схожі виверження магматичного плюму в Сибіру вже відбувалися 250 млн. років тому й призвели до великого пермського вимирання. Існує три варіанти подальшого розвитку подій, які описані в цій доповіді.

Також у доповіді запропоновано кроки із розв'язання проблеми підйому Сибірського плюму та мінімізації ризиків його неконтрольованого прориву.



Зміщення ядра вбік Сибіру 1998 року

У 1997-1998 роках учені, використовуючи супутникові дані досліджень центра мас Землі, зафіксували безпрецедентне явище — скачок внутрішнього ядра Землі^{12,13}. Внаслідок цієї події ядро планети змістилося

на північ, по лінії від Західної Антарктиди до півострова Таймир на півночі Східного Сибіру (Рис. 12).

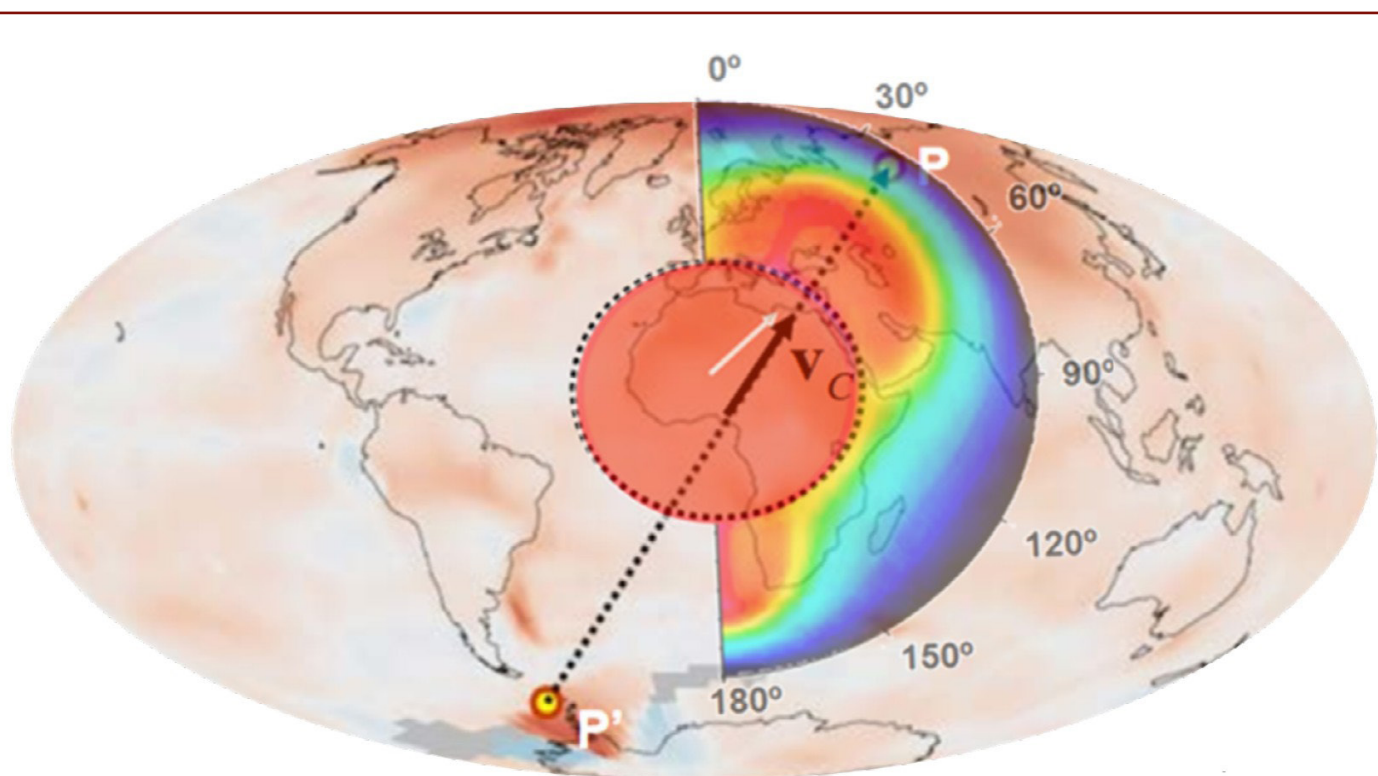


Рис. 12

Скачок ядра в 1997-1998 рр. і теплові хвилі в магмі, викликані зміщенням ядра. Ю.В. Баркін.

Карта ілюструє вектор зміщення внутрішнього ядра по лінії від Західної Антарктиди до Східного Сибіру, до півострова Таймир.

Схему нанесено на карту теплових аномалій атмосфери.

Джерело: Геофізичні наслідки відносних зсувів і коливань ядра та мантії Землі. Презентація Ю. В. Баркіна, Москва, ІФЗ, ОМТС. 16 вересня 2014 року.

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>

Одночасно з цим чотири різні наукові колективи, незалежно один від одного, зафіксували аномальні зміни різних геофізичних параметрів Землі. Згідно з супутниковими даними, колектив авторів із МДУ та Інституту фізики Землі РАН встановив скачок центра мас Землі 1998 року¹⁴ (Рис. 13).

У той самий період Міжнародна служба обертання Землі (МСОЗ) зафіксувала різке прискорення обертання планети. На станції Медічина в Італії вчені також зафіксували скачок сили тяжіння¹⁵. Одночасно з цим спостерігалася різка зміна форми Землі¹⁶,

виміряна за допомогою системи лазерної дальнометрії із супутників США.

На думку доктора фізико-математичних наук, професора Ю. В. Баркіна, доктора технічних наук, професора Г. Я. Смолькова¹⁷, доктора географічних наук, професора М.Л. Арушанова¹⁸, академіка РАН, заслуженого професора МДУ ім. Ломоносова, доктора геолого-мінералогічних наук В. Є. Хаїна¹⁹ та багатьох інших вчених, скачок ядра став причиною змін в усіх оболонках Землі.

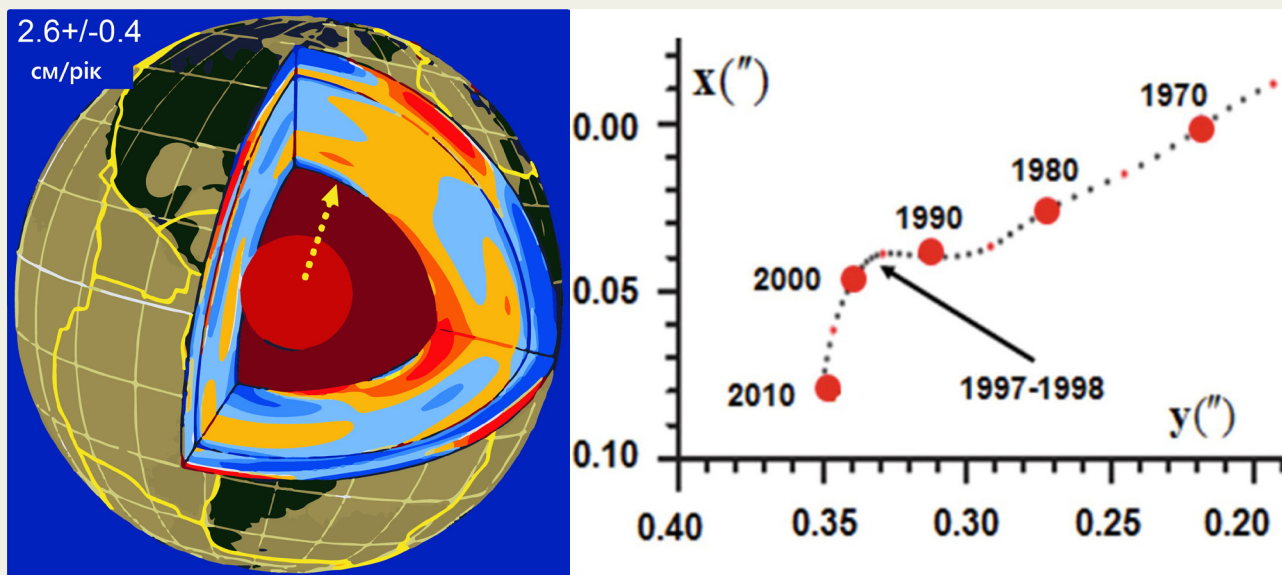


Рис. 13

Внутрішня будова Землі, напрям вікового дрейфу центра мас Землі та траєкторія його полюса на поверхні Землі в 1990–2010 рр. із поворотом майже на 90° в 1997–1998 рр. у напрямку півострова Таймир.

Джерело: Смольков Г. Я. // Геліогеофізичні дослідження. Випуск 25, 14–29, 2020.

<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569> (дата доступу: 01.02.2024)

Джерело графіка: Баркін Ю. В., Кліге Р. К., 2012.

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

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

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

¹⁷ Barkin, Yu. V., & Smolov, 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

Важливо зазначити, що саме в цьому напрямку 1995 року почався різкий дрейф північного магнітного полюса. Від початку минулого століття він рухався із середньою швидкістю 10 км/рік, а потім раптово збільшив свою швидкість, досягнувши в максимумі 57 км/рік, і змінив траєкторію, попрямувавши до Сибіру та півострова Таймир²⁰ (Рис. 3, 14).

Це вказує на те, що умови для зміщення ядра в напрямку півострова Таймир почали формуватися вже у 1995 році внаслідок розрідження зовнішнього рідкого ядра Землі. 2013 року вчені з університету Лідса встановили, що ці зміни магнітного поля почали відбуватися через прискорення потоку рідкого заліза в зовнішньому ядрі Землі²¹ (Рис. 15), яке, ймовірно, почалося 1995 року.

Виходячи з літературних даних, виявлено кореляцію між частотою інверсії магнітного поля та інтенсивністю мантійного магматизму^{22,23,24}. При цьому відомо, що інверсії магнітного поля, ймовірно, пов'язані з процесами, що протікають у зовнішньому ядрі поблизу межі ядро-мантія²⁵.

Кореляція між зміною інтенсивності мантійного магматизму та частотою інверсій магнітного поля Землі вказує на те, що збурення магнітного поля Землі виникають у зовнішньому ядрі внаслідок зміни інтенсивності теплопередачі на підосвах плюмів, що розташовуються на межі ядро-мантія.

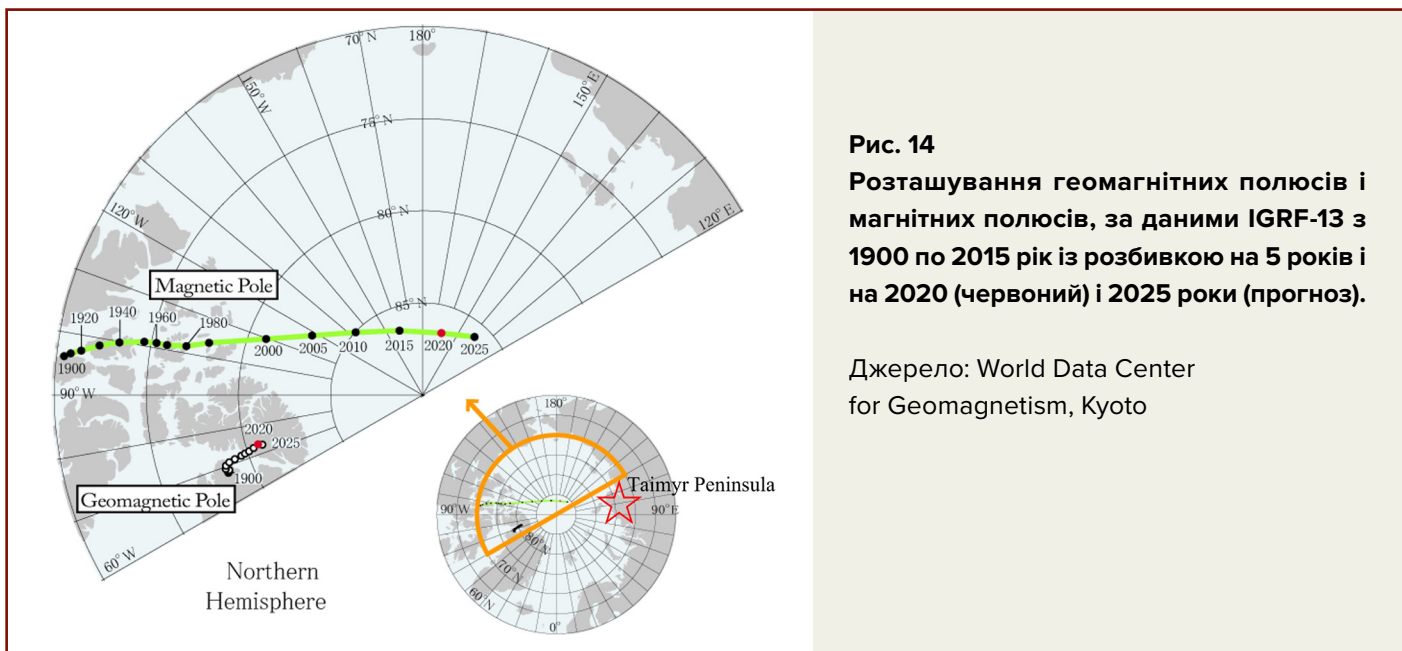


Рис. 14
Розташування геомагнітних полюсів і магнітних полюсів, за даними IGRF-13 з 1900 по 2015 рік із розбивкою на 5 років і на 2020 (червоний) і 2025 роки (прогноз).

Джерело: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto

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

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

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

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

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

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

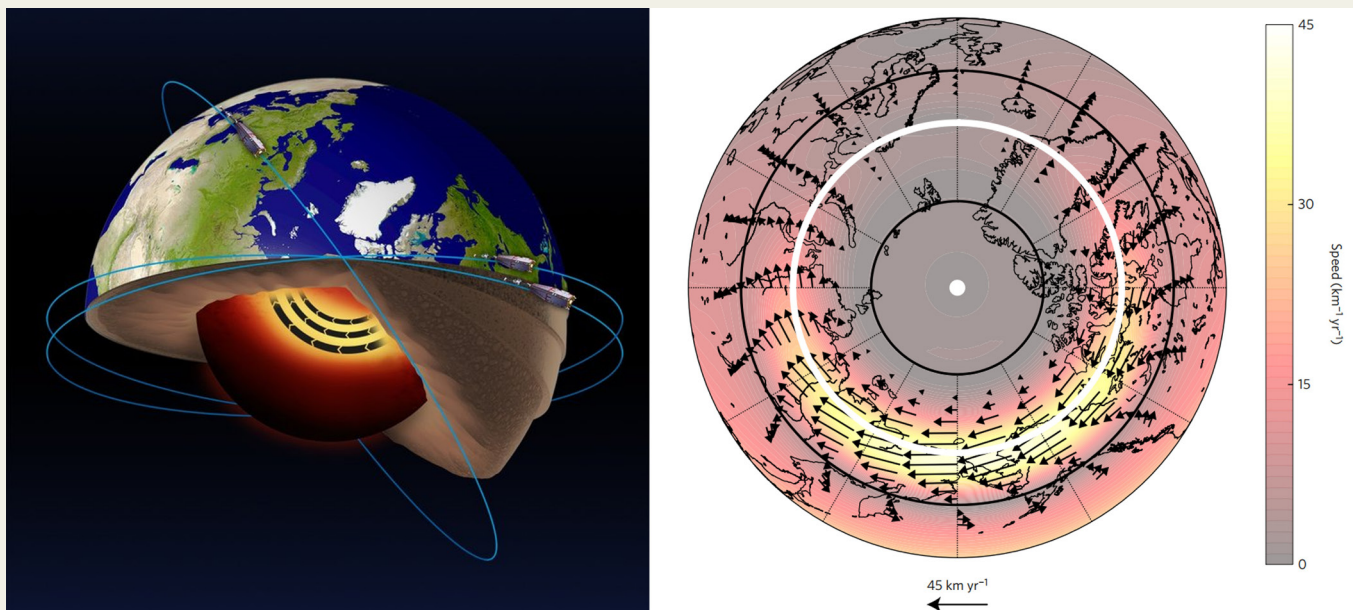


Рис. 15

Аналіз супутникових даних ЄКА Swarm показав наявність реактивного струменя в рідкій залізній частині ядра Землі на глибині 3 000 км під поверхнею. А також те, що ця реактивна течія прискорюється.

Джерело: ЄКА

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>

Збільшення сумарної теплової потужності плюмів відбувається внаслідок як зародження нових плюмів, так і збільшення теплової потужності вже активних плюмів. Можна припустити, що геодинамічні порушення у зовнішньому ядрі та мантиї виникають у періоди зародження та виливу плюму на поверхню²⁶. Отже, сучасний дрейф північного магнітного полюса у напрямку півострова Таймир може бути додатковим підтвердженням змін у зовнішньому рідкому ядрі Землі та різкого підйому плюму від межі ядро-мантия під Сибіром.

Таким чином, внаслідок надходження до ядра зовнішнього космічного впливу, 1995 року почалося нагрівання внутрішнього ядра Землі та розплавлення зовнішнього ядра, через що різко прискорився дрейф

північного магнітного полюса. Розрідження зовнішнього ядра створило умови, за яких у 1997-1998 роках відбувся зсув ядра в напрямку Сибіру, до півострова Таймир. Згідно з гіпотезою, висунутою доктором наук, професором Ю. В. Баркіним, зсув ядра спричинив асиметричний розподіл тепла в напрямку Сибіру (Рис. 16). Важливо зазначити, що перенесення тепла в мантиї здійснюється насамперед за рахунок конвективного перемішування. Тобто можна стверджувати, що скачок ядра передусім викликав підйом магми в напрямку Сибіру. Надалі почали спостерігати аномальне нагрівання атмосфери в цьому регіоні Сибіру, і з кожним роком це нагрівання посилюється.

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.

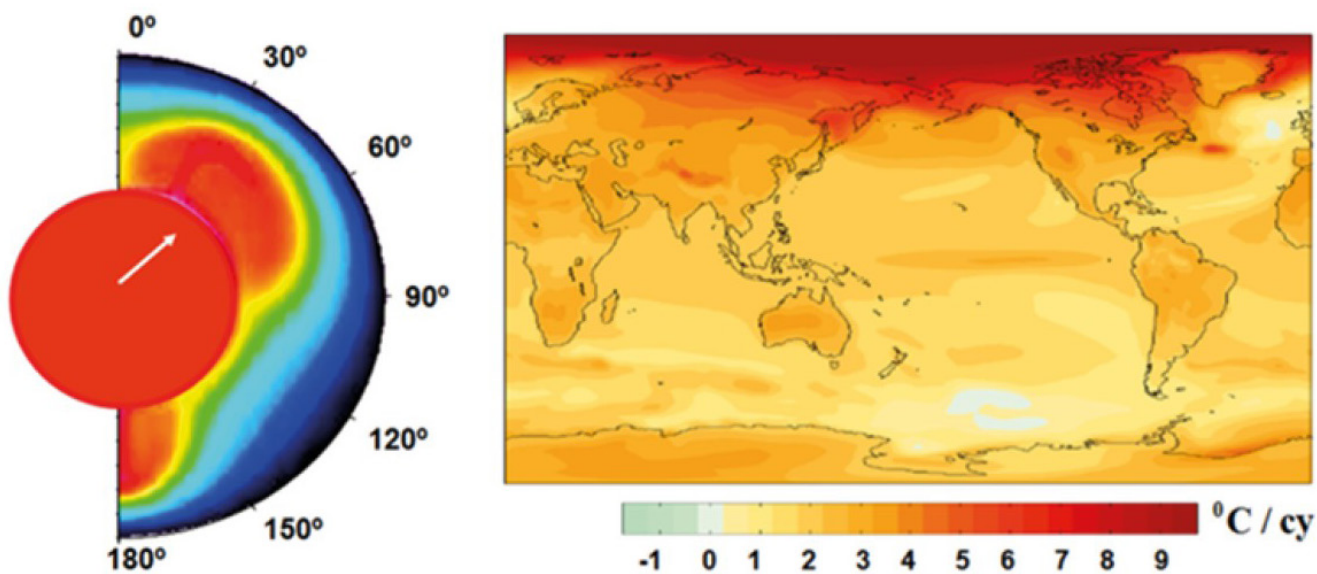


Рис. 16

Вимушене відносне розгойдування ядра й мантії та схема асиметричної подачі тепла у верхні шари мантії (ліворуч). Лінійні тренди потепління поверхні (в °C за століття), за даними NCAR CCSM3, усереднені за спеціальним сценарієм http://www.realclimate.org/bitz_fig3.png (праворуч).

Джерело: Баркін Ю. В. Циклічні інверсійні зміни клімату в Північній і Південній півкулях Землі // Геологія морів і океанів: Матеріали XVIII Міжнародної наукової конференції (Школи) з морської геології. Т.ІІІ. — М.: ГЕОС. 2009. С. 4–8.

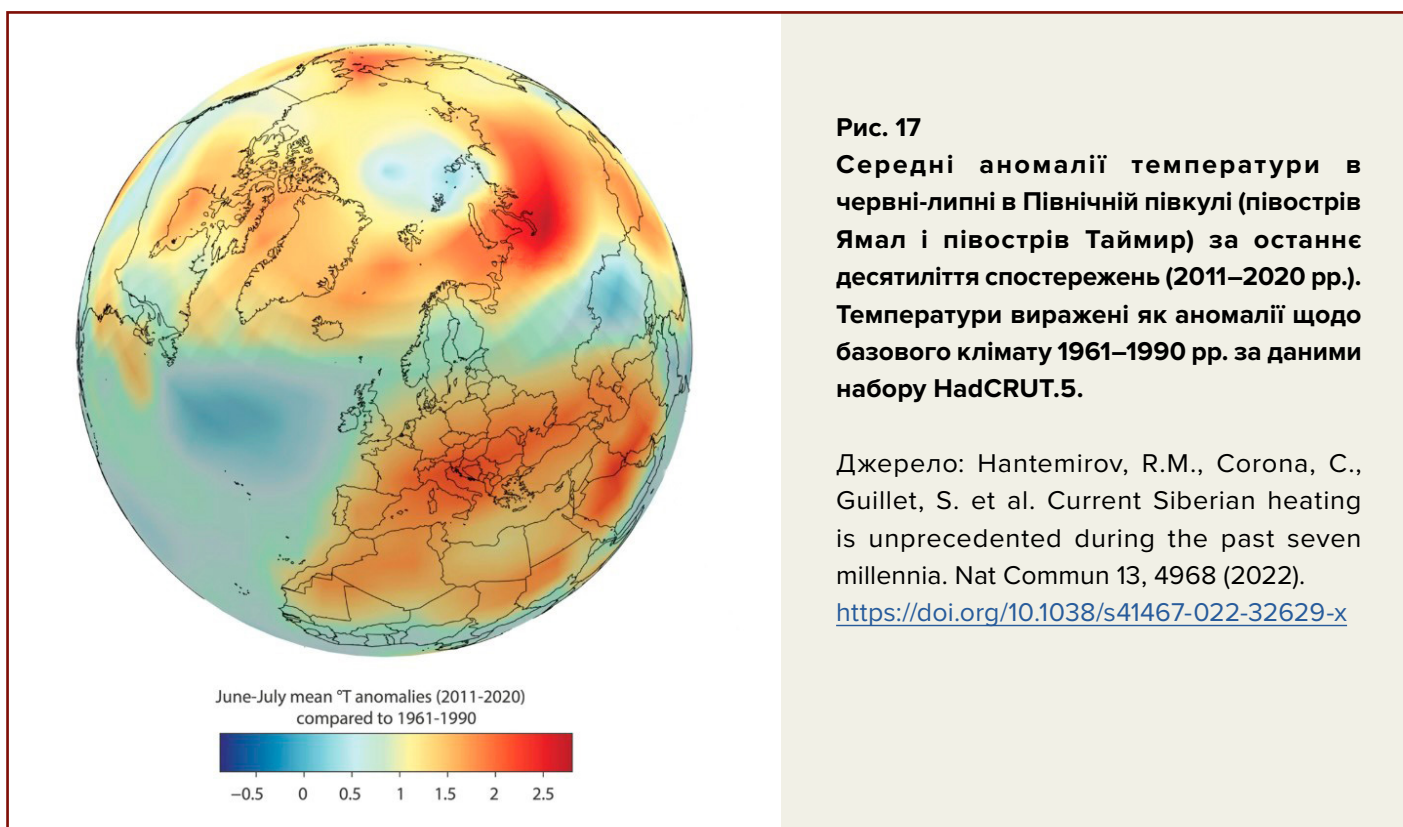
Сибір і Сибірська Арктика нагріваються у 3–4 рази швидше, ніж решта світу

За даними різних організацій, територія Росії, зокрема арктичний регіон, зазнає екстремального нагрівання.

За даними вчених Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) на 2021 рік, Росія нагрівається втричі швидше, ніж решта світу, а її арктичні та сибірські регіони нагріваються вчетверо швидше, ніж це відбувається в середньому в світі.

2022 року голова Росгідромету Ігор Шумаков заявив, із посиланням на дані

Всесвітньої метеорологічної організації²⁷, що територія Росії теплішає у 2,5 рази швидше за решту планети, до того ж найшвидшими темпами зростає температура північної полярної області країни, особливо в останні десятиліття. Сибір є одним із регіонів із найсильнішим потеплінням у світі (Рис. 17), що є безпрецедентним за останні 7000 років, згідно з реконструйованими кліматичними умовами на підставі досліджень деревних кілець²⁸.



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>

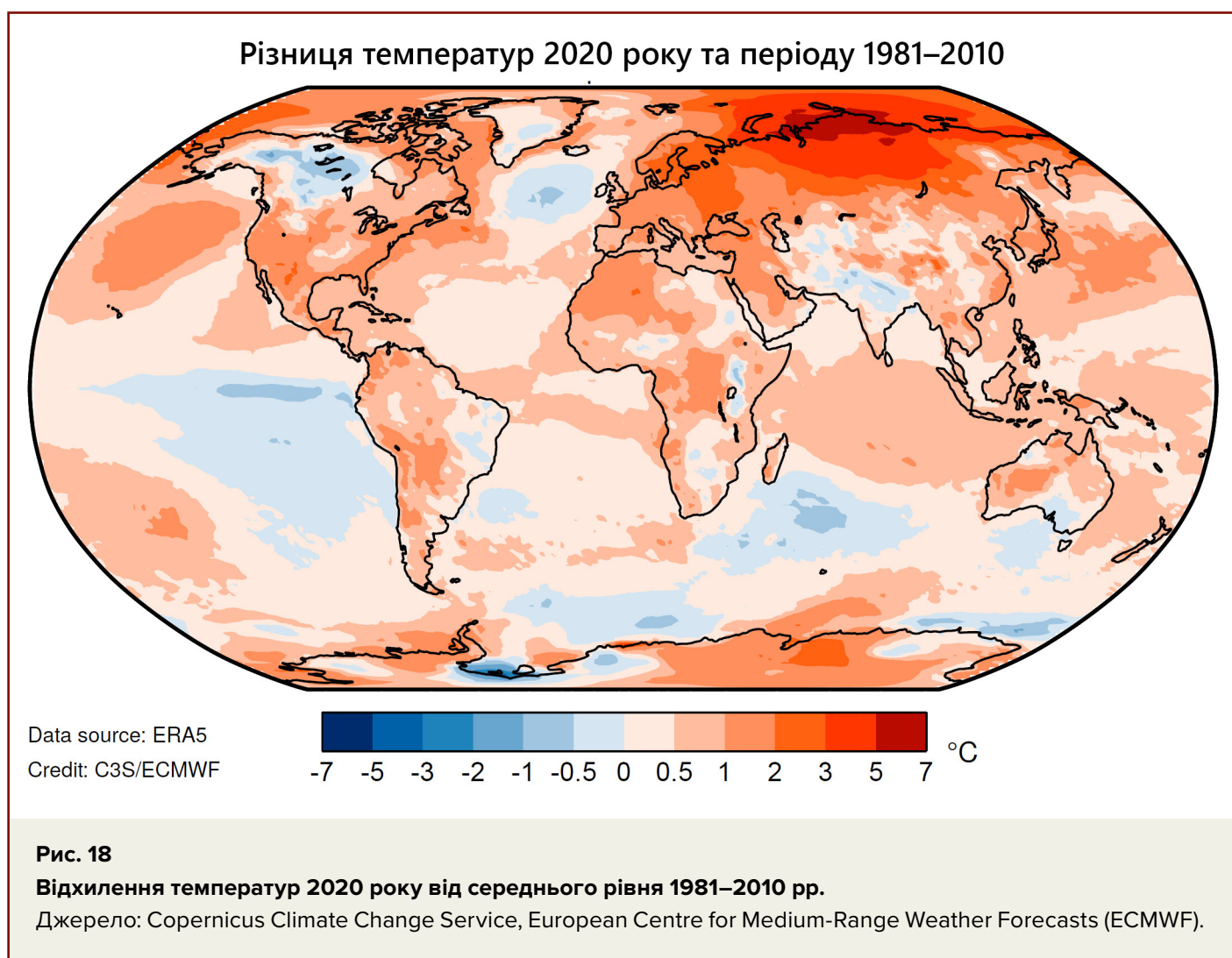
²⁸Hantemirov, R. M., Corona, C., Guillet, S., et al. (2022). Current Siberian heating is unprecedented during the past seven millennia. Nature Communications, 13, 4968. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x>

Американський Центр вивчення клімату Вудвелл (WCRC)²⁹ провів масштабне дослідження для оцінки того, як зміна клімату вплинула на температуру, вологість ґрунту, товщину снігового покриву, рівень опадів та інші найважливіші кліматичні параметри в різних регіонах Арктики. Для цього вчені об'єднали й систематизували дані, зібрані за допомогою супутників, літаків, дронів і наземних метеорологічних станцій за останні 40 років.

Подальший аналіз цих даних дозволив дослідникам виділити близько двох десятків кліматичних «гарячих точок». Найбільше

потепління торкнулося приполярних і центральних регіонів Східного Сибіру, де середньорічні температури зростали на 1,1 °C щодесятиліття, що в рази перевищує загальносвітові темпи потепління. Ще швидше температура зростала на Таймирі: на 1,7 °C за десятиліття. Аналогічним чином температура в сибірській тайзі збільшувалася з кінця 1980-х років зі швидкістю 0,6 °C на десятиліття.

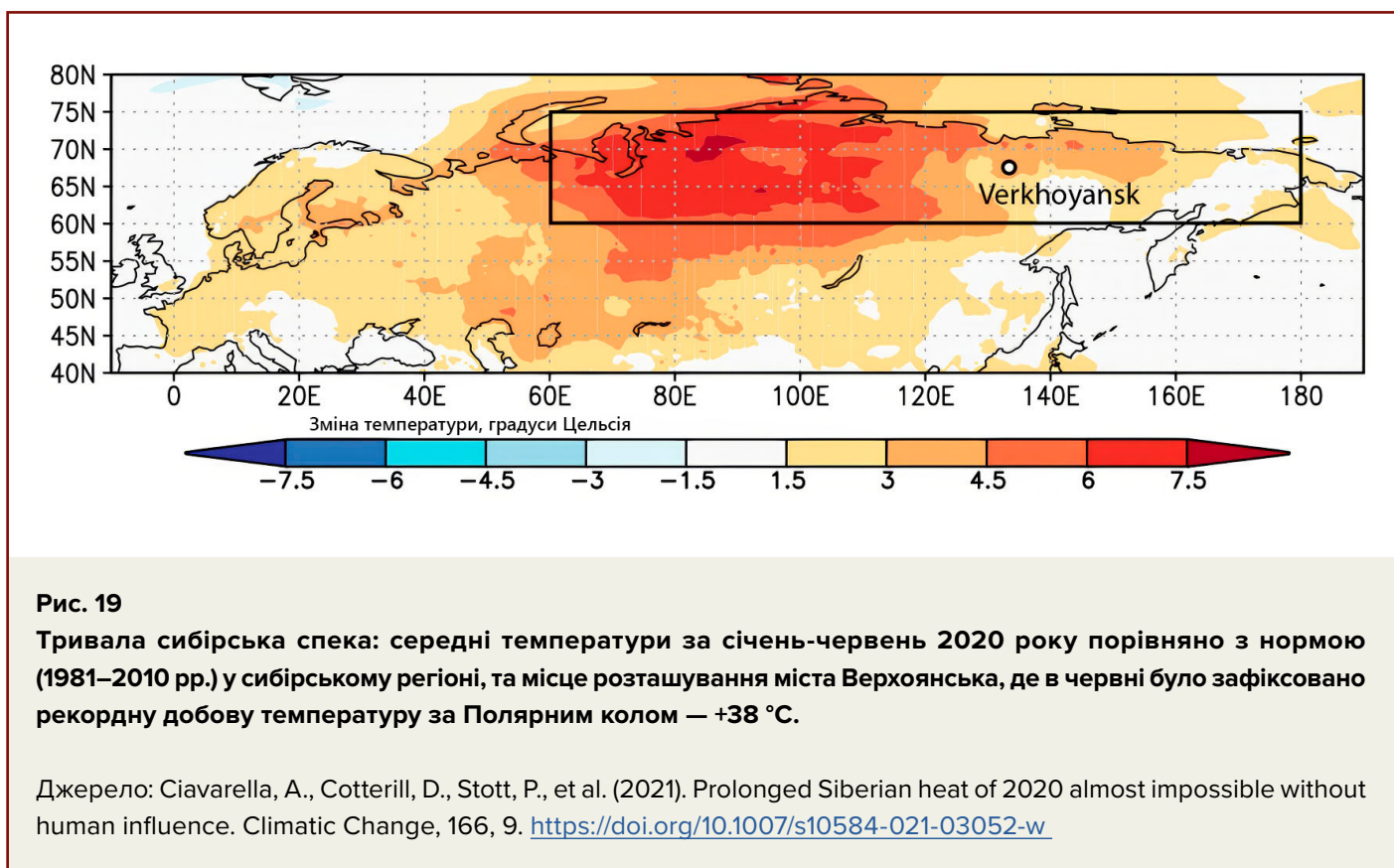
Хвилі тепла в Сибіру досягли тривожного нового рівня останніми роками, особливо 2020 року, коли температура різко зросла по всьому регіону (Рис. 18).



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>

Температури в Сибіру перевищували середні значення більш ніж на 5 °C із січня по червень, а в червні — до 10 °C (відносно рівня 1981–2010 років). Цей надзвичайно спекотний період призвів до перевищення місцевих рекордів тепла, зокрема на метеостанції Верхоянськ, яка 20 червня

зафіксувала абсолютний рекорд — +38 °C (Рис. 19). Російська метеорологічна служба заявила, що ця виміряна температура була найвищою з будь-коли зареєстрованих температур за Полярним колом.



Ці хвилі тепла не перебувають над Сибіром постійно, але мають пульсуючий характер. Це зумовлено тим, що проникнення магми, яка спричиняє ці хвилі тепла, відбувається хвилеподібно. В атмосфері, де повітряні маси вільно переміщуються та змішуються, хвилі тепла можуть спадати через кілька місяців, як це було 2020 року, на відміну від хвиль тепла у водному середовищі.

Згідно з дослідженнями 2022 року, Сибірська Арктика нагрівається майже вчетверо швидше, ніж решта земної кулі, що перевищує раніше враховані співвідношення в кліматичних моделях і стало вкрай несподіваним для вчених³⁰ (Рис. 20).

³⁰Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3, 168 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

Важливо зазначити, що це потепління Арктичного регіону відбувається саме в області півострова Таймир. Таку аномалію саме в екваторіальній зоні Сибіру можна пояснити тим, що океанічна кора тонша і швидше проводить тепло, а вода має вищу теплоємність, ніж атмосфера. Тому саме

океанічна вода інтенсивно накопичує й затримує тепло від магматичного плюму, що піднімається, незважаючи на те, що підйом плюму відбувається під континентальною корою на відносно великому віддаленні від узбережжя.

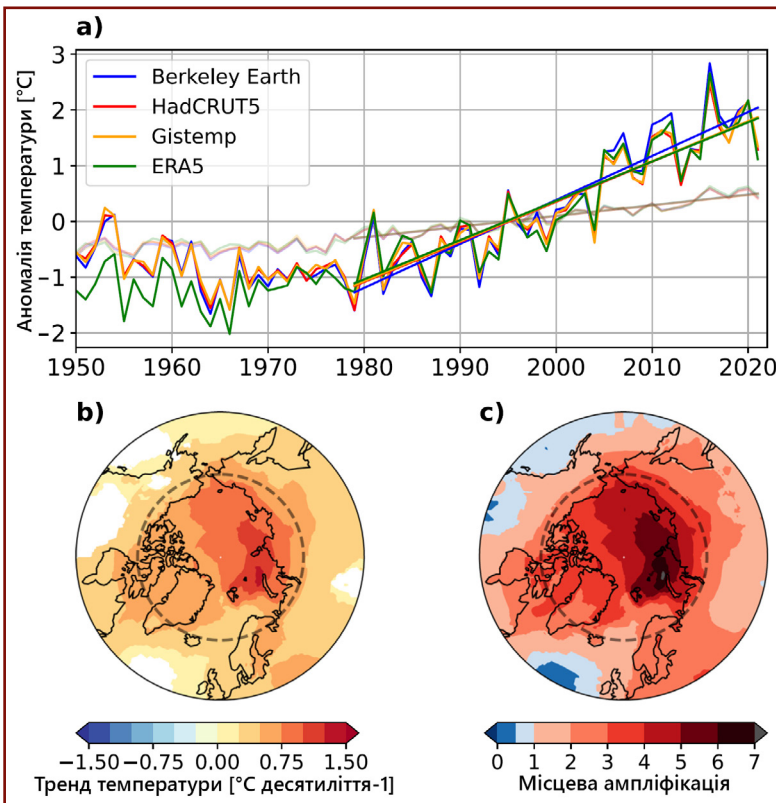


Рис. 20

Еволюція середньорічної температури в Арктиці.

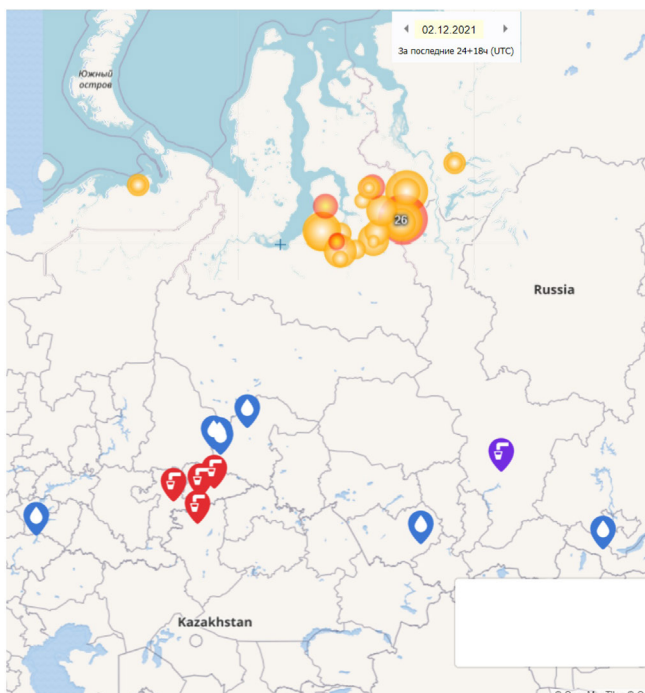
а) Аномалії середньорічної температури в Арктиці (66,5°–90° пн. ш.) (темні кольори) та на глобальному рівні (світлі кольори) за період 1950–2021 рр., одержані з різних даних спостережень. Аномалії температури розраховані відносно стандартного 30-річного періоду 1981–2010 рр. Пунктирною лінією на рисунках (b) та (c) позначено Північне полярне коло (66,5° пн. ш.).

Джерело: 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>

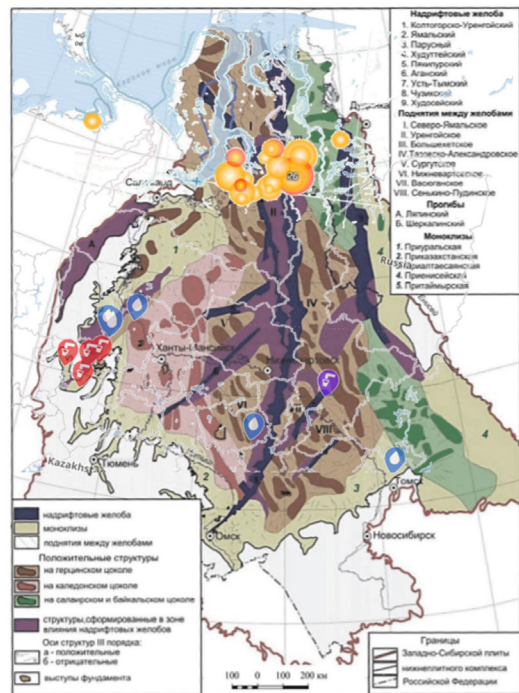
Непрямі ознаки підйому Сибірського плюму

Внаслідок проникнення магматичного вогнища до земної кори під Сибіром відбувається не лише нагрівання атмосфери, але й ціла низка інших аномалій: танення вічної мерзлоти знизу догори, зростання сейсмічної активності в регіоні, підйом гарячих вод до поверхні, де в колодязях закипає вода, безпрецедентні лісові пожежі по всьому Сибіру, зокрема й під снігом. Максимальна локалізація

пожеж під снігом стала проявлятися впродовж останніх років на півдні півостровів Таймир, Ямал і Гидан у полярних регіонах. Важливим фактором є те, що прояви «зомбі-пожеж» — пожеж під снігом, закипання води в колодязях відбуваються над зонами глибинних розломів (Рис. 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]"

Рис. 21

Карта локалізації зимових пожеж під снігом за Полярним колом у 2021 році.



Фотографії пожеж під снігом у Свердловському регіоні.

У північних широтах спостерігається збільшення викидів метану та водню із надр, зростає кількість вирв від природних вибухів газу, а на Арктичному шельфі посилюється грязьовий вулканізм. Підігрів знизу викликає деградацію вічної мерзлоти та руйнування газогідратів, що призводить до

вивільнення газів, вибухів вирв і збільшення грязьового вулканізму. Газ, що вивільняється з надр, впливає на стан атмосфери, спричиняючи додаткові теплові, геохімічні та електромагнітні аномалії. Розглянемо ці процеси докладніше.

Танення вічної мерзлоти

Ще одним із маркерів додаткового геотермального тепла, що надходить від мантійного плюму, є стан вічної мерзлоти. Авторами доповіді було проведено аналіз даних глибини сезонного танення вічної мерзлоти на території Росії з 1994 по 2023 рік. Базу даних було складено на основі вимірювань, що проводяться в рамках міжнародної програми циркумполярного моніторингу активного шару та приповерхневої вічної мерзлоти (CALM), і ця база даних доступна на сайті permafrost.su.

Наразі на території Росії діють 58 майданчиків, що здійснюють спостереження за породами багаторічної мерзлоти за стандартизованою методикою, і на 46 із

цих майданчиків вимірювання проводяться протягом більш ніж 10 років, що дозволяє виявляти довгострокові тенденції. Аналіз масиву даних дозволив виділити майданчики, на яких спостерігається стійкий тренд збільшення глибини танення, що свідчить про додаткове нагрівання цієї зони.

Було виділено дві групи даних: майданчики з більш вираженим трендом збільшення глибини танення на глибинах від 40 до 200 см (Рис. 22, а) та майданчики з менш інтенсивною швидкістю танення багаторічної мерзлоти на глибинах від 40 до 140 см (Рис. 22, б).

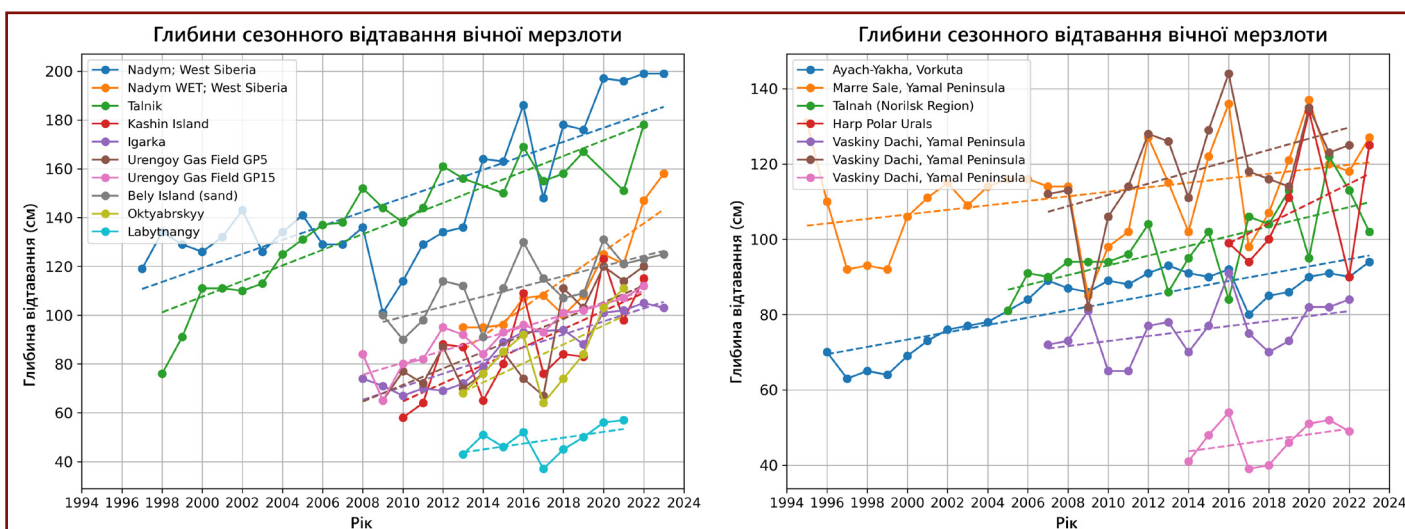


Рис. 22

Динаміка глибини сезонного танення вічної мерзлоти в різних регіонах з різною інтенсивністю:

- а) з більш вираженим зростанням глибини танення;
- б) з менш вираженим зростанням глибини танення.

Джерело даних: <https://permafrost.su>

Вимірювання проводяться в межах міжнародної програми циркумполярного моніторингу (CALM):

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

Для наочності всі досліджувані точки було нанесено на карту та позначено помаранчевим і жовтим кольорами відповідно (Рис. 23). Важливо зазначити, що ці точки переважно зосереджені в певному регіоні: на півночі Західного Сибіру, на півострові Ямал та південніше півостровів Гидан і Таймир.

Таке розташування ділянок максимального танення вічної мерзлоти відповідає області знижених швидкостей сейсмічних хвиль у мантиї, у припустимій зоні розтікання голови магматичного плюму. Це, в свою чергу, є причиною підвищення температури ґрунту, зокрема й у межах мерзлого шару.



Рис. 23

Місця збільшення глибини сезонного танення багаторічної мерзлоти. Точками позначено майданчики вимірювань: сірий — місця, де не спостерігається помітного збільшення глибини танення, жовтий — місця, де зростає глибина танення.

Джерело даних: <https://permafrost.su>

Вимірювання проводяться в межах міжнародної програми циркумполярного моніторингу (CALM): <https://www2.gwu.edu/~calm>

Прояви грязьового вулканізму

Додаткове нагрівання від магми, що піднімається, призводить до деградації вічномерзлих порід і впливає на законсервовані у цих ґрунтах газогідрати, вивільняючи великі об'єми газів, що в них утримуються. Крім того, відбувається міграція газу із покладів газових родовищ і сильно газонасичених пластових вод, що знижує пружні та міцнісні властивості ґрунтів, сприяє розрідженню глин і призводить до можливих процесів грязьового вулканізму. Грязьовий вулканізм — це геологічний процес виверження суміші газу, води та уламкового матеріалу через тріщини земної кори під

впливом внутрішнього геостатичного тиску.

Саме такі процеси виявили вчені Російської академії наук (РАН) на арктичному півострові Ямал³¹. Внаслідок комплексу геолого-геофізичних досліджень із використанням даних дистанційного зондування Землі за період з 2014 по 2022 рік було виявлено понад 3000 зон потужних викидів газу з формуванням кратерів на дні термокарстових озер, річок і прибережної частини Карського моря (Рис. 24).

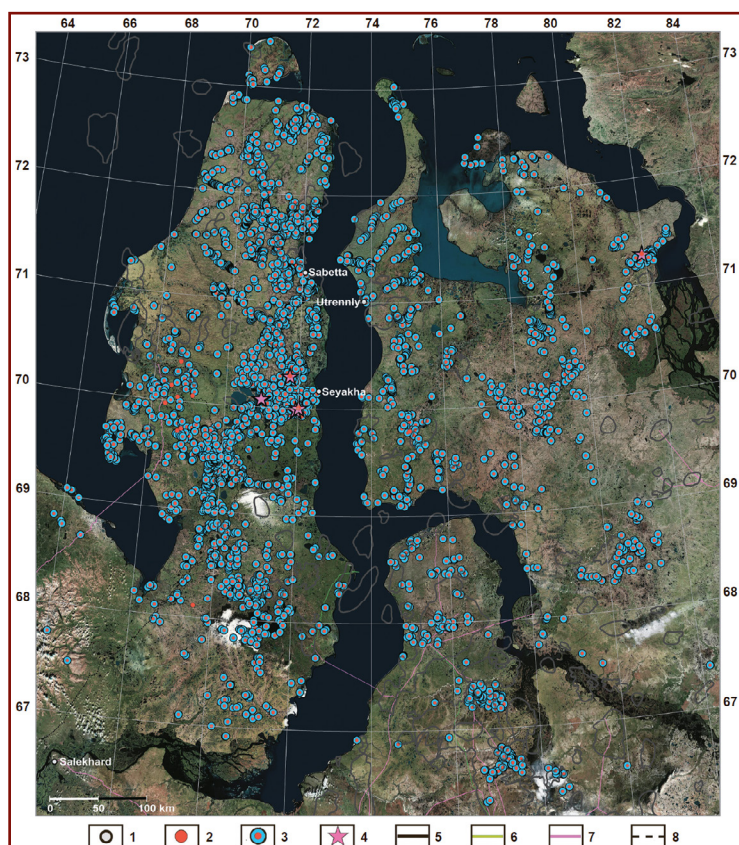


Рис. 24
Поширення зон потужних викидів газу на півночі Західного Сибіру.

Позначення: 1 — населені пункти, 2 — відокремлені кратери викидів газу, 3 — кратери викидів газу на дні водойм, 4 — грязьовулканічні прояви, 5 — контури нафтогазових родовищ, 6 — нафтопроводи, 7 — газопроводи, 8 — залізниця. Основа карти — мозаїка супутникових знімків бази ESRI.

Джерело: Богоявленський В. І., Ніконов Р. А., Богоявленський І. В. Нові дані про інтенсивну дегазацію землі в Арктиці на півночі Західного Сибіру: термокарстові озера з кратерами викидів газу та грязьовими вулканами. Арктика: екологія та економіка 13, 353–368 (2023).

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

³¹Bogoyavlensky, 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>

У 2022–2023 рр., за даними дистанційного зондування Землі, на дні термокарстових озер Лабварто та Ямбуто вперше було виявлено великі грязьовулканічні споруди, що періодично проявляють активний грязьовий вулканізм³² (Рис. 25). Термокарстове озеро — це водойма, що утворюється внаслідок відтаювання багаторічної мерзлоти.

Таким чином, не лише відтаювання озера, але й розрідження глин глибоко під озером вказують на глибинне джерело нагрівання.

За словами авторів дослідження, раніше в усьому циркумарктичному регіоні такі явні грязьовулканічні споруди на дні термокарстових озер були невідомі.

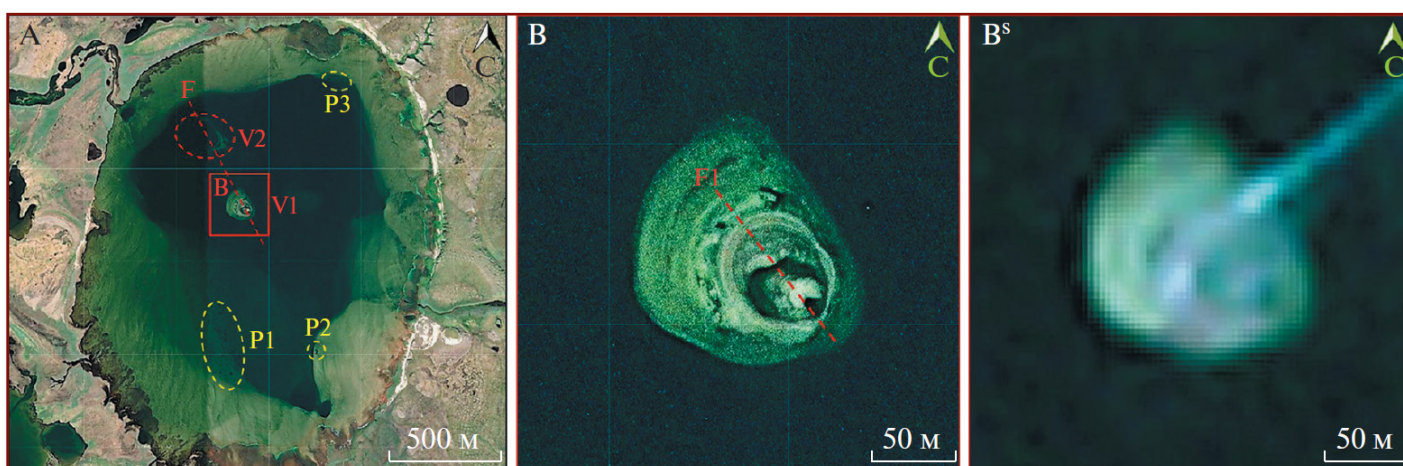


Рис. 25

Супутниковий знімок WorldView-2 термокарстового озера Лабварто (А) та його збільшений фрагмент (В) із доповненням фрагмента супутникового знімка Sentinel-2 (B^s). Позначення: P1, P2 та P3 — покмарки; V1 та V2 — грязьові вулкани; F та F1 — прогнозовані розломи.

Джерело: Богоявленський В. І. Нові дані про грязьовий вулканізм в Арктиці, на півострові Ямал. Доповіді Російської академії наук. Науки про Землю 512, 92–99 (2023)

<https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

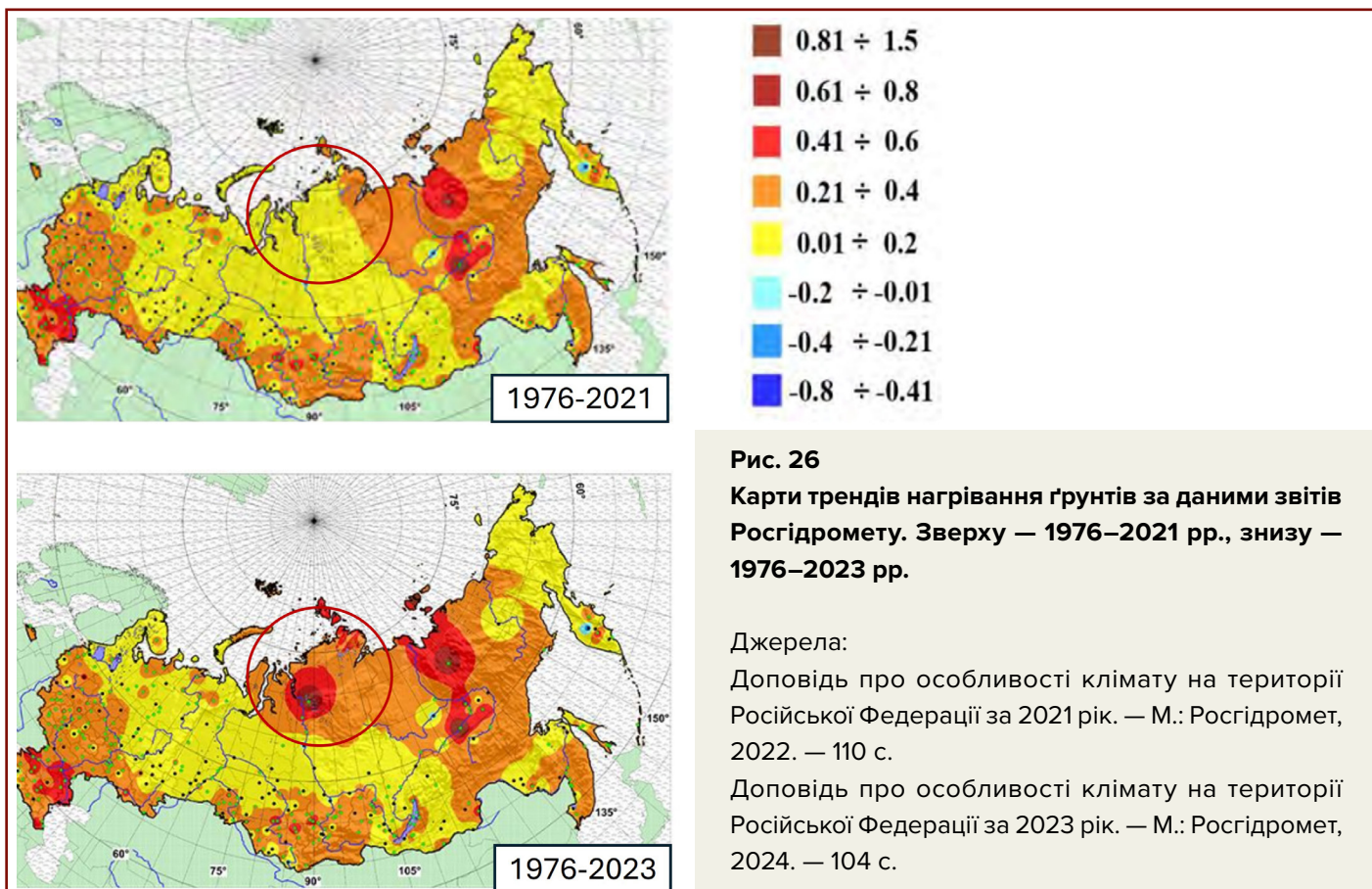
³²Bogoyavlensky, V. I. NEW DATA ON MUD VOLCANISM IN THE ARCTIC ON THE YAMAL PENINSULA. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle 512, 92–99 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

Нагрівання ґрунтів

На підставі даних Росгідромету за 2021–2023 рр., було проаналізовано карти температур ґрунтів на глибинах 80, 160 і 320 см. Найбільш інформативним виявилось порівняння температурних трендів за періоди 1976–2021 та 1976–2023 рр. (Рис. 26). Між 2021 та 2023 роками на карті трендів виявилася чітка аномалія на південь від півостровів Гидан і Таймир, яка територіально збігається із зоною знижених швидкостей сейсмічних хвиль у мантиї,

виявлених методами сейсмотомографії під літосферою Сибірського регіону.

Беручи до уваги значну глибину вимірювань (320 см) і широкий масштаб спостережень (466 метеостанцій Росії), можна припустити, що виявлена температурна аномалія пов'язана зі збільшенням геотермального тепла у зв'язку з підйомом магматичного пльому.



Температура приземного повітря

Дані температурних спостережень за зимовий період 2023–2024 рр. також відображають аномальний характер приземних температур повітря (Рис. 27). Карта середніх температурних аномалій за період із грудня 2023 по лютий 2024 року показує у межах півостровів Гидан і Таймир підвищення температури на 2,0–4,5 °С порівняно з нормою.

З огляду на північне розташування цієї території, таке значне підвищення температури в зимовий період може бути пов'язане з тепловим впливом мантийного плюму.

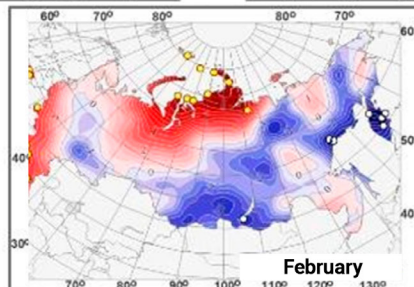
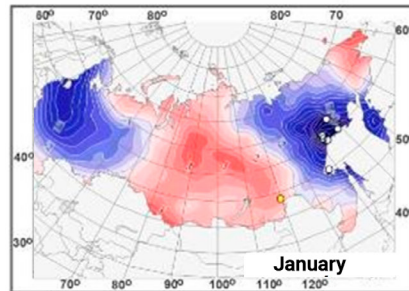
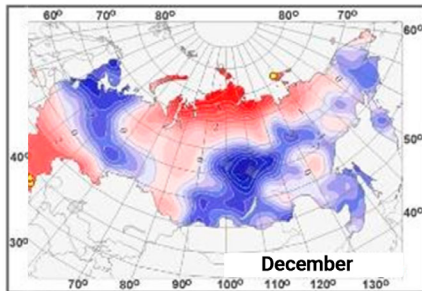
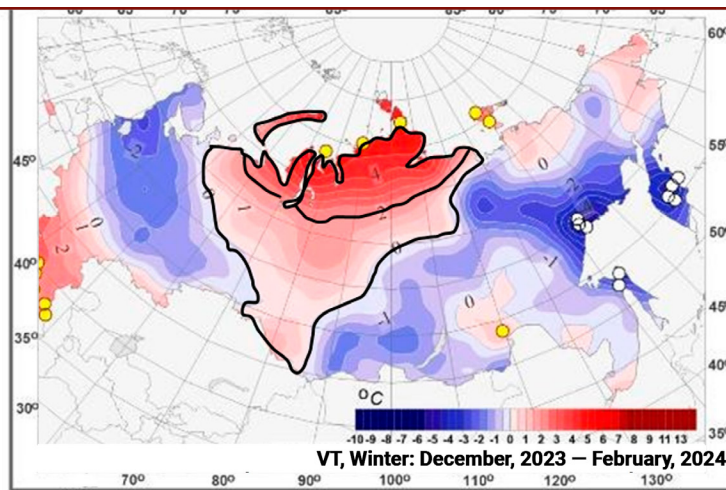


Рис. 27

Поля середньосезонної та середніх місячних аномалій температури приземного повітря (°С) на території Росії взимку 2023/24 рр.

Джерело:

Доповідь про особливості клімату на території Російської Федерації за 2023 рік. — М.: Росгідромет, 2024.

Зауважимо, що аналіз карт³³ середньомісячних температур за січень і липень 2001–2022 рр. показує стійку температурну аномалію в досліджуваній зоні (Рис. 28, 29). Таким чином, можна констатувати, що ця аномалія спостерігається не лише протягом останніх

двох років, але й стабільно проявляється протягом усього 23-річного періоду спостережень, що підтверджує висновки про вплив підйому магматичного плюму на приповерхневі температури.

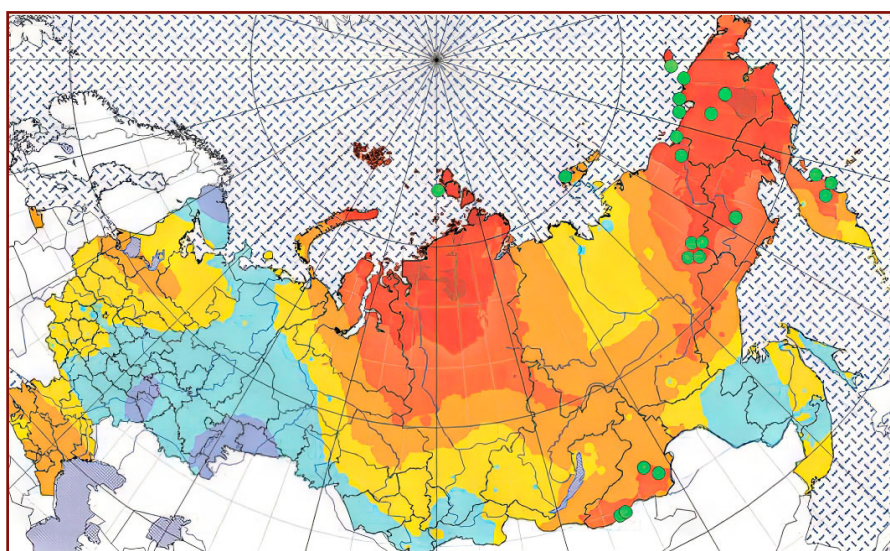


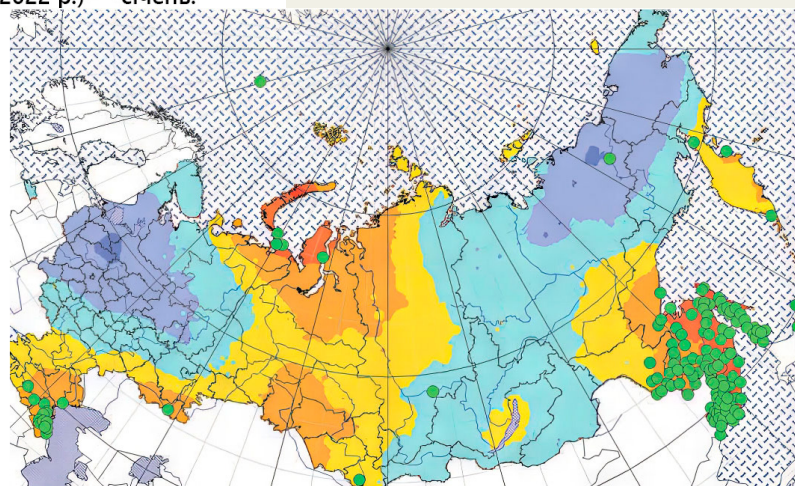
Рис. 28
Коефіцієнти лінійного тренду (°C/10 років) середньомісячної температури повітря за 2001–2022 рр. (у межах Росії до лютого 2022 р.) — січень.

Джерело: Шерстюков Б. Г. Глобальне потепління та його можливі чинники. Журнал «Гідрометеорологія та екологія». 2023; (70): 7–37 (російською мовою). <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

■ ≥ 2.0 ■ 1.0...1.4 ■ 0.0...0.4 ■ -0.5...-0.9 ■ -1.5...-1.9
■ 1.5...1.9 ■ 0.5...0.9 ■ -0.0...-0.4 ■ -1.0...-1.4
 Коефіцієнти лінійного тренду (°C/10 років) середньомісячної температури повітря за 2001–2022 рр. (в межах Росії до лютого 2022 р.) — січень.

Рис. 29
Коефіцієнти лінійного тренду (°C/10 років) середньомісячної температури повітря в Москві за 2001–2022 рр. (у межах Росії до лютого 2022 р.) — липень.

Джерело: Шерстюков Б. Г. Глобальне потепління та його можливі чинники. Журнал «Гідрометеорологія та екологія». 2023; (70): 7–37 (російською мовою). <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>



■ ≥ 2.0 ■ 1.0...1.4 ■ 0.0...0.4 ■ -0.5...-0.9 ■ -1.5...-1.9
■ 1.5...1.9 ■ 0.5...0.9 ■ -0.0...-0.4 ■ -1.0...-1.4
 Коефіцієнти лінійного тренду (°C/10 років) середньомісячної температури повітря в Москві за 2001–2022 рр. (в межах Росії до лютого 2022 р.) — липень.

³³Sherstyukov, 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>

Збільшення кількості блискавок

Занепокоєння наукової спільноти викликає зростання кількості гроз та ударів блискавок в Арктиці. Кількість ударів блискавок в Арктиці вище 65° пн. ш. збільшилася втричі з 2010 по 2020 рік³⁴ (Рис. 30). Особливістю є те, що більшість

цих ударів блискавок зосереджена у межах північної частини Сибіру, а у межах півночі Канади та Гренландії практично відсутня (Рис. 31, Рис. 32).

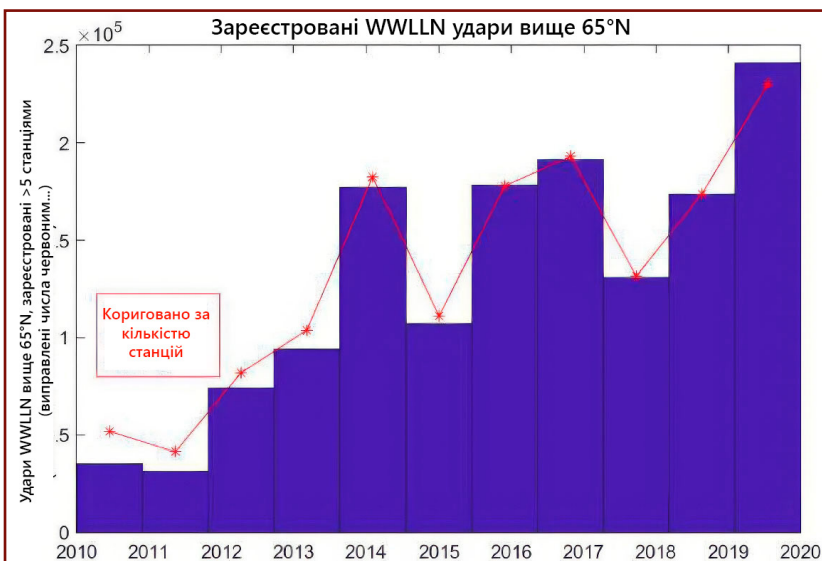


Рис. 30

Коректно зафіксовані розряди блискавок WWLLN вище за 65° пн. ш. (позначені синім), а червоний графік показує коригування, що ґрунтується на загальній кількості станцій WWLLN. WWLLN — Всесвітня мережа виявлення блискавок (World Wide Lightning Location Network).

Джерело: Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091366.

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

Удари, зареєстровані WWLLN вище 75 градусів за період 2010-2020

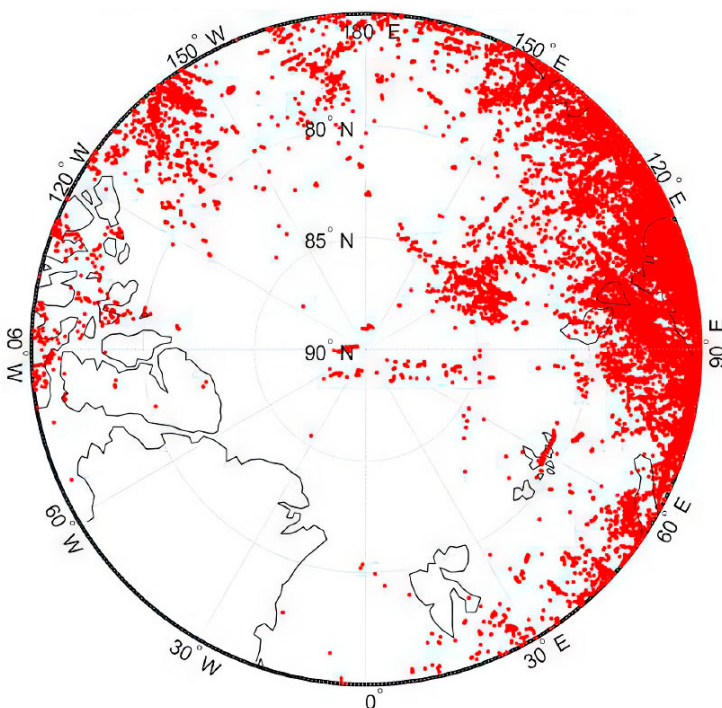


Рис. 31

Глобальний розподіл ударів блискавок WWLLN у червні, липні та серпні 2010–2020 рр. вище 75° пн. ш. WWLLN — Всесвітня мережа виявлення блискавок.

Джерело: Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). Lightning in the Arctic. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091366.

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

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

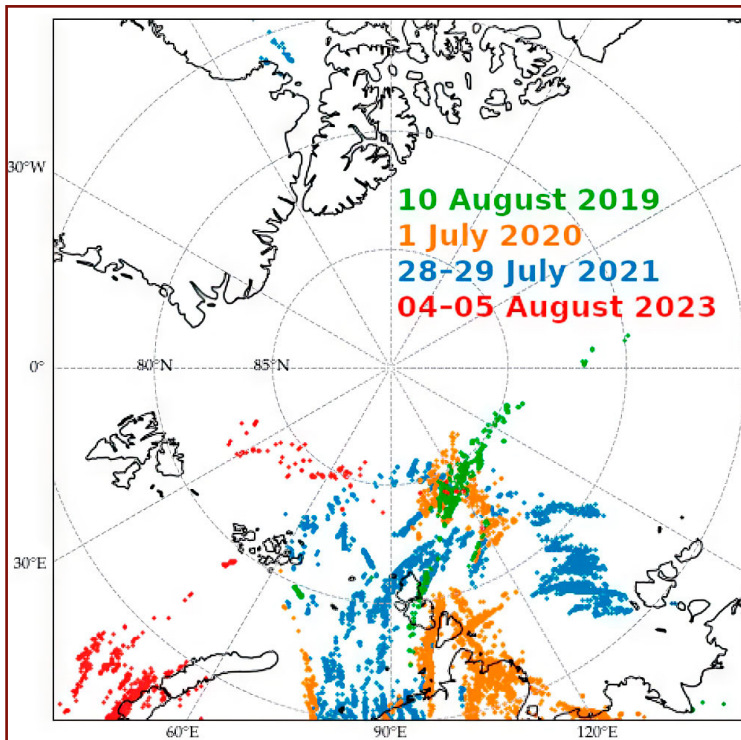


Рис. 32

Місця блискавок, виявлені WWLLN під час гроз у 2019–2023 рр. Зелений — 2019 р., помаранчевий — 2020 р., синій — 2021 р., червоний — 2023 р.

Джерело: Popykina, Alena, Nikolay Ilin, Maria Shatalina, Colin Price, Fedor Sarafanov, Andrey Terentev, and Andrey Kurkin. 2024. "Thunderstorms near the North Pole" *Atmosphere* 15, no. 3: 310.

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

Блискавки просуваються до Північного полюсу: у серпні 2019 року широко повідомлялося, що кілька ударів блискавок було виявлено всього за кілька сотень кілометрів від Північного полюсу.³⁵ Більшість блискавок у полярних зонах (на північ від 80° пн. ш.) викликана всього кількома інтенсивними грозовими днями кожного літа. Однак ці грози стали новою особливістю даної території, адже в попередні роки гроз було дуже мало. Причина цього стійкого місцезнаходження протягом останніх кількох років полягає в екстремальній літній спеці, що спостерігається на півночі Сибіру, де температури у літні місяці сягають 35 °С. Однак також припускається, що збільшення загальної іонізації атмосфери в цьому регіоні внаслідок магматичного проникнення плюму теж є важливим фактором збільшення кількості блискавок. Це відбувається внаслідок переходу теплової енергії в електричну за ефектом Юткіна у процесі внутрішньомантійних вибухів,

що виникають при контакті потоків магми різної температури. В результаті з надр вивільняється величезна кількість енергії, що призводить до збільшення статичної напруги на поверхні ґрунтового шару, зміни поверхневого потенціалу, підвищеної іонізації повітря та, як наслідок, зростання кількості блискавок.

Також відбувається виділення значних обсягів газу через тріщини в корі. Це може впливати на формування хмар, а також на локальні погодні умови. Проникнення магми є ключовим фактором прогрівання поверхні, збільшення вологості та виникнення теплових аномалій, що спричиняє грозові хмари та блискавки.

Оскільки для виникнення гроз і блискавок потрібне поєднання холодного повітря, теплого повітря та конвективної нестабільності, територія розташування Сибірського мантійного плюму є ідеальним місцем для їх формування.

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/>

Виснаження озонowego шару

Магматична активність у надрах супроводжується вивільненням значної кількості вулканічних газів, серед яких водень, метан і вуглекислий газ. Вивільнення водню, згідно з роботами В. Л. Сивороткіна³⁶, спричиняє деградацію озонowego шару. Оскільки підйом магми має пульсаційний характер, дегазація та подальше руйнування озонowego шару також матимуть спорадичний, тобто епізодичний прояв.

Аномалії озонowego шару спостерігаються над північчю Сибіру, починаючи з 1997–1998 рр., тобто після зміщення ядра Землі в напрямку півострова Таймир. Епізоди виснаження озонowego шару спостерігалися

в 2011, 2016, 2020 рр³⁷. Максимальний дефіцит вмісту озону було зафіксовано 2016 року³⁸. Наприкінці січня 2016 року, вперше від початку спостережень у 1973 році, над північчю Уралу та Сибіру було зафіксовано озонovu аномалію із загальним вмістом озону 190–200 ОД, що на 40–45 % менше від середніх багаторічних значень, із тривалістю цього явища до одного тижня (Рис. 33). Значне скорочення загального вмісту озону також було зафіксовано за допомогою інструменту OMI, встановленого на супутнику AURA (США) (Рис. 34).

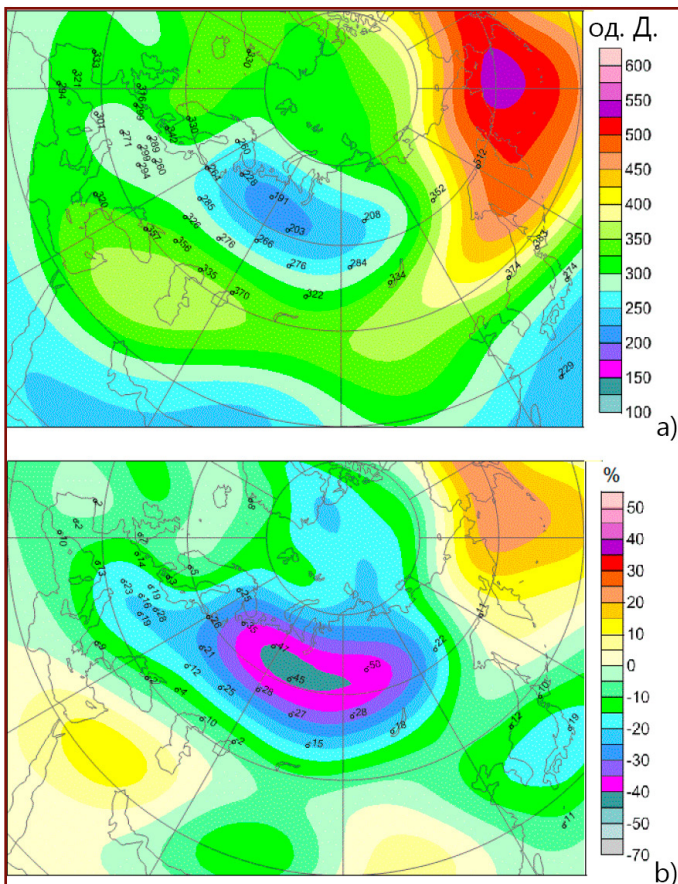


Рис. 33

Загальний вміст озону (а) та його відхилення від норми (б) 28 січня 2016 р. за супутниковими даними WOUDC [<http://woudc.org/>], числа на карті — вимірювання загального вмісту озону на станціях озонметричної мережі.

Джерело: 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.

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

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

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

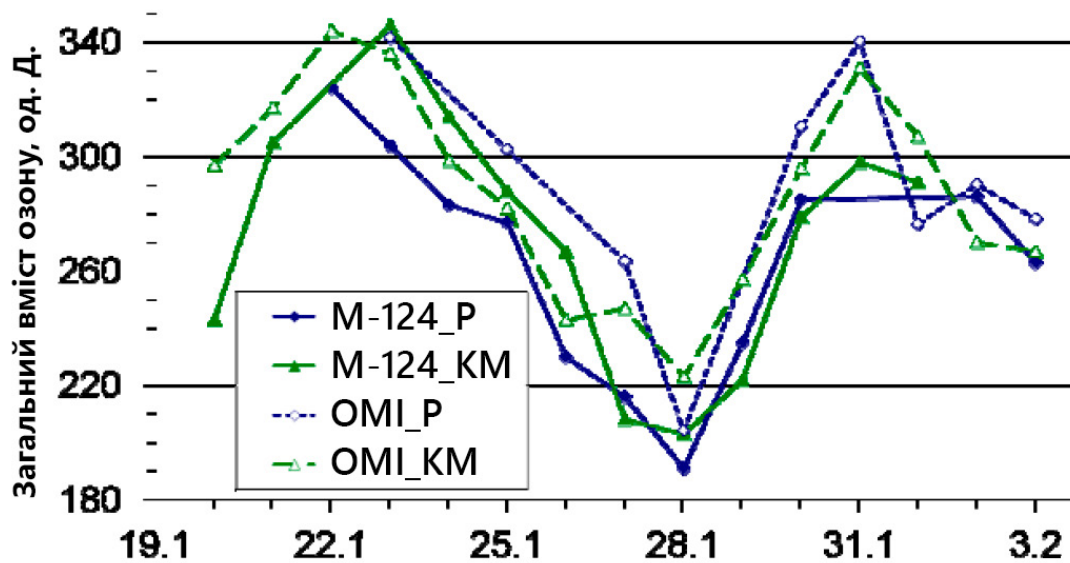


Рис. 34

Загальний вміст озону, за даними вимірювань за допомогою наземного озонметра M-124 та інструмента OMI на супутнику AURA (США) на станціях Печора (П) та Ханти-Мансійськ (ХМ) у період 20 січня — 3 лютого 2016 р.

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

Важливо зазначити, що середній багаторічний сезонний хід загального вмісту озону у позатропічних широтах Північної півкулі має мінімум у вересні, а максимум — у березні-квітні. Однак, 2016 року деградація озону утворилася нетипово рано, у січні, й загальний вміст озону був мінімальним за всю історію інструментальних спостережень.

Таким чином, деградація озонового шару над Сибірським регіоном може бути додатковим індикатором виділення газів вздовж розломів внаслідок підняття магматичного плюму до поверхні.

Будова, можливі розміри та локалізація магматичного плюму на підставі літературних і спостережуваних даних

Будову плюму можна умовно порівняти з грибом. У нього є так званий хвіст, який піднімає розпечений матеріал від межі ядро-мантія. Верхня частина плюму, яка проникає в процесі підйому, — це голова плюму. Коли плюм

сягає межі (підшови) літосфери, упираючись у тугоплавкий шар застиглих порід, голова плюму починає розтікати під літосферою, як шапка гриба (Рис. 35).

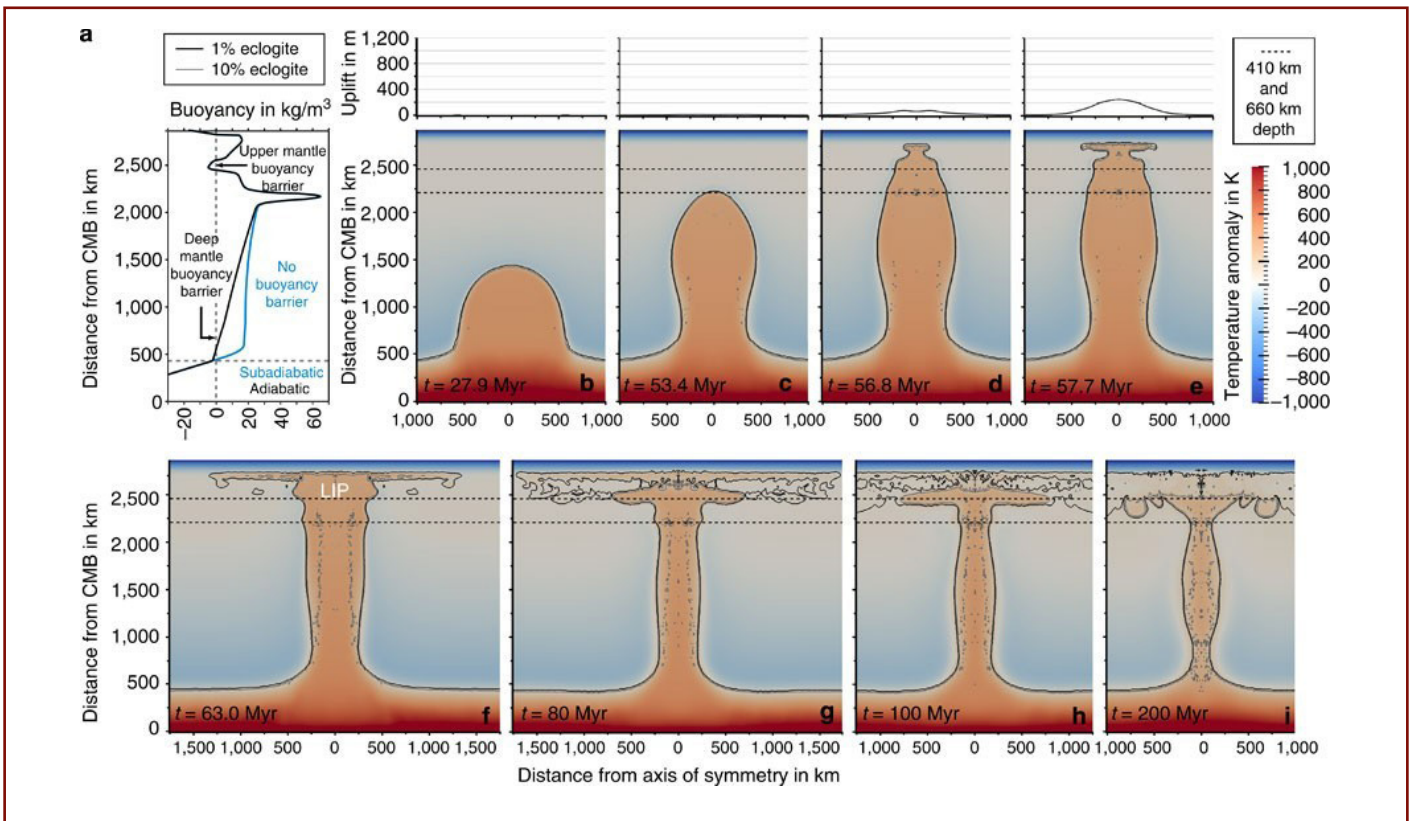


Рис. 35
На рисунку зображено модель еволюції магматичного плюму, наприклад такого ж, який сформував Сибірські трапи 250 млн років тому.

Графік зліва (a) показує, як магна піднімається через різні шари мантії Землі. Основна частина зображення (b-i) — це своєрідна «часова стрічка», що показує етапи розвитку плюму. Спочатку формується «стовп» гарячої магми, що піднімається від основи мантії. Поступово цей стовп досягає верхніх шарів мантії.

У верхній частині він розширюється, формуючи «грибоподібну» шапку. З часом плюм стає тоншим і починає розпадатися на окремі частини. Кольори на схемі показують температуру: червоні та помаранчеві ділянки — найгарячіші, сині — більш холодні.

Джерело: 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>

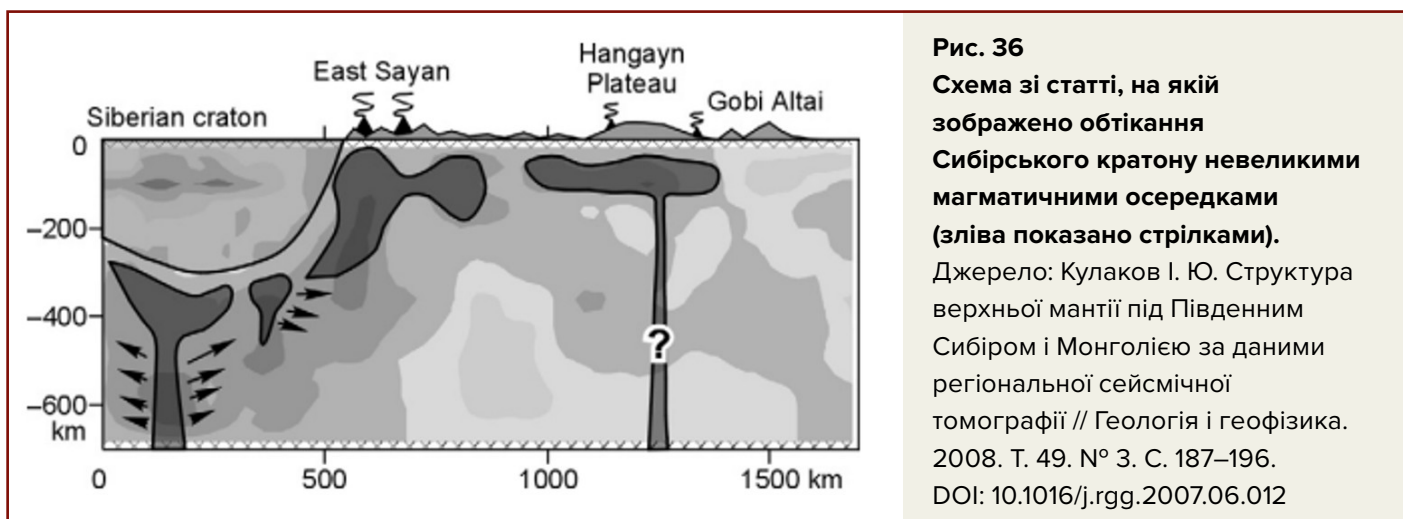
Згідно з літературою, з наближенням плюму до літосфери його радіус подвоюється при розтіканні, а швидкість різко знижується³⁹. Гарячий матеріал, що надходить із ніжки, тисне й пропалює літосферу, утворює тріщини, і тоді там, де ослаблені місця, формуватимуться вторинні плюми — верхні магматичні камери вже всередині земної кори.

Такі ж камери є, наприклад, у Єллоустоуна, Кампі-Флегрей та інших супервулканів. Це те саме місце, де може статися прорив кори та масивне виверження магми на поверхню.

Важливо зазначити, що, згідно з існуючими уявленнями, підйом плюму до поверхні може займати за часом десятки мільйонів років. Однак ці дані базуються на теоретичних розрахунках, тоді як практичні спостереження за сучасною ескалацією геодинамічних процесів свідчать про протилежне. Спостереження за процесами в Сибіру свідчать, що підйом плюму може відбутися протягом кількох десятиліть.

З літературних даних⁴⁰, відомо, що аналогічний магматичний суперплюм, що спричинив численні виверження базальтів у Євразії (в Сибіру) на кордоні пермського та тріасового періодів (250 мільйонів років тому), мав такі розміри: 4000 км із заходу на схід і 3000 км із півночі на південь. А голова плюму, за припущеннями, мала діаметр від 1000 до 2000 км.

Відомо, що Західно-Сибірська плита молодша й тонша, товщиною 35–40 км. Східно-Сибірська платформа навпаки старіша, товстіша й холодніша, 40–45 км завтовшки. Її називають Сибірський кратон. За даними сейсмотомографії, вчені припускають⁴¹, що під південним краєм Східно-Сибірської платформи наразі спостерігаються невеликі магматичні осередки, які розтікаються під Сибірським кратоном (Рис. 36), через те, що плита є холоднішою.



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

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

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

Згідно з гіпотезою, на даний момент сучасний Сибірський плюм розтікається по підшві Східно-Сибірської та частково під Західно-Сибірською плитою. Розтікання може відбуватися, згідно з літературними даними, на глибинах 50–60 км, а його нога, як припускається, спостерігається найчіткіше на глибинах 100 км. Впровадження вторинних плюмів, імовірно, вже відбувається на глибинах 40 км.

Деякі сейсмотомографічні моделі показують аномалії знижених швидкостей⁴² (більш рідке середовище) на глибинах 110–150 км,

що відповідає більш рідкому середовищу в надрах південніше півостровів Гидан і Таймир (Рис. 37). Це видно на картах швидкостей за даними статті серпня 2024 року. Ці аномалії, ймовірно, можна асоціювати з двома притоками магматичної речовини, тобто хвостами плюму (Рис. 38). Якщо ця модель правильна, то діаметр кожного хвоста, який піднімається під Східно-Сибірським кратоном, — близько 600–700 км.

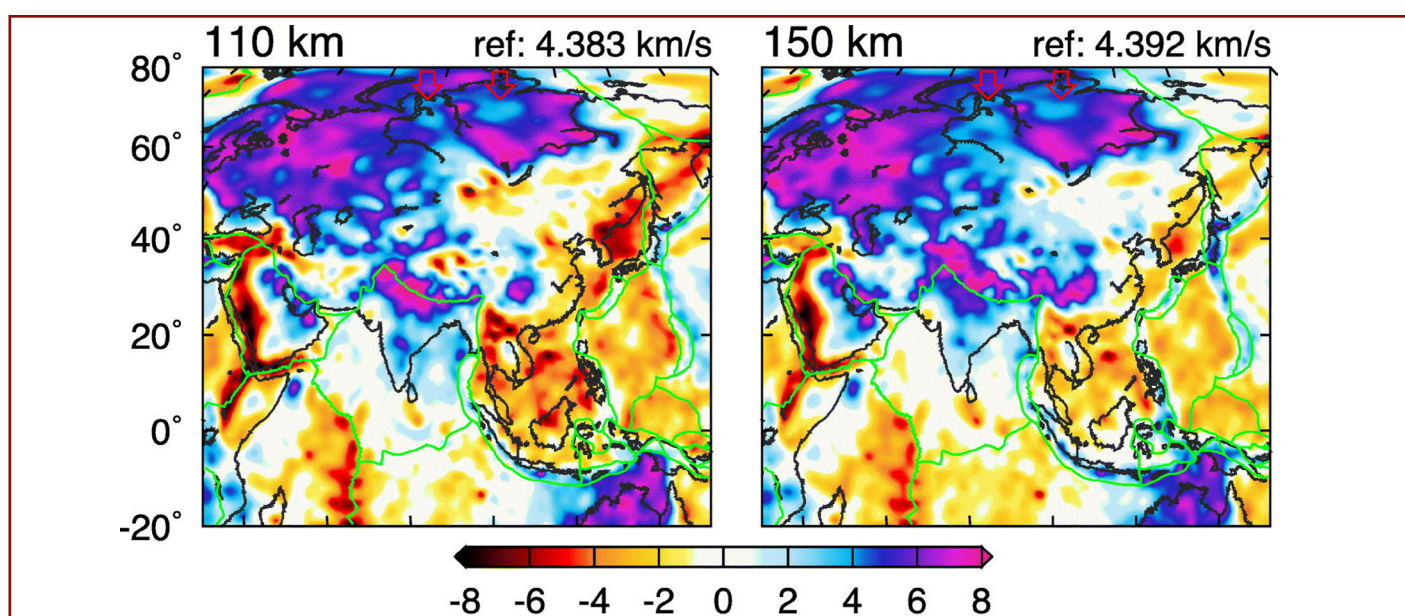


Рис. 37

На карті фіолетовими кольорами показано високі швидкості проходження акустичної хвилі (по жорстких породах) і блакитним — повільніші (рідша, розплавлена речовина). Аномалії знижених швидкостей сейсмічних хвиль, що відповідають зонам більш рідкої речовини мантії, позначені двома червоними стрілками.

Джерело: Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism. *Earth-Science Reviews*, 255, 104841.

⁴²Dou H., Xu Y., Lebedev S., Chagas de Melo B., van der Hilst R.D., Wang B., Wang W. The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism // *Earth-Science Reviews*. 2024. Vol. 255. P. 104595. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104595

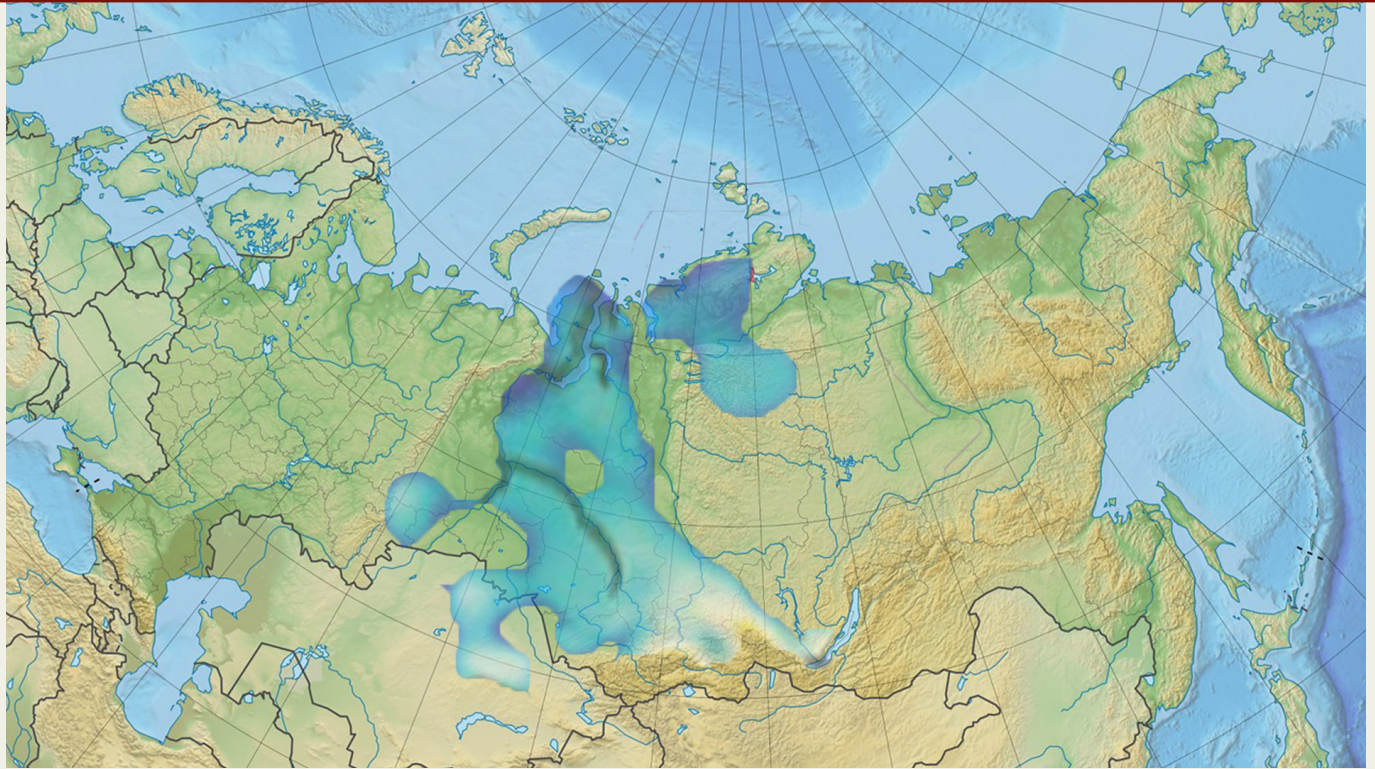


Рис. 38

На фізичну карту Росії нанесені й адаптовані аномалії знижених сейсмічних швидкостей за даними Dou et al., 2024.

Але важливо зазначити, що у представленому в статті сейсмотомографічному аналізі (Dou et al., 2024) на території Сибіру використовували дані менш ніж з 10 сейсмічних датчиків (Рис. 39), які всі розташовані по межах плит і практично відсутні всередині Західного і

Східного Сибіру. В аналізі використовувалися дані всіх загальнодоступних широкосмугових записів землетрусів, починаючи з 1994 року і до 4 вересня 2023 року. Для порівняння, на карті червоними трикутниками позначені датчики, які використовуються в аналізі для Азії, вони обчислюються тисячами.

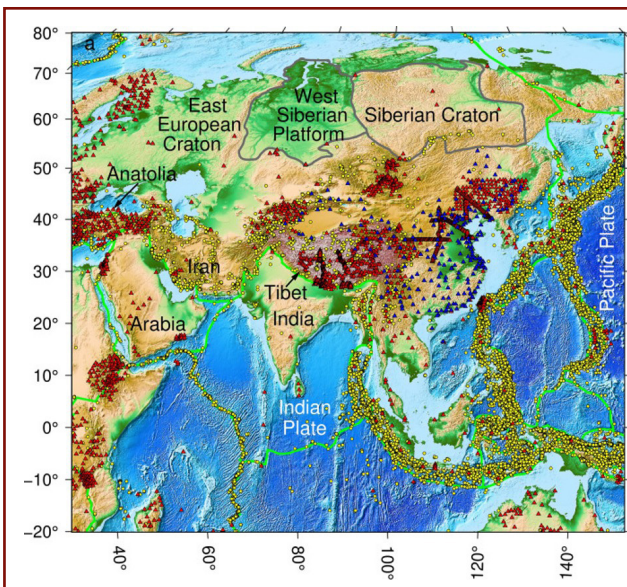


Рис. 39

Розташування датчиків (червоні трикутники), що використовуються під час сейсмотомографічного аналізу.

Джерело: 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>

Ще одне дослідження 2023 року китайських учених підтверджує те, що зараз під Сибіром під впливом магми плавиться і стоншується кора⁴³ (Рис. 40). Цей процес прогресує і знижує міцність плити. У роботі автори представляють модель електропровідності мантії для Північної Азії, побудовану на основі геомагнітних даних. Модель показує велику аномалію з високою електропровідністю, яка перебувала в перехідній зоні мантії під Сибірськими трапами на момент їх виверження. Вчені інтерпретували її як термічну аномалію зі слідами розплаву в районі існуючої Пермської аномалії (Рис. 41).

Загалом, сейсотомографічні моделі, що досліджують глибини від 40 до 110 км у районі Східно-Сибірського кратону, показують

відмінні один від одного результати. При цьому для території Сибіру спостерігається явна нестача сейсмологічних даних для побудови точних моделей.

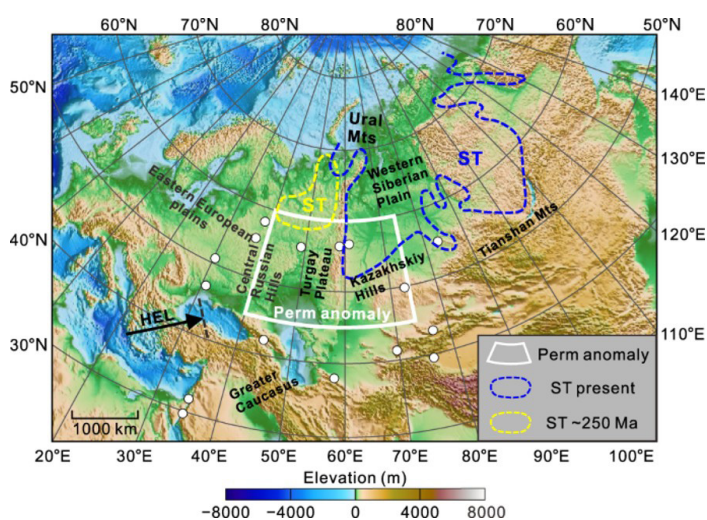
Сучасні томографічні моделі побудовано на основі сейсмічних даних, зібраних за тривалий період — близько 30 років. З точки зору класичних уявлень про розвиток мантийних плюмів тривалістю мільйони років, тридцятирічний період вважається вкрай коротким. Однак існуючі дані вказують на те, що саме за цей проміжок часу в структурі Сибірського плюму відбулися ключові зміни. Ці спостереження дають розуміння необхідності перегляду наявних уявлень про швидкість розвитку мантийних плюмів і методів їх вивчення.

Рис. 40

Білі точки позначають станції, чії С-відповіді використовуються в цьому дослідженні. Діапазон пермської аномалії показано зоною, окресленою білими лініями. Поточне (синє) і минулі (жовте) місця розташування Сибірських трапів позначені пунктирними лініями.

Джерело: Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). Remnant of the late Permian superplume that generated the Siberian Traps inferred from geomagnetic data. *Nature Communications*, 14, 1311.

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



⁴³Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). Remnant of the late Permian superplume that generated the Siberian Traps inferred from geomagnetic data. *Nature Communications*, 14, 1311. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37053-3>

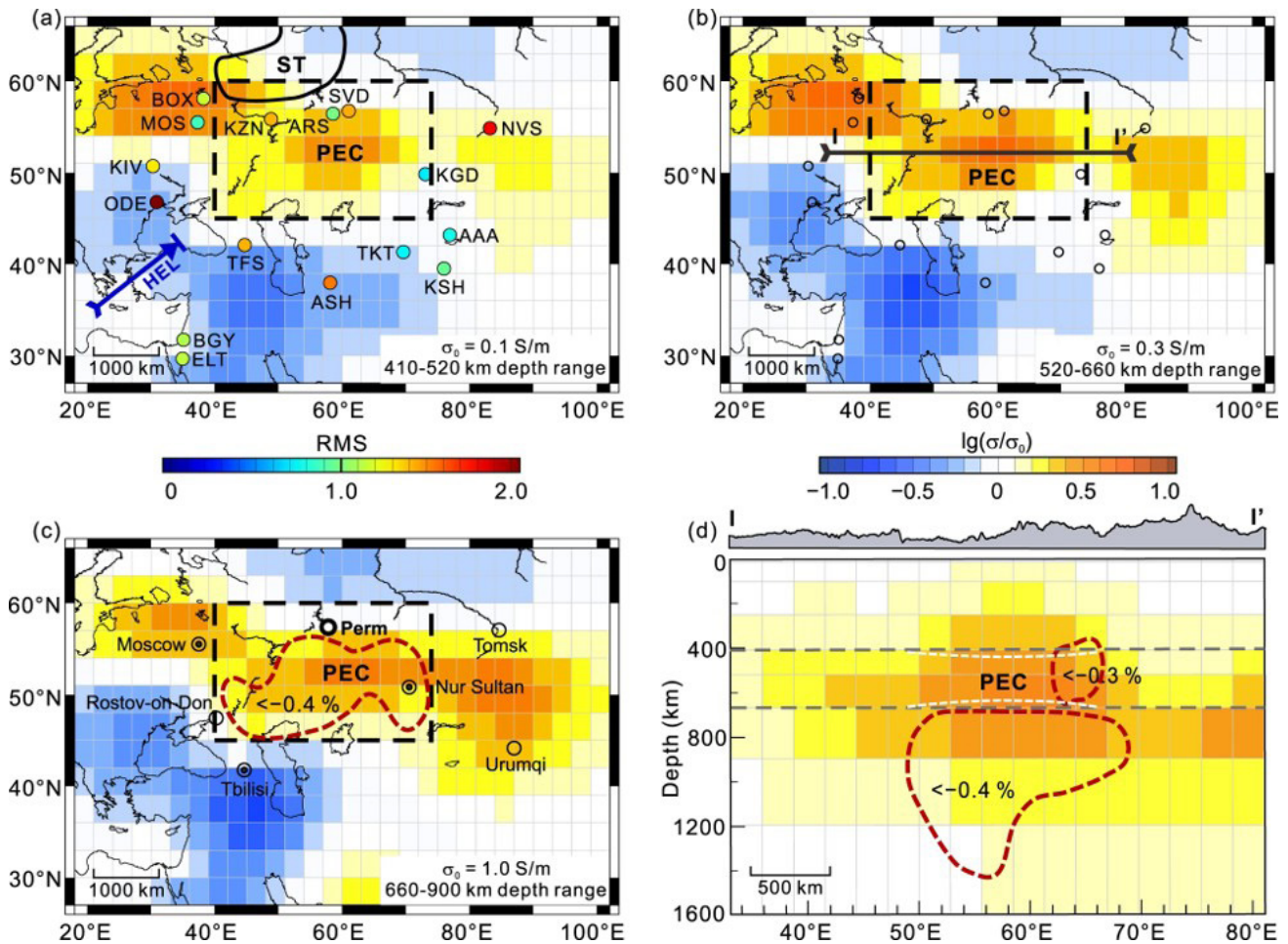


Рис. 41

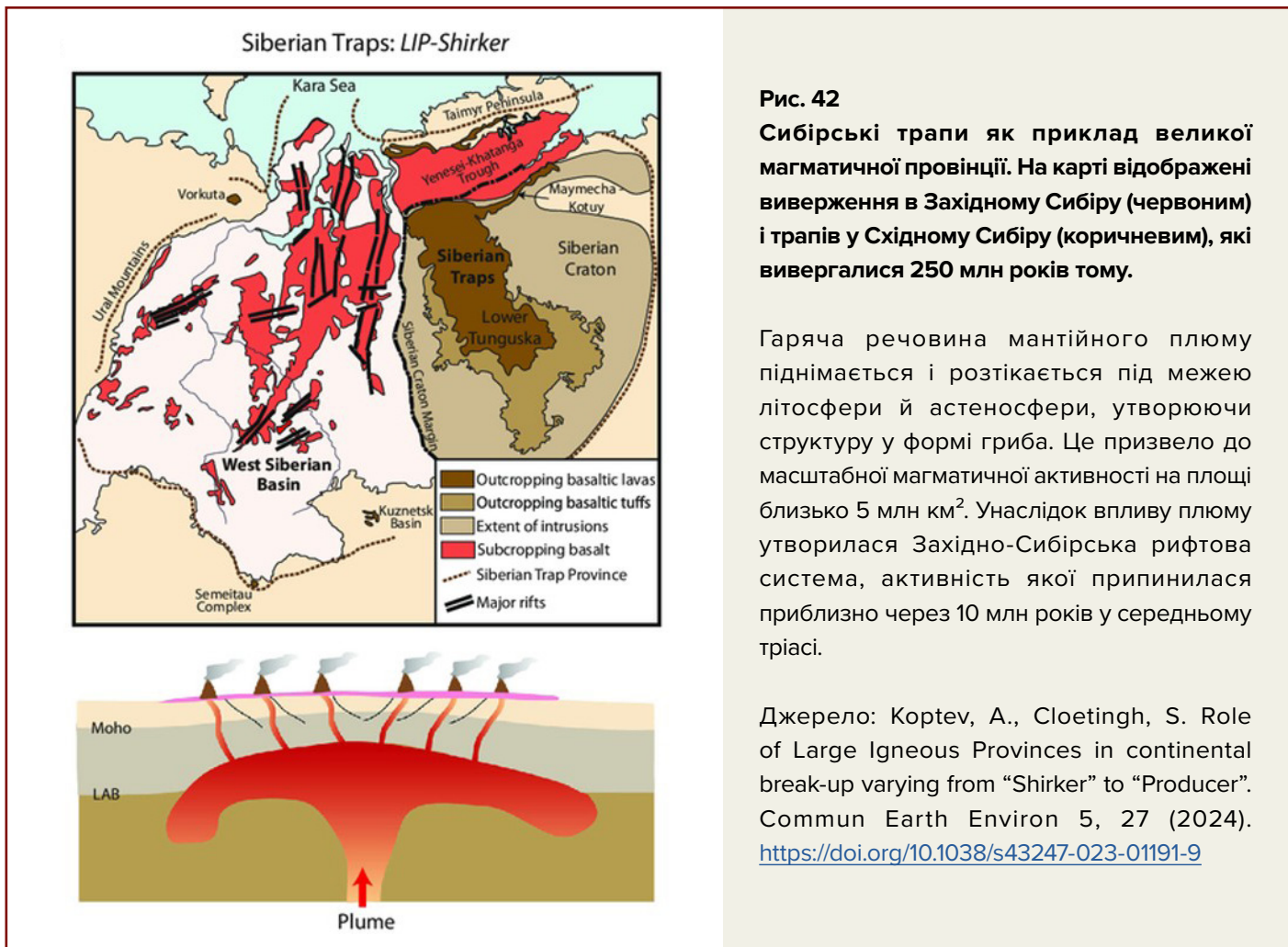
Вчені з Цзілінського університету (Jilin University) і Університету Шицзячжуан Тедао (Shijiazhuang Tiedao University) використовували дані геомагнітного поля (geomagnetic field data) від 16 станцій у Північній Азії для обчислення електричної провідності мантії на різних глибинах. Вони виявили помітне збільшення провідності по відношенню до середньої по всьому світу провідності в області під Сибірськими трапами (жовто-коричневі області на рисунках). Вчені встановили, що ці області на глибинах від 400 до

900 км у середньому на 250 градусів гарячіші, ніж навколишня мантія. У цих областях присутня частка розплавленої мантії.

Джерело: 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>

Варто зазначити, що попередні виливи 250 мільйонів років тому (на рубежі пермського і триасового періодів) відбувалися також у цьому ж регіоні, епіцентр розташовувався

під Східно-Сибірським кратоном (під плато Путарана). А виливи відбувалися по всьому Західному і Східному Сибіру (Рис. 42).



Локалізація магматичного плюму

Якщо узагальнити представлений вище аналіз даних про температурні аномалії ґрунтів, глибину танення вічної мерзлоти, приповерхневі температури, аномалію знижених сейсмічних швидкостей у мантії та

магнітну аномалію, це дасть змогу визначити поточний стан та розміри плюму (Рис. 43).

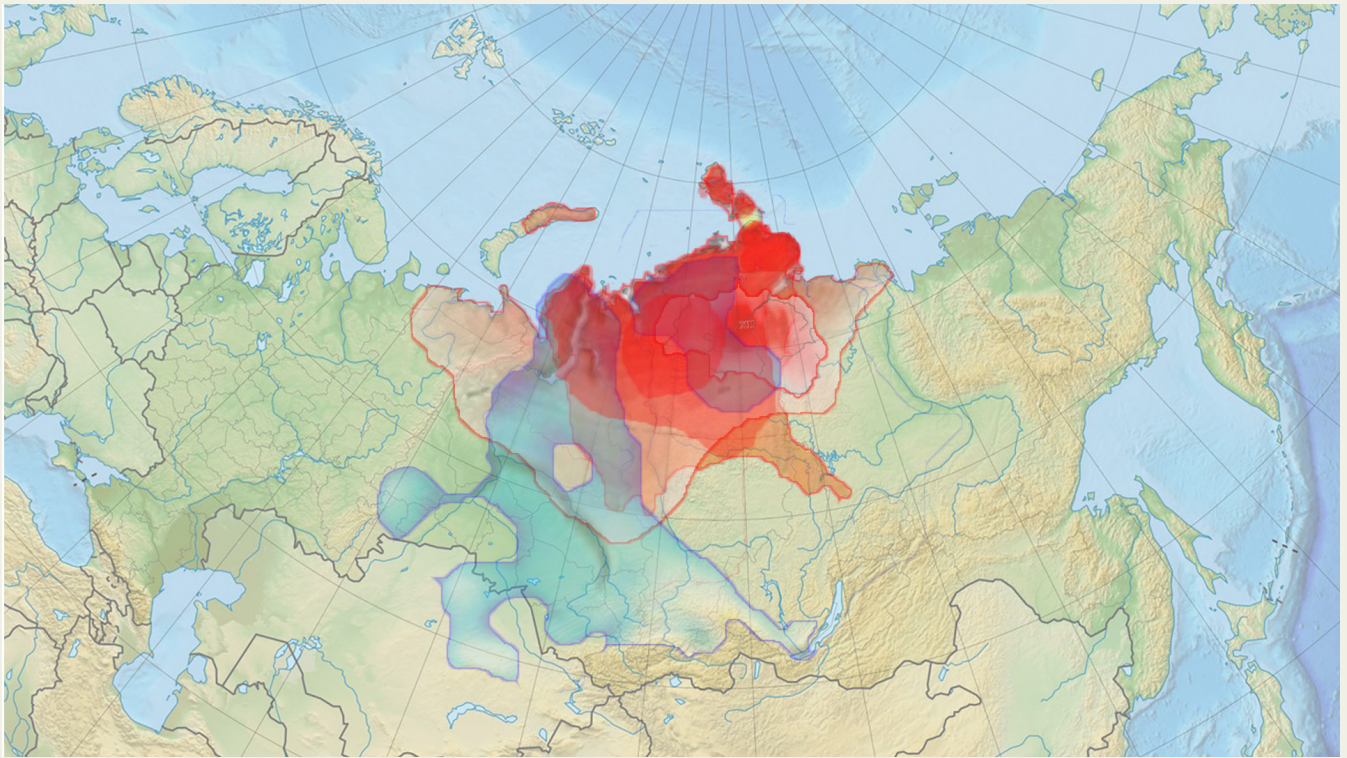
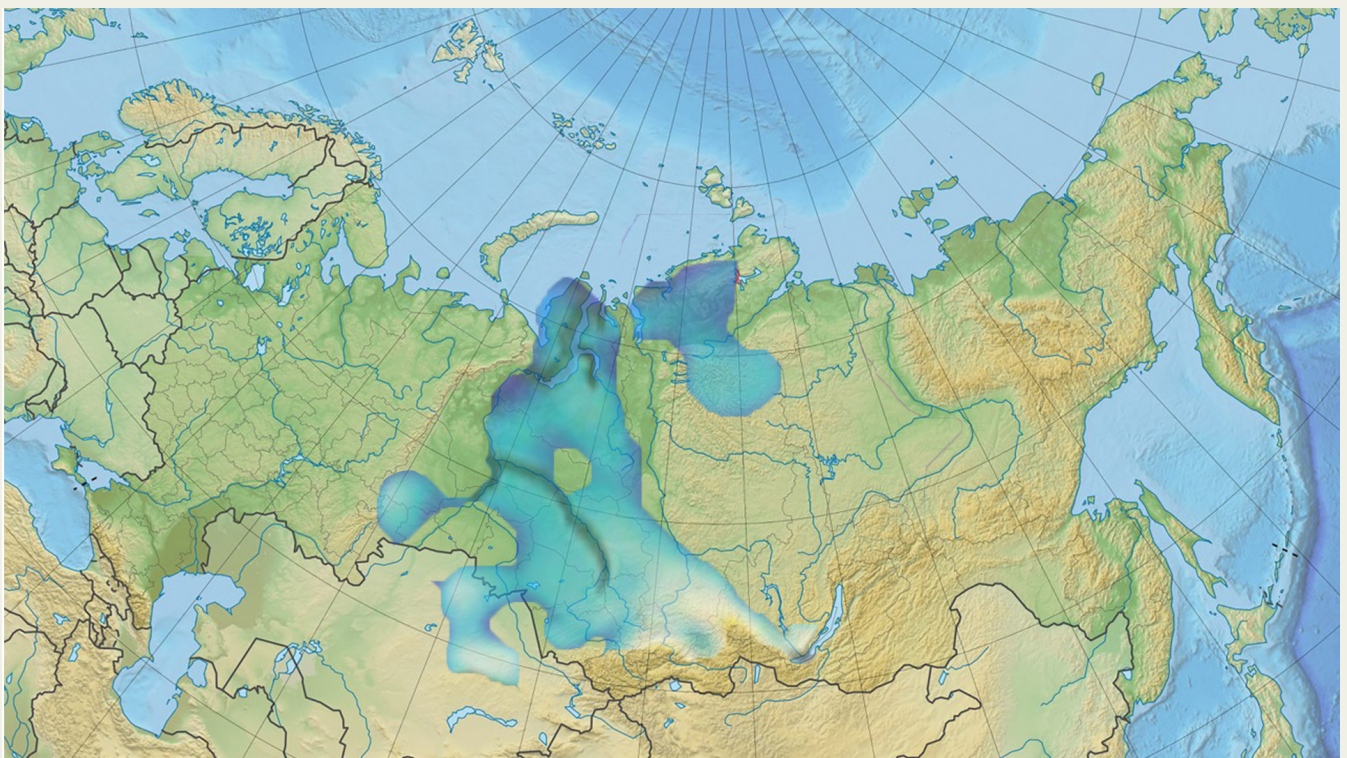


Рис. 43

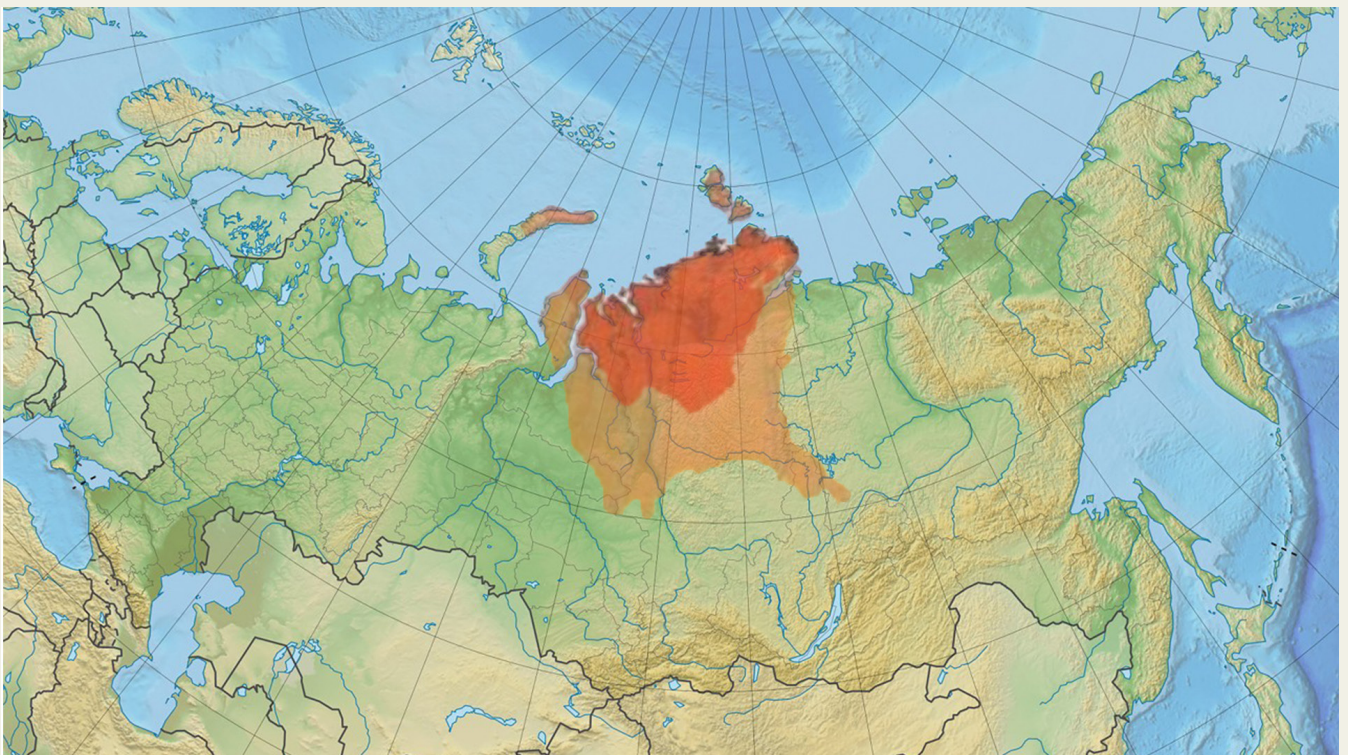
А. Карта з накладенням основних аномалій за різними параметрами, які наведено нижче:



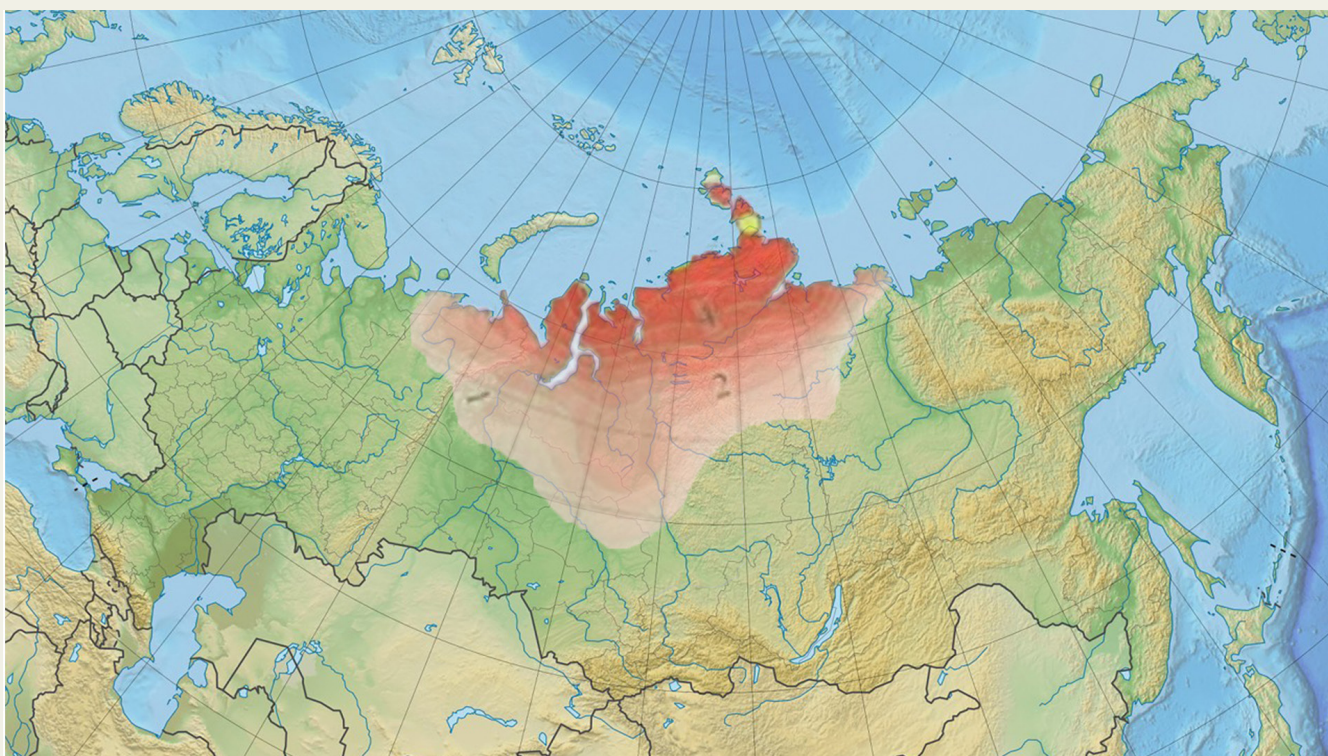
Б. Карта аномалій зі зниженими швидкостями (більш рідка речовина) з глибини 110 км за сейсмотомографією за даними Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023).



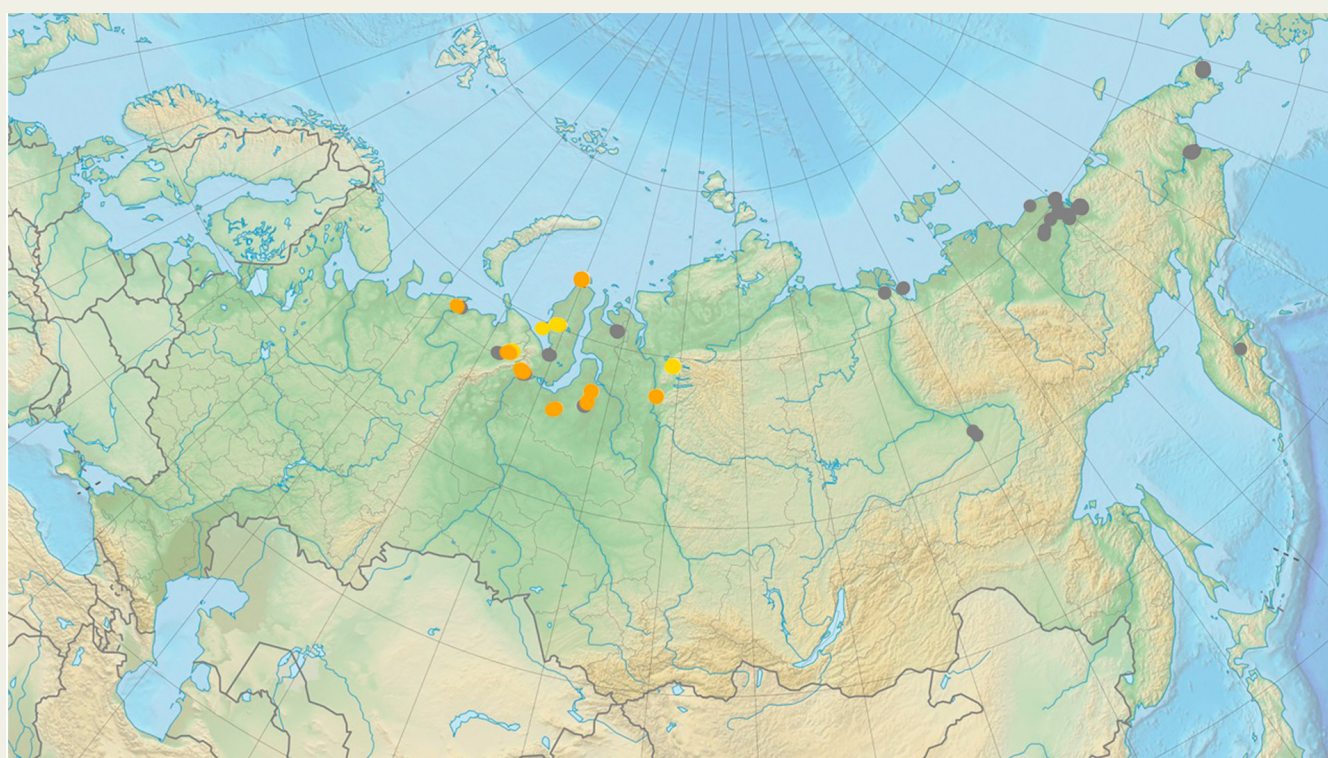
В. Нова аномалія нагріву ґрунту при порівнянні трендів за періоди 1976–2021 і 1976–2023 за даними Росгідромету, 2021, 2023.



Г. Тренд середньомісячної температури повітря за січень 2001–2021 років за даними Шерстнева, 2023.



Д. Середньосезонна температура з грудня 2023 року по лютий 2024 року за даними Росгідромета, 2024.



Е. Місця збільшення глибини сезонного танення шару вічної мерзлоти.

Джерело даних: <https://permafrost.su/>

Згідно з гіпотезою, висхідна частина плюму розташована на південь від півостровів Гидан і Таймир і має кілька гілок. Діаметр голови плюму оцінюють у 1200–1500 км, а зона розтікання магматичних потоків може досягати 2500–3000 км. Ця область охоплює тектонічні структури Західно-Сибірської плити та Східно-Сибірського кратона. Наразі головна частина плюму впливає на основу Східно-Сибірського кратона, поширюючи магматичні потоки під його територією. Цей процес, імовірно, впливає на підвищення

сейсмічної активності в районі крайових частин плити, наприклад у зоні Байкалу і навіть Уралу. Причиною таких аномалій саме в крайових частинах плит є дестабілізація плит унаслідок розм'якшення підстилаючої астеносфери та незначного підйому центральної частини Сибірського блока земної кори, тобто тектонічних структур Західно-Сибірської плити та Східно-Сибірського кратона разом із тектонічною структурою Верхояно-Чукотської складчастої системи.

Зростання сейсмічної активності як ознака дестабілізації плит внаслідок активності Сибірського магматичного плюму

Методика аналізу сейсмічної активності включала скачування та спеціальну обробку даних, отриманих на сайті Міжнародного Сейсмологічного Центру (International Seismological Centre — ISC). Оскільки дані беруться з різних джерел з різних країн та дослідницьких інститутів, а також містять різні типи магнітуд (M_w, M_s, M_b, M_L, M_D тощо), був виконаний певний алгоритм обробки даних для вибору відповідного типу магнітуди з різних джерел (див. Додаток 1). Основна ідея алгоритму обробки полягала у виборі медіанного значення серед найбільш поширених типів магнітуд для кожної з подій, оскільки на кожну подію різні джерела передавали в базу даних ISC різні типи і значення магнітуд. Така обробка в середньому призводить до невеликого зниження величини магнітуди відносно максимального переданого значення, але,

як показав досвід, медіанний алгоритм дає адекватний прояв Закону Гутенберга Ріхтера та інших закономірностей, і досить добре узгоджується з даними інших сейсмологічних баз, таких як IRIS та USGS.

Отримані в результаті алгоритму дані були відфільтровані за типами подій у базі ISC (див. Додаток 1), щоб виключити події, спричинені людською діяльністю в ході гірничодобувних робіт: вибухи, можливі вибухи, гірські удари тощо. Також, оскільки на території Росії знаходиться багато гірничодобувних підприємств, база даних ISC була зіставлена з даними Єдиної геофізичної служби РАН⁴⁴ на січень 2025 року, де вказані всі відомі вибухи та гірські удари на території Росії. Ці події також були виключені, щоб гарантувати, що в отриманих даних не залишилося подій, які відповідають вибухам.

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

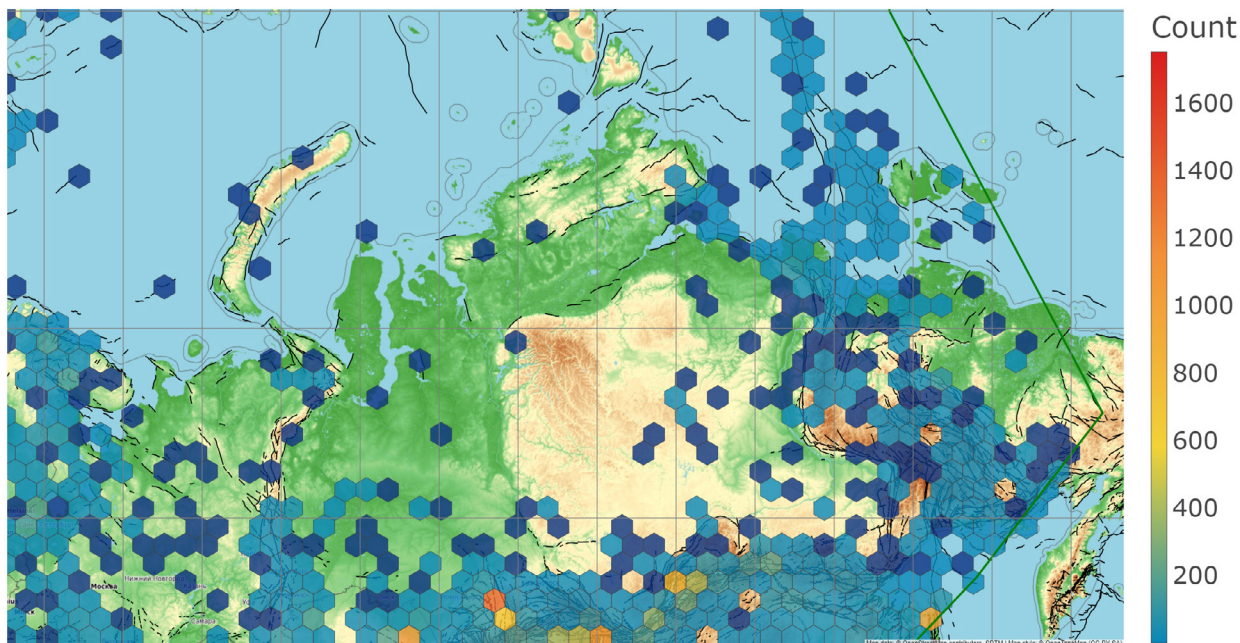
Розглянемо результати аналізу даних у регіоні підйому магматичного плюму та крайових частинах крупних тектонічних блоків, на які він чинить безпосередній вплив. Оскільки Сибірський кратон вважається відносно стабільною асейсмічною платформою, то поява навіть невеликої кількості землетрусів у його межах буде аномалією.

На Рис. 44 показано щільність розподілу землетрусів на території Росії. У районі Сибіру найбільше скупчення землетрусів закономірно спостерігається в складчастих областях — Верхоянського кряжа на сході, по хребту Гаккеля, Уральських гір на заході, в Алтай-Саянському регіоні на півдні. Поодинокі події присутні і на території самого Сибіру — кілька землетрусів магнітудою

близько 4,0 зафіксовано на південь від півострова Таймир. Розглянемо докладніше динаміку землетрусів на локальних ділянках в області Сибірського плюму і суміжних регіонів.

По геологічним структурам виділено області, де мантийний плюм може здійснювати різний вплив (Рис. 45). Була обрана область самого плюму, де вплив може бути пов'язаний з проникненням і тиском магми та флюїдної фази (магматичних газів). У крайових частинах Східно-Сибірської платформи і Західно-Сибірської плити ймовірніший вплив плюму на сейсмічність за рахунок дестабілізації положення щільних блоків земної кори.

Щільність землетрусів M3+ на території Сибіру



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

Рис. 44

Щільність землетрусів магнітудою від 3,0 на території Сибіру з 1990 по 2024 р.

База даних: ISC

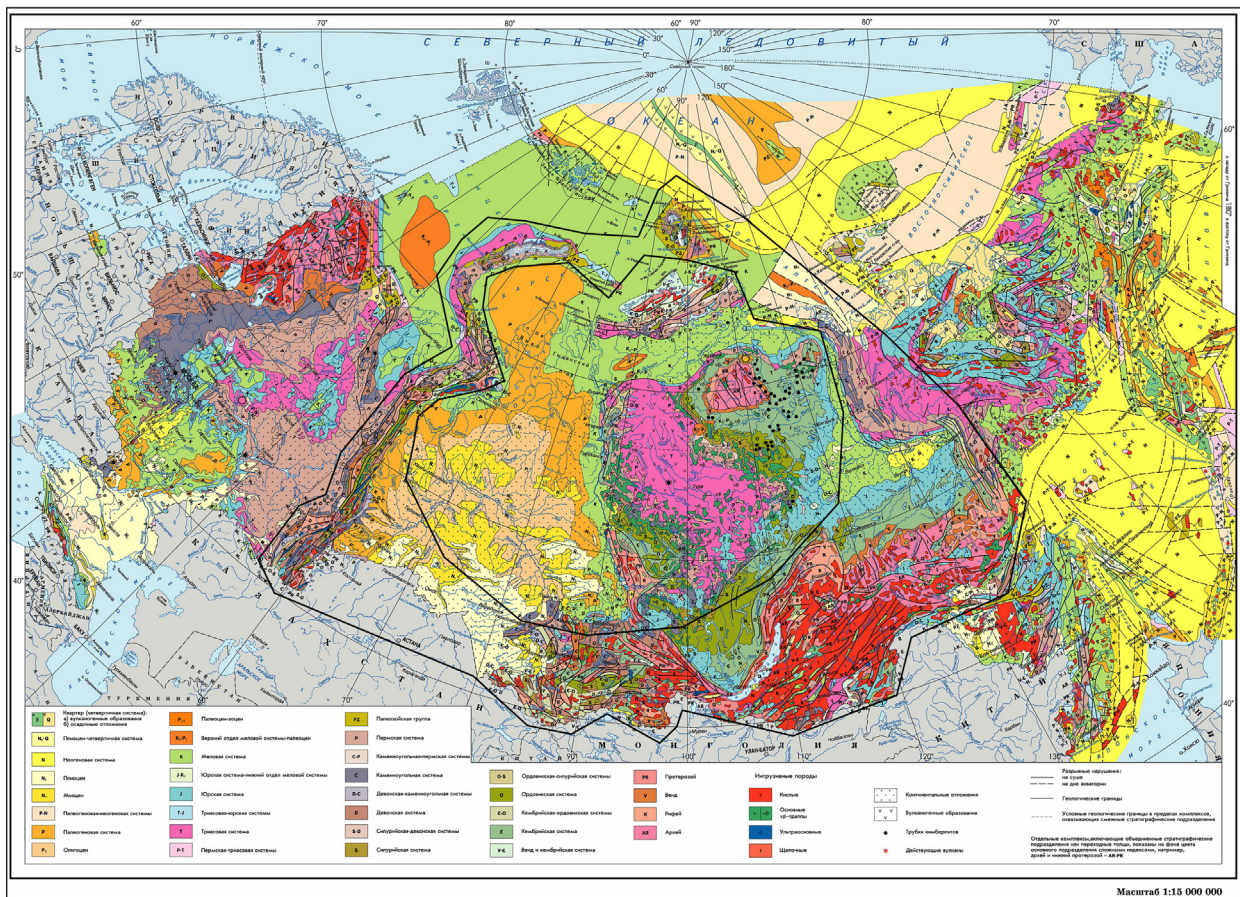


Рис. 45

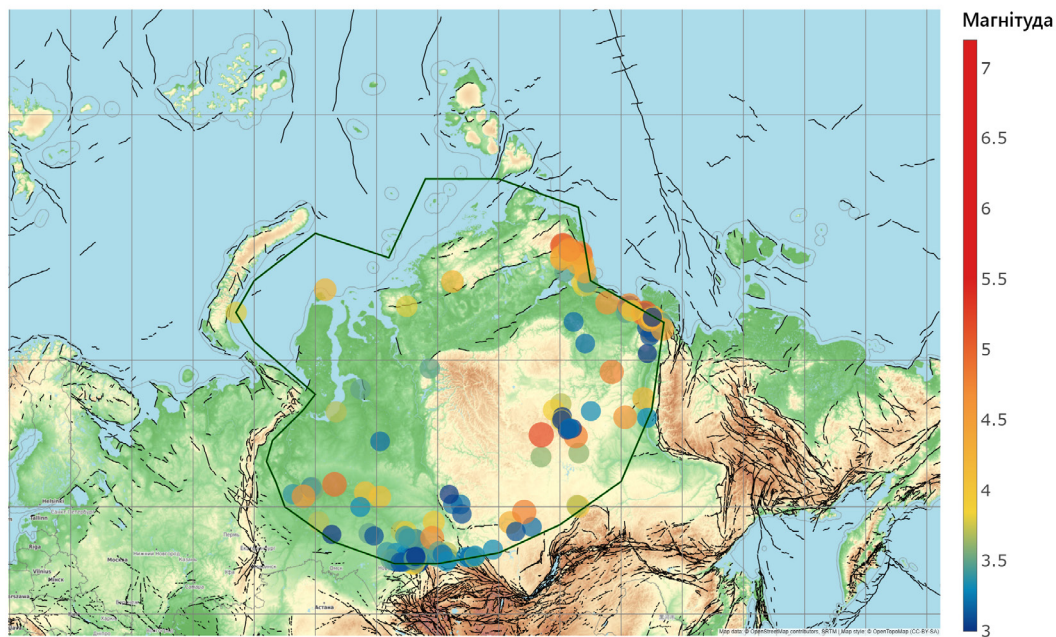
Виділений за геологічними структурами полігон в області впровадження і розтікання Сибірського плюму (внутрішній чорний полігон) для аналізу сейсмічності. Зовнішній чорний полігон відповідає області крайових ефектів від тиску Сибірського плюму на плити.

Отже, розглянемо детальніше землетруси в центральній області Сибірського плюму. На Рис. 46 представлено карту розташування землетрусів магнітудою від 3,0. Землетруси фіксують у південній частині півострова Таймир. Особливе занепокоєння викликають два нещодавні землетруси, що сталися в цьому регіоні в серпні та вересні 2024 року магнітудою 3,5 та 3,8 відповідно. Подібні магнітуди були зафіксовані в південній частині півострова Гидан (M3.5) та на півострові Ямал (M3.7 і M4.2) на глибині 10 км. Ці землетруси були зафіксовані в зоні

локалізації голови Сибірського плюму, що є тривожною тенденцією, і це буде пояснено далі.

У виділеній області Сибірського плюму з 1990 по 2024 рік загалом зафіксовано 205 землетрусів магнітудою від 3,0. У 1995 році спостерігалось збільшення кількості землетрусів (Рис. 47), що узгоджується із загальнопланетарною тенденцією зростання сейсмічності у 1995 році, пов'язаною з магматичною активізацією.

Землетруси М3+ область Сибірського плюму

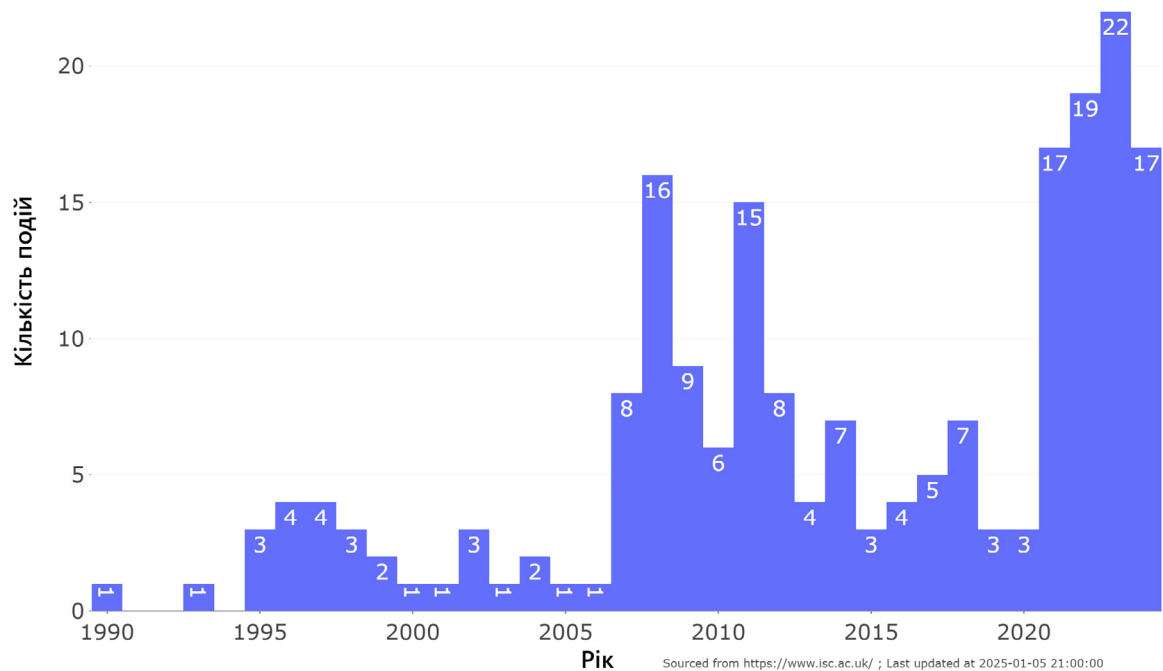


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

Рис.46

Карта землетрусів магнітудою від 3,0 і вище в області Сибірського плюму з 1990 по 2024 р. База даних ISC.

Землетруси М3+ область Сибірського плюму



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

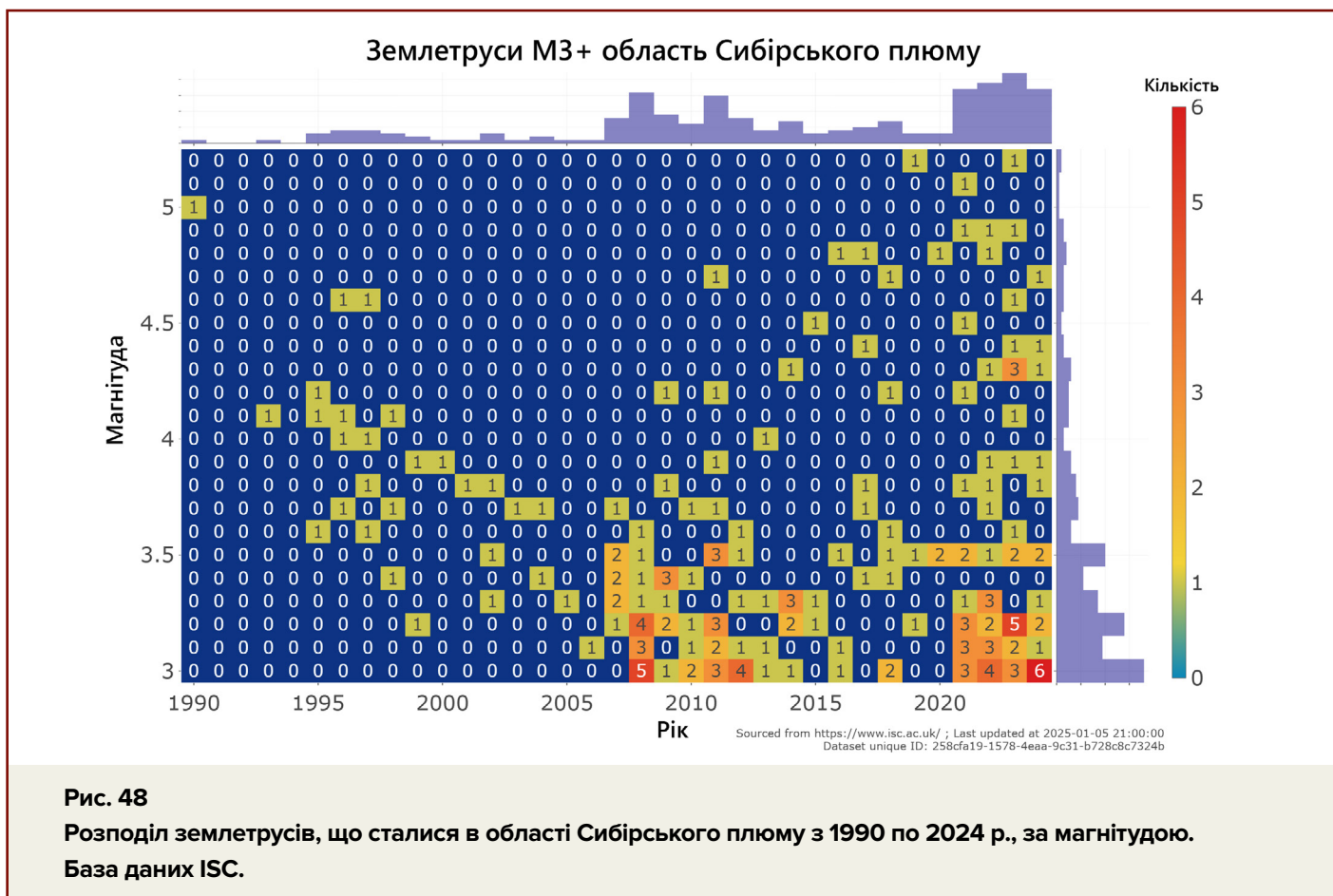
Рис. 47

Кількість землетрусів магнітудою від 3,0 та вище в області Сибірського плюму з 1990 по 2024 р. База даних: ISC

З 2007 року спостерігається значне зростання кількості землетрусів із поступовим зниженням сейсмоактивності. З 2021 року кількість землетрусів знову різко зросла, перевищуючи попередні щорічні показники. Відтак в області Сибірського плюму спостерігається хвилеподібне наростання сейсмічної активності. Останніми роками стабільно фіксується помітно більше подій, ніж було типово для цієї території раніше.

Після землетрусу магнітудою 5,0 1990 року спостерігалось поступове зниження магнітуд та кількості землетрусів (Рис. 48).

З 1990 року до 2007 року зареєстровано лише три землетруси магнітудою понад 4,5. З 2007 року спостерігається поступове зростання магнітуди землетрусів. Вперше за історію спостережень з'являються землетруси магнітудою 5,1 та 5,2 з 2019 року. Всі землетруси магнітудою від 4,5 розташовані в обрамленні плюму (Рис. 49), частина з них приурочена до стабільних областей, де відсутні відомі розлами.



Землетруси M4.5+ область Сибірського плюму

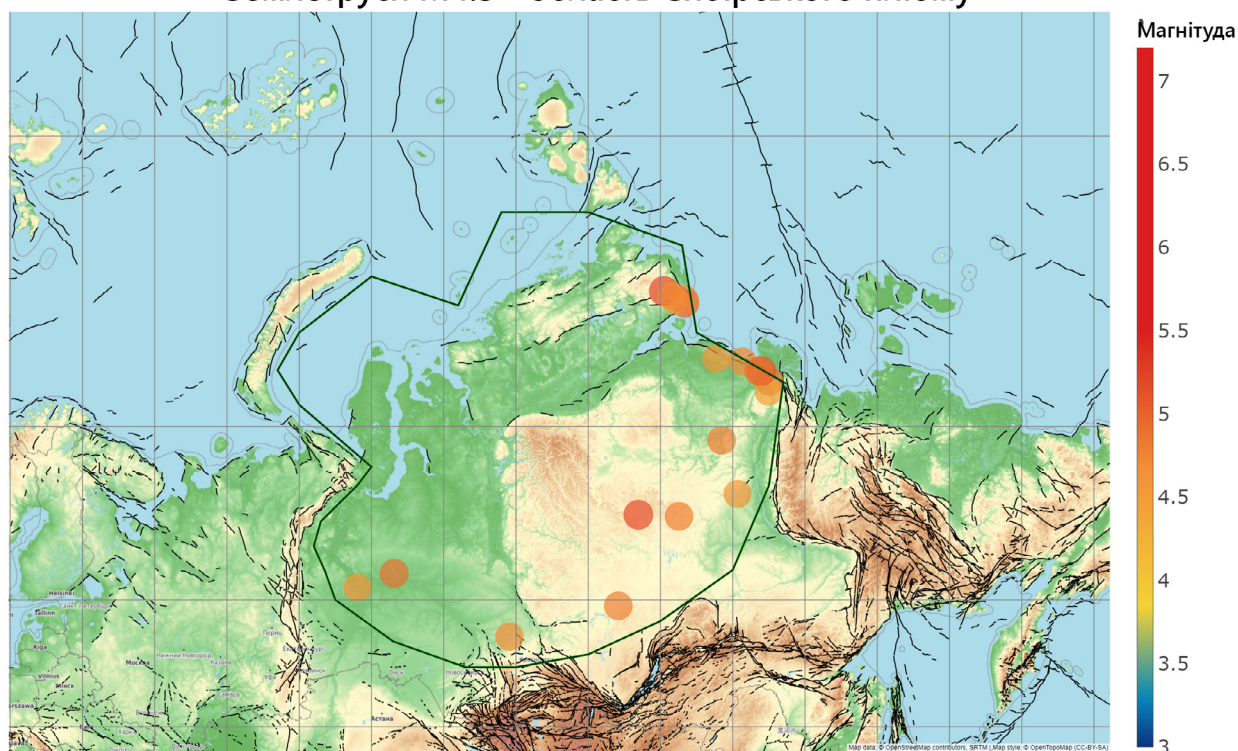


Рис. 49

**Карта землетрусів магнітудою від 4,5 та вище в області Сибірського плюму з 1990 по 2024 р.
База даних: ISC**

У тому ж 2007 році було вперше зареєстровано землетрус магнітудою 3,7 на глибині 33 км поблизу межі Мохо (Рис. 50). Після 2014 року землетруси в районі підшви земної кори на глибині 30–35 км стали відбуватися значно частіше, причому їх магнітуда близько 5,0. Всі вони розташовані в обрамленні ймовірного місця плюма.

Наведений аналіз землетрусів у області передбачуваного знаходження Сибірського плюму показав, що відбувається

хвилеподібне збільшення сейсмічності: збільшується кількість землетрусів, відбувається зростання магнітуди і з'явилися землетруси на великих глибинах. Це означає, що відбуваються процеси деформації плити під впливом колосального тиску магми знизу. Прогресування цих процесів неминуче в стислі терміни призведе до виверження Сибірського плюму з наступних причин.

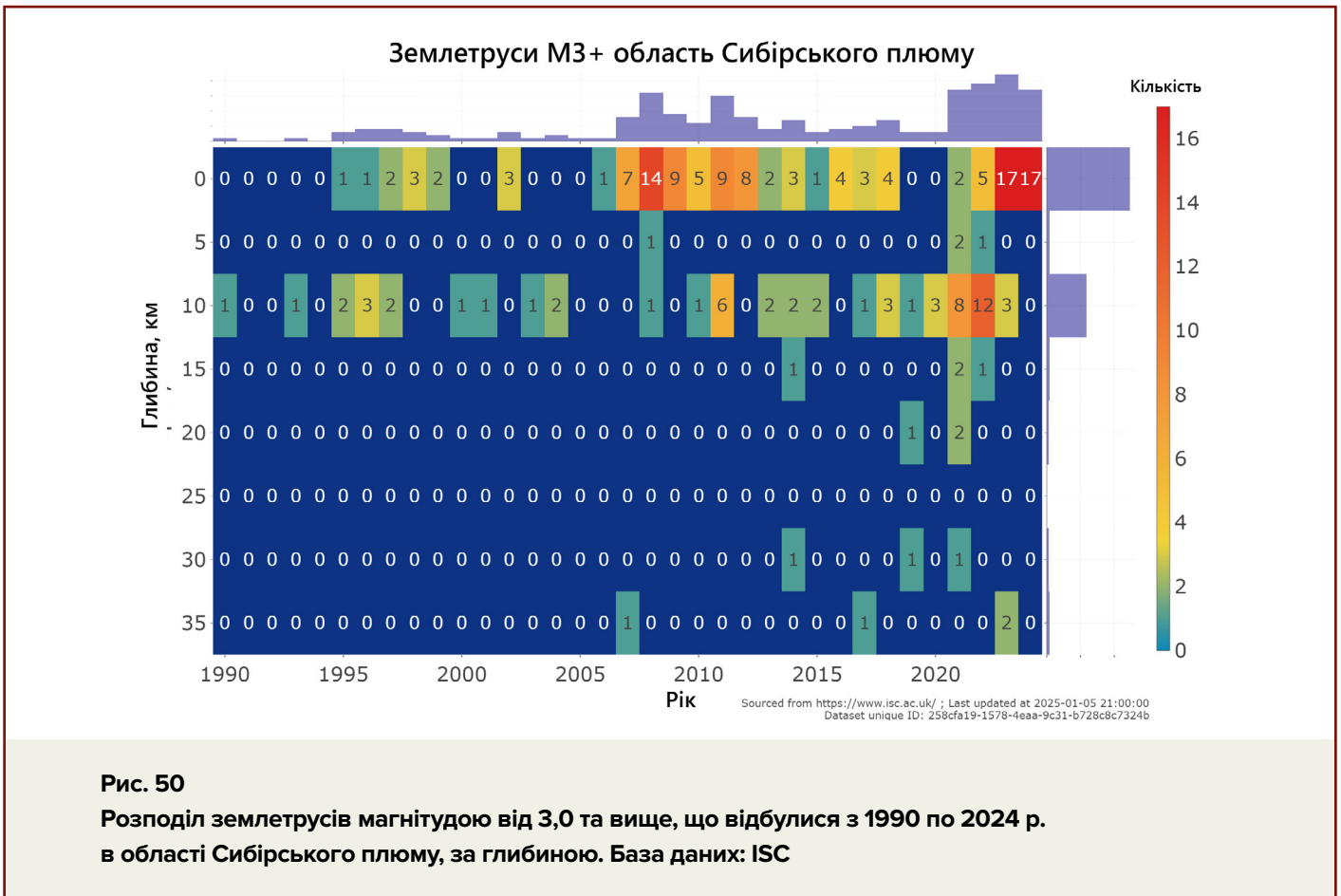


Рис. 50
Розподіл землетрусів магнітудою від 3,0 та вище, що відбулися з 1990 по 2024 р.
в області Сибірського плюму, за глибиною. База даних: ISC

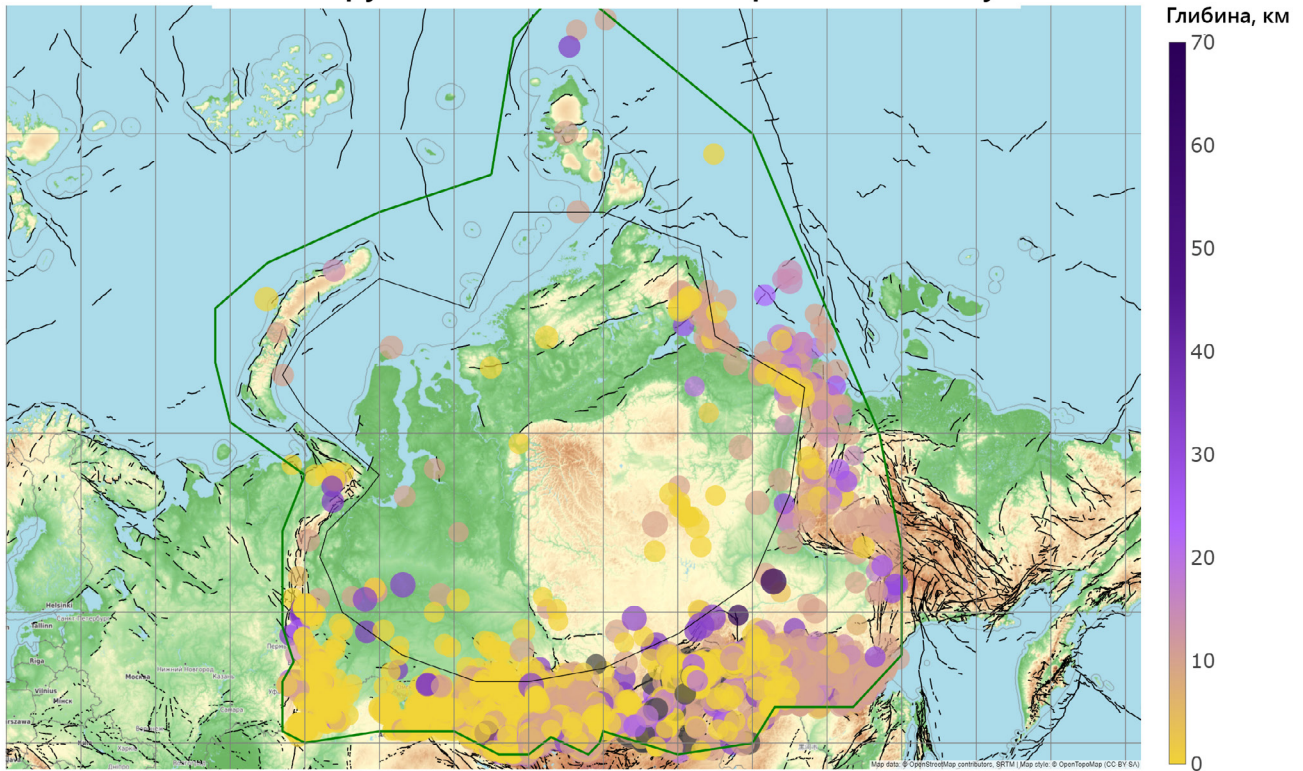
Фундамент Східно-Сибірського кратона зцементований магматичними та метаморфічними породами, що створюють щільну монолітну кірку, яка сформувалася внаслідок вивержень, що сталися 250 млн років тому. Поява сильних землетрусів, починаючи від магнітуди 7,0 у цьому регіоні означатиме, що платформні структури Сибірського кратона зазнають деформацій, які перевищують межу міцності гірських порід. Для аналогії того, як монолітний Сибірський кратон може розірватися під дією тиску плюму, можна навести приклад, як скло тріскається безпосередньо перед тим, як воно розіб'ється повністю. Тобто одразу після появи сильних землетрусів у цьому регіоні буквально наступної доби може початися прорив плюму на поверхню.

Наразі для розуміння реальної ситуації просування плюму та стану міцності земної кори

в області магматичного Сибірського плюму вкрай необхідне встановлення додаткових сейсмоматчиків, переважно у свердловинах на глибині кількох кілометрів. Це дозволить провести детальний сейсмотомографічний аналіз земної кори та мантиї і запровадити постійний моніторинг розташування плюму та його активності (див. розділ «Планова контрольована дегазація»).

Звернімо увагу на розподіл землетрусів за глибиною в області Сибірського плюму та його крайових зон (Рис. 51). Землетруси на глибинах поблизу межі Мохо (понад 30 км) і в самій мантиї відбуваються в основному в районах складчастих областей і можна помітити, що вони обрамляють область ймовірного розташування Сибірського плюму.

Землетруси М3.5+ область Сибірського плюму



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

Рис. 51

Карта землетрусів магнітудою від 3,5 та вище в районі Сибірського плюму з 1990 по 2024 р. Колірна шкала відповідає величині глибини. База даних: ISC.

Розглянемо сейсмічну активність лише в крайових частинах Сибірського плюму. Геологічно ці області належать до складчастих поясів і сейсмічно активних регіонів, сейсмічність в яких може бути обумовлена як тектонічними зрушеннями, так і впливом магматичного плюму. Графік кількості землетрусів демонструє змішану картину накладання різних факторів сейсмічності (Рис. 52). У певні роки спостерігаються значні сплески сейсмічної активності. Для більш точного розуміння природи цих процесів необхідно розглянути кожен регіон окремо.

Розглядаючи зону Верхоянських складчастих структур і розломів на дні моря Лаптевих (Рис. 53), бачимо, що сильні сплески землетрусів магнітудою від 3,0 сталися у 2013 році та у 2021–2022 роках (Рис. 54). Такі сплески характерні для етапів проникнення магми, що спричиняють значні порушення суцільності земної кори та вихід флюїдної фази через тріщини порід і прилеглі розломи. Такі прояви так само супроводжуються збільшенням землетрусів дрібних магнітуд і виникненням роїв землетрусів, а часом навіть серій роїв.

Землетруси М3+ в крайових частинах Сибірського плюму

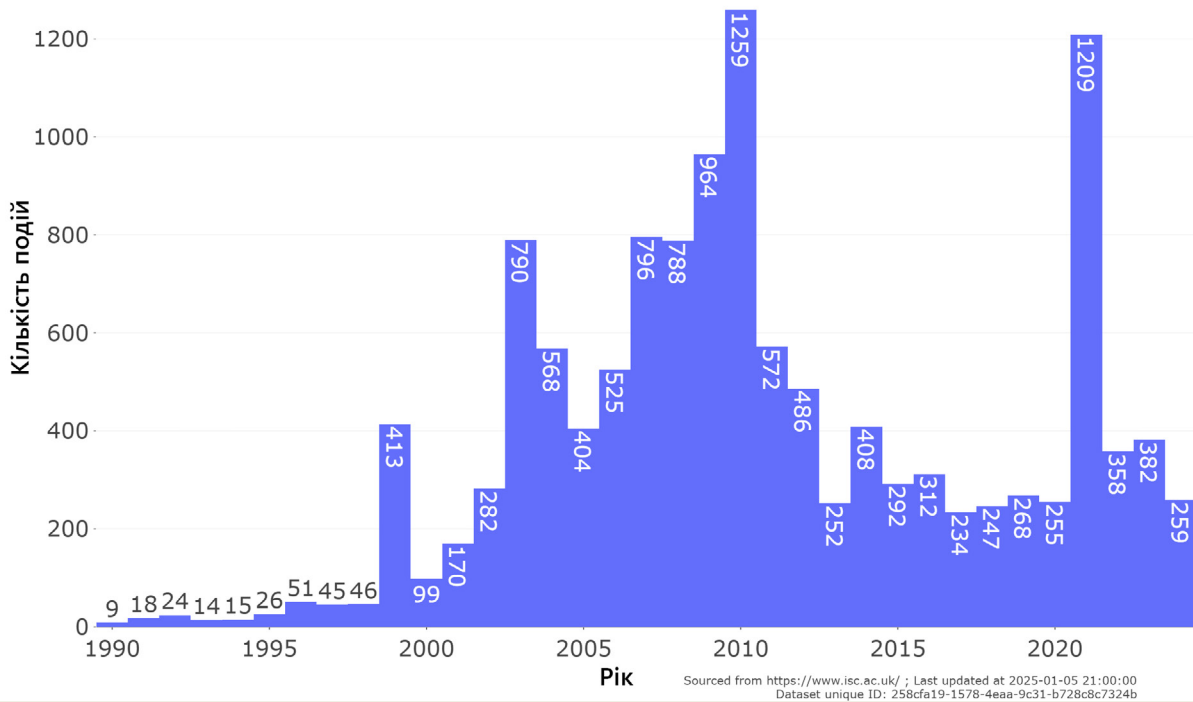


Рис. 52

Кількість землетрусів магнітудою від 3,0 та вище в крайових частинах Сибірського плюму з 1990 по 2024 р. Були виключені землетруси всередині полігону (Рис. 47).

База даних: ISC.

Щільність землетрусів М3+ Північно-Східна частина

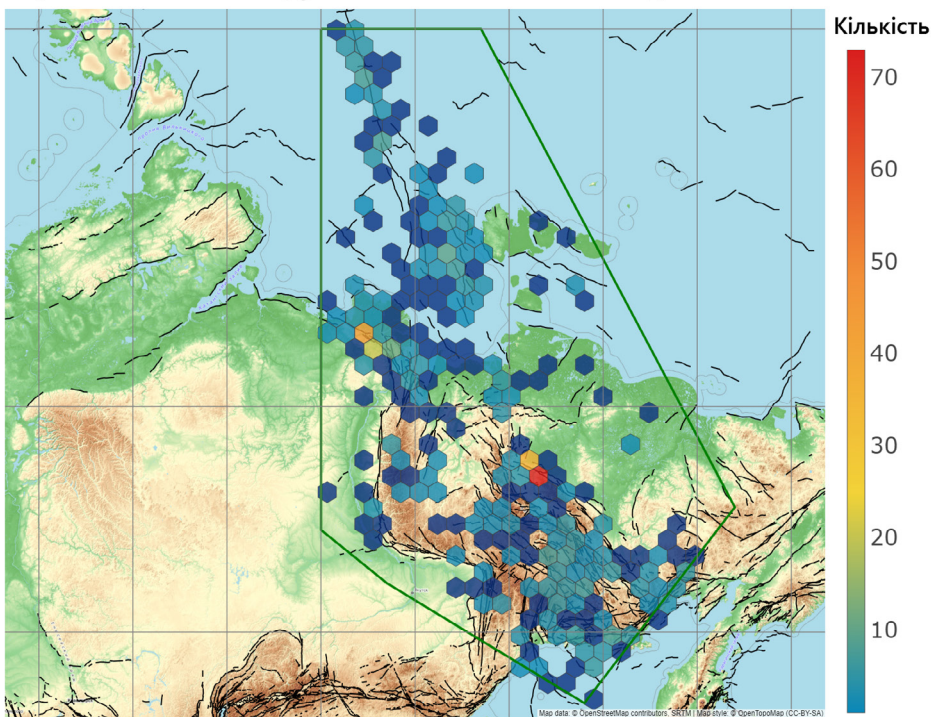


Рис. 53

Щільність землетрусів магнітудою від 3,0 на обраній ділянці на північно-східному краї Сибірського блока земної кори з 1990 по 2024 р. Чорним позначено лінії розломів. База даних: ISC.



Рис. 54

Графік кількості землетрусів магнітудою 3,0 і більше на обраній ділянці на північно-східному краї Сибірського блока з 1990 по 2024 р.

База даних: ISC.

Дослідження магнітуд землетрусів у цій зоні показує сплеск кількості землетрусів магнітудою від 2 до 3,5 у 2010 році, у 2013–2014 роках і значне збільшення їхньої кількості з 2019 року (Рис. 55).

З 2019 року також значно збільшується кількість землетрусів, які зачіпають земну

кору практично дощенту, аж до глибини 35 км (Рис. 56). У 2013 році вперше в цьому регіоні з'являється землетрус магнітудою 6,7, що вочевидь свідчить про тривалий етап накопичення напруги або розвантаження накопичених магматичних флюїдів.

Землетруси M2+ Північно-Східна частина

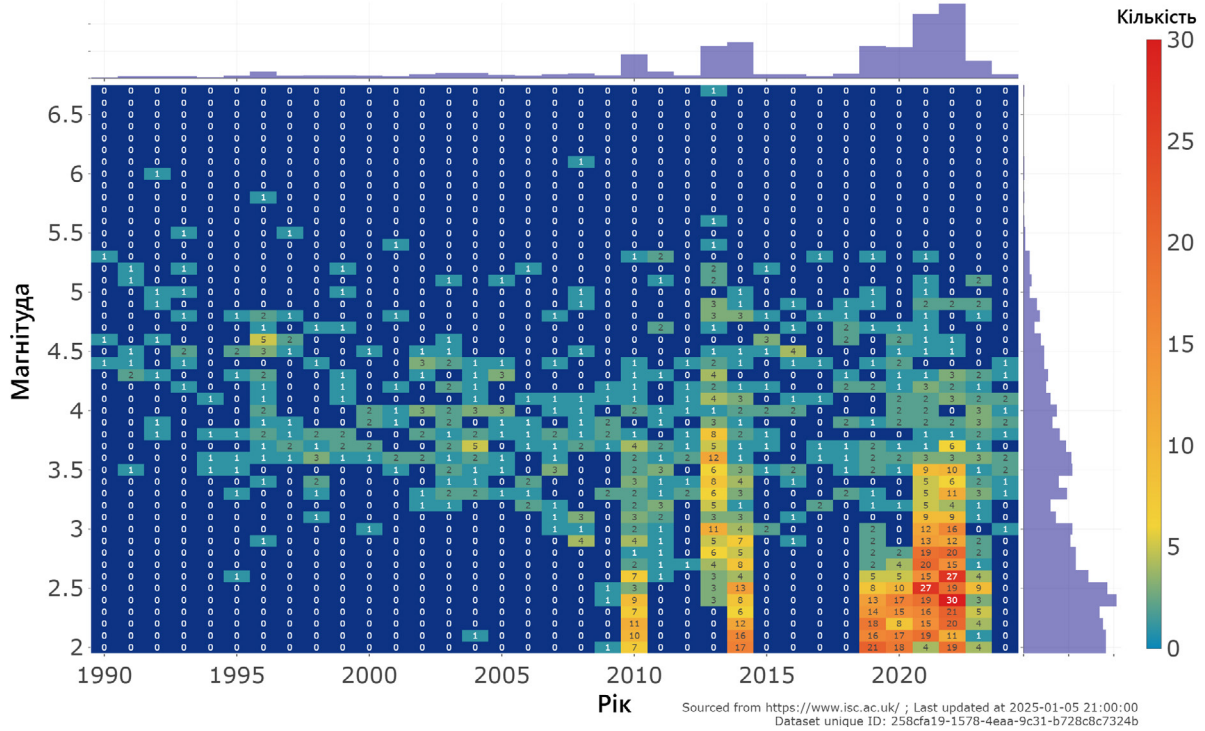


Рис.55

Розподіл кількості землетрусів за магнітудою на обраній ділянці на північно-східному краї Сибірського блока з 1990 по 2024 р. База даних: ISC.

Землетруси M2+ Північно-Східна частина

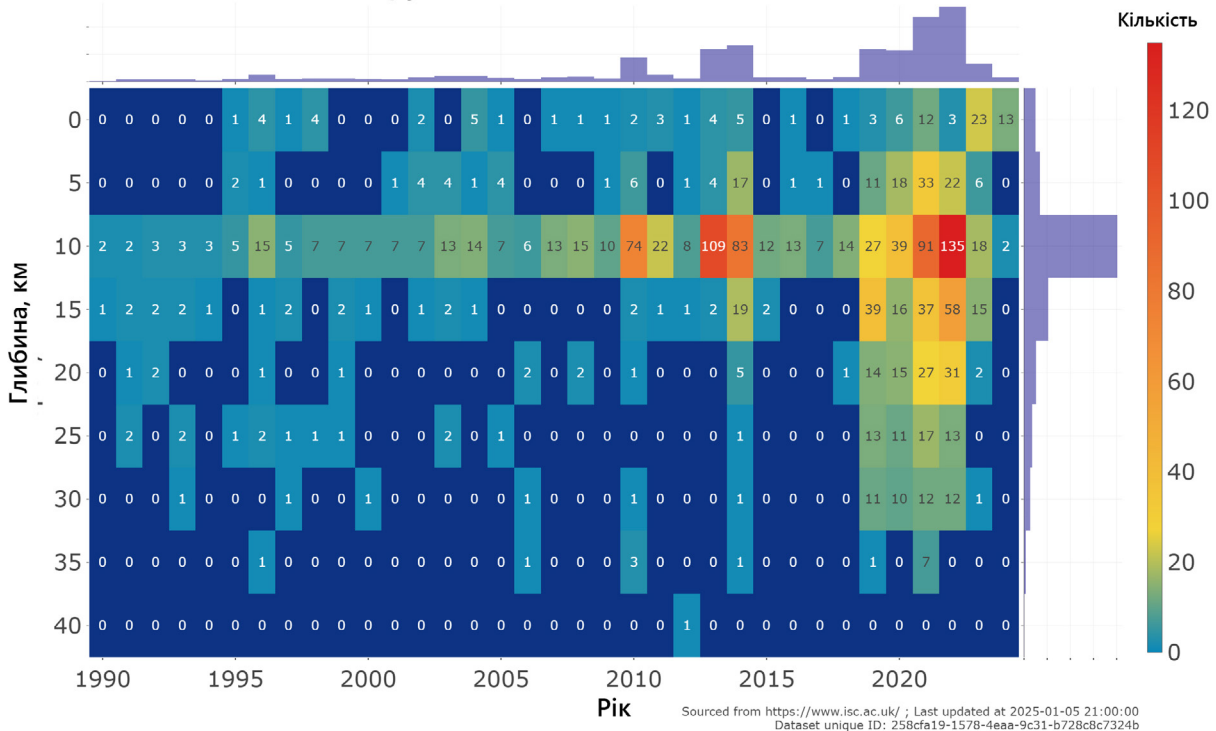


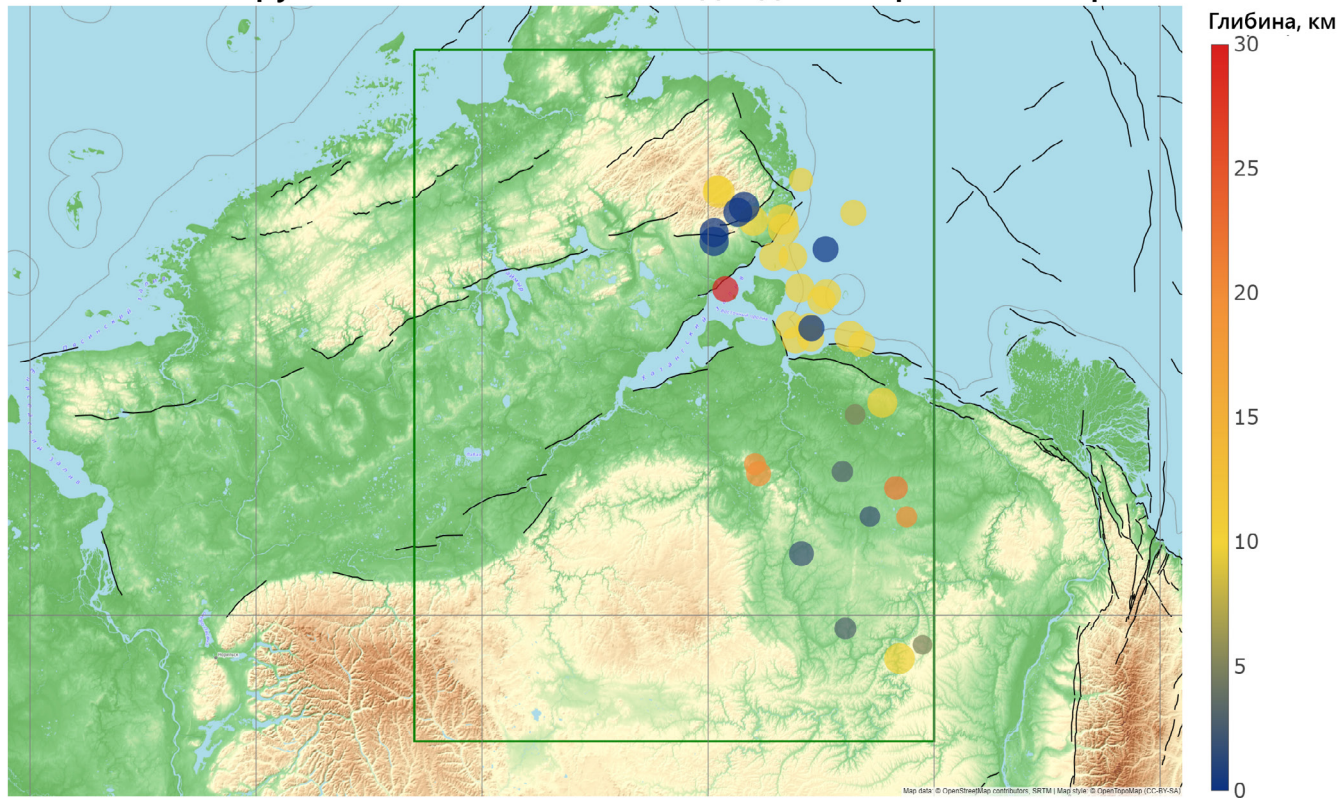
Рис. 56

Розподіл кількості землетрусів магнітудою 2,0 і більше за глибиною на обраній ділянці на північно-східному краї Сибірського блока з 1990 по 2024 р. База даних: ISC.

Окремо розглянемо групу землетрусів у південно-східному напрямку від п-ва Таймир (Рис. 57).

У 2019–2020 роках тут також спостерігався сплеск сейсмічної активності малих і середніх магнітуд (Рис. 58, 59).

Землетруси M2+ на північний схід від півострова Таймир



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

Рис. 57

Карта поширення землетрусів магнітудою від 2,0 на обраній ділянці на північний схід від півострова Таймир з 1990 по 2024 р. База даних: ISC.

Землетруси M3+ на північний схід від півострова Таймир

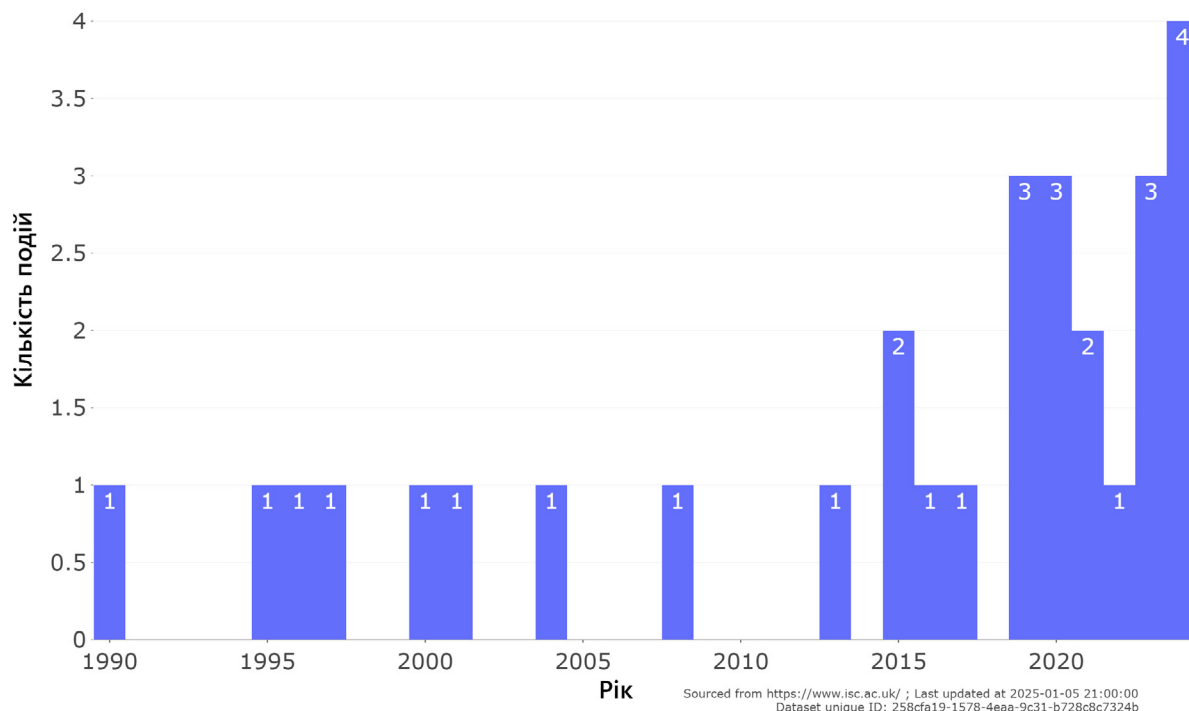


Рис. 58

Графік кількості землетрусів магнітудою 3,0 і більше на обраній ділянці на північний схід від півострова Таймир. База даних: ISC.

Землетруси M2+ на північний схід від півострова Таймир

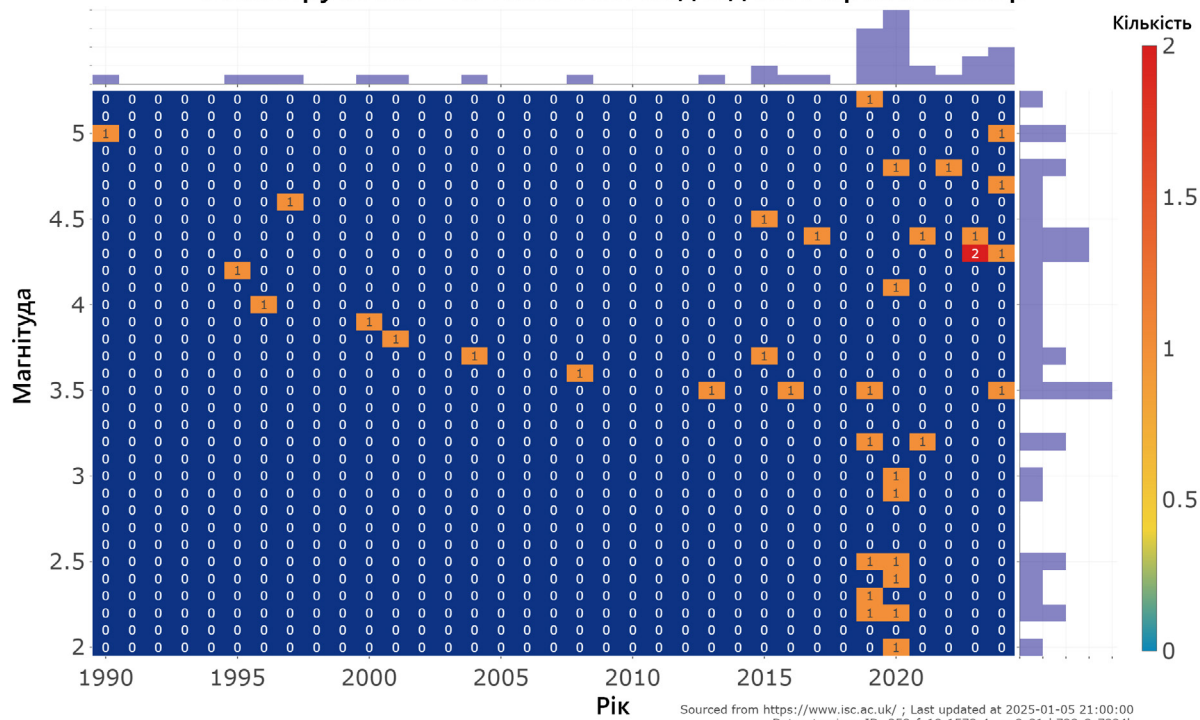


Рис. 59

Розподіл кількості землетрусів за магнітудою на обраній ділянці на північний схід від півострова Таймир з 1990 по 2024 р. База даних: ISC.

Землетруси М3+ Південна частина Східного Сибіру

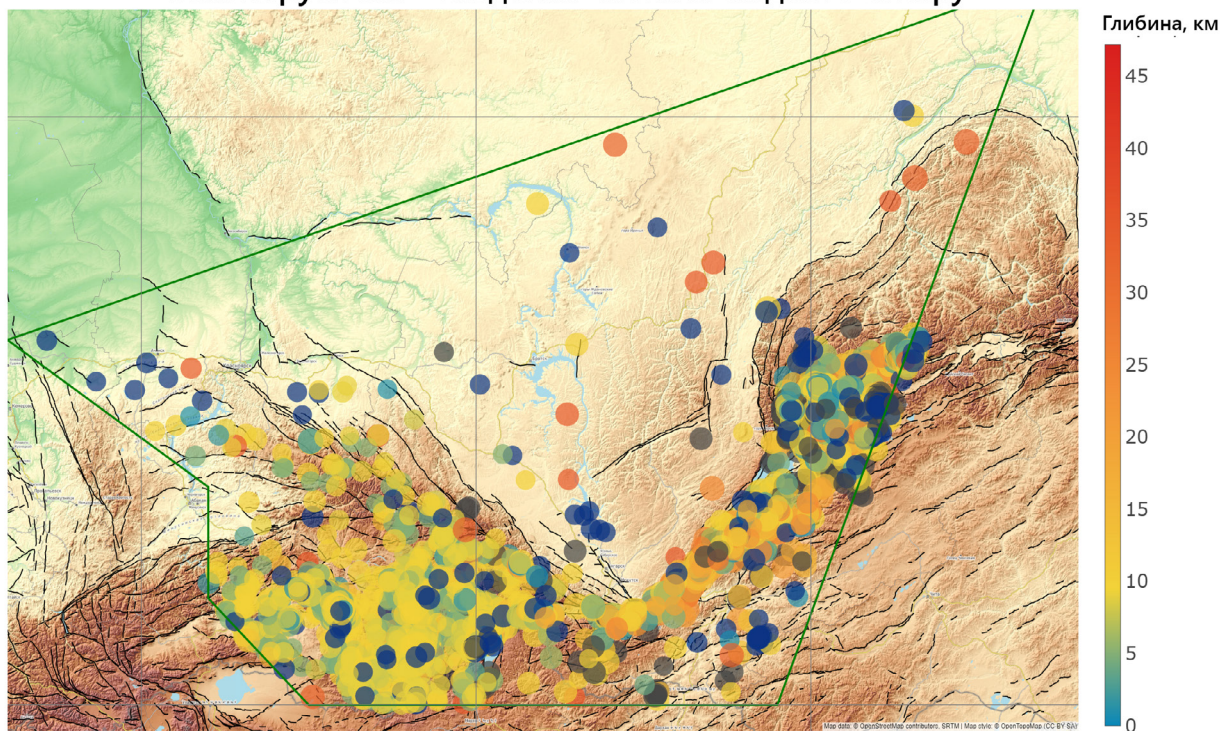


Рис. 61

Карта місцезнаходжень епіцентрів землетрусів магнітудою 3,0 і вище, зафіксованих з 1990 по 2024 р. в обраному полігоні в південній частині Східного Сибіру. База даних: ISC.

Землетруси М3+ Південна частина Східного Сибіру

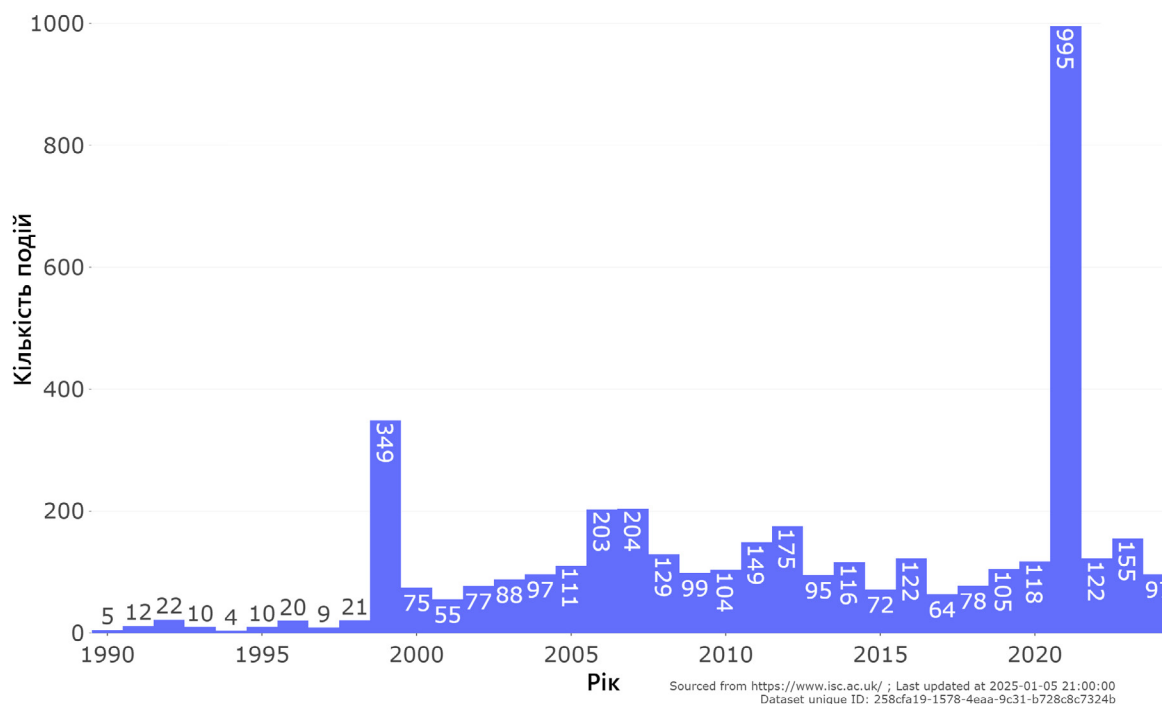


Рис. 62

Кількість землетрусів магнітудою від 3,0 і вище на території південної частини Східного Сибіру. База даних: ISC.

Землетруси М3+ Південна частина Східного Сибіру

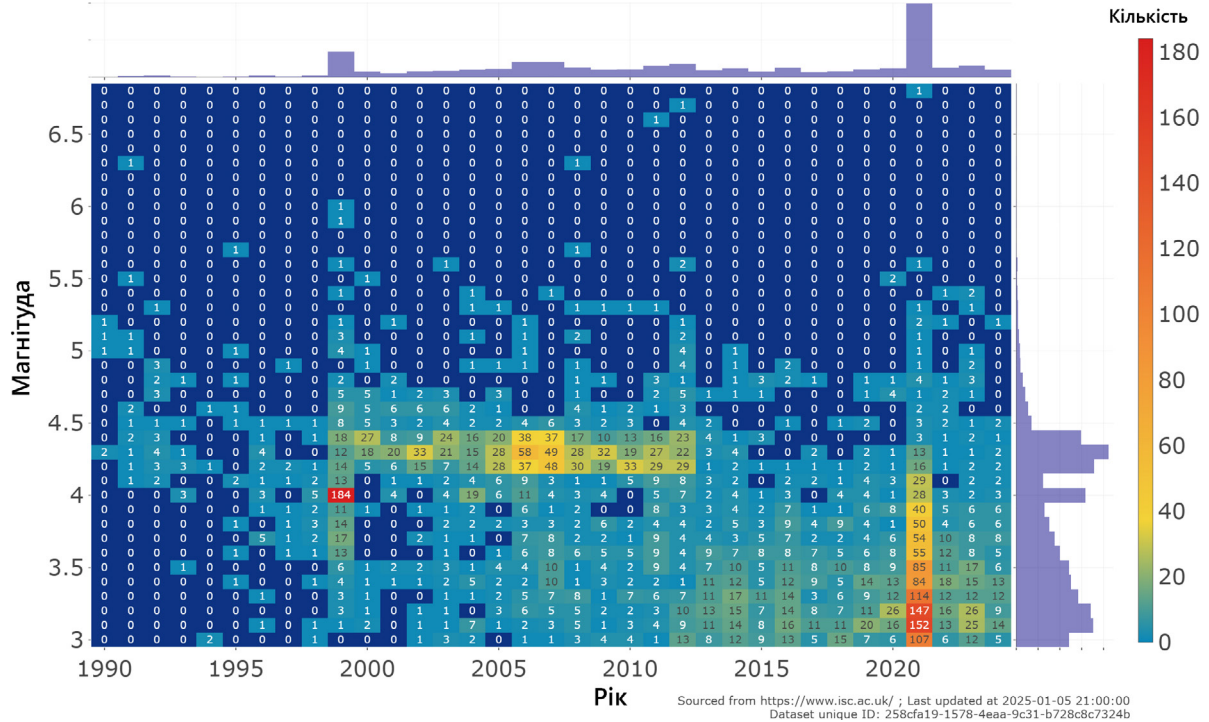


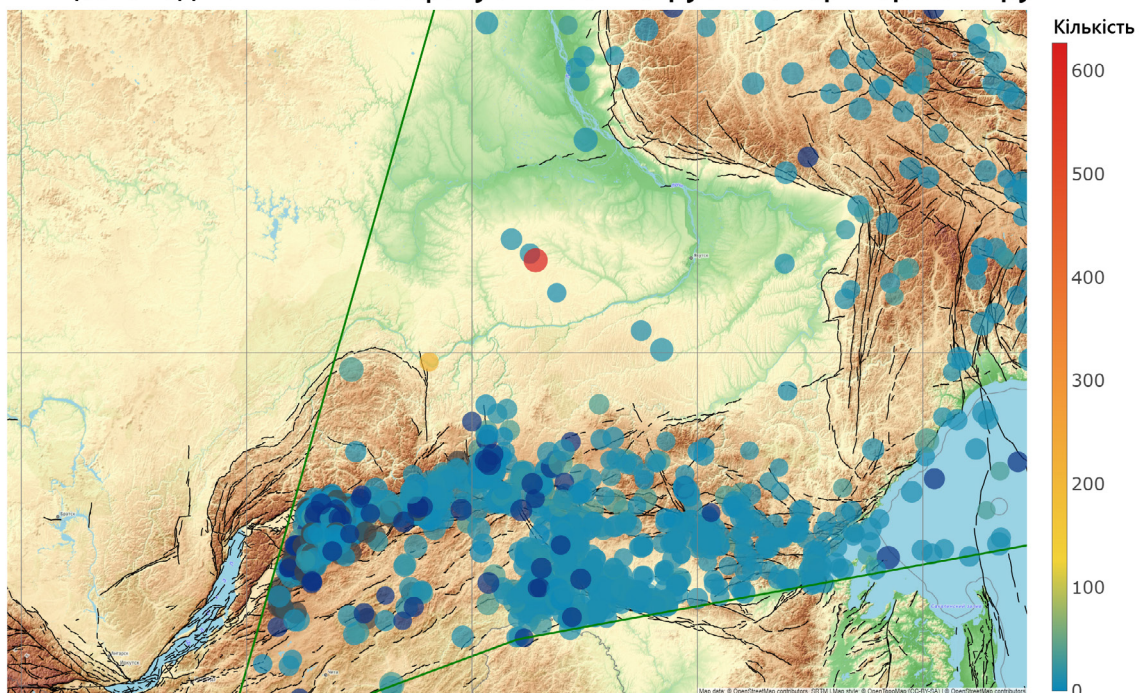
Рис. 63

Розподіл землетрусів в обраному полігоні в південній частині Східного Сибіру за магнітудою з 1990 по 2024 р. База даних: ISC.

Важливо відзначити виникнення під Сибірським кратоном мантийних землетрусів. Ще 1998 року зафіксовано землетрус магнітудою 3,3 на глибині 211 км в межах Вілюйської синеклізи. Це стало несподіваним фактом, але набагато більш унікальна подія — це землетрус значною магнітудою 5,1 вже на глибині 627 км у 2023 році в тому самому регіоні (Рис. 64). Сам собою прояв глибокофокусної сейсмічності під платформним стійким блоком земної кори є унікальною подією. Традиційно припускають, що такі внутрішньомантийні землетруси відбуваються через так звані зони субдукції, проте найближча така зона розташована далеко звідси, за тисячу кілометрів, і не може впливати. Автори доповіді вважають, що причинами глибокофокусних землетрусів є внутрішньомантийні вибухи

величезної потужності, які відбуваються під час зіткнення відносно гарячих потоків магми з відносно холоднішими потоками. Згідно з сейсмотомографічною моделлю, у місці виникнення обох глибокофокусних землетрусів спостерігаються аномалії швидкостей сейсмічних хвиль, які відповідають відносно в'язкішим і рідкішим потокам, що також може характеризувати їхню температуру. Таким чином, ці два мантийні землетруси проявилися в місцях зіткнення відносно холодних і відносно гарячих мантийних потоків (Рис. 65), що спричинило викиди великої кількості енергії, які викликали акустичні хвилі й зафіксовані сейсмодатчиками як землетруси. Це однозначно вказує на значну активність мантийних потоків у цьому місці.

Місцезнаходження глибокофокусних землетрусів на території Сибіру



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

Рис. 64

На карті позначений епіцентр глибокофокусного землетрусу $M_{5,1}$ на глибині 627 км (червоний маркер) під Сибірською платформою у 2023 році та $M_{3,3}$ на глибині 211 км у 1998 році (жовтий маркер).

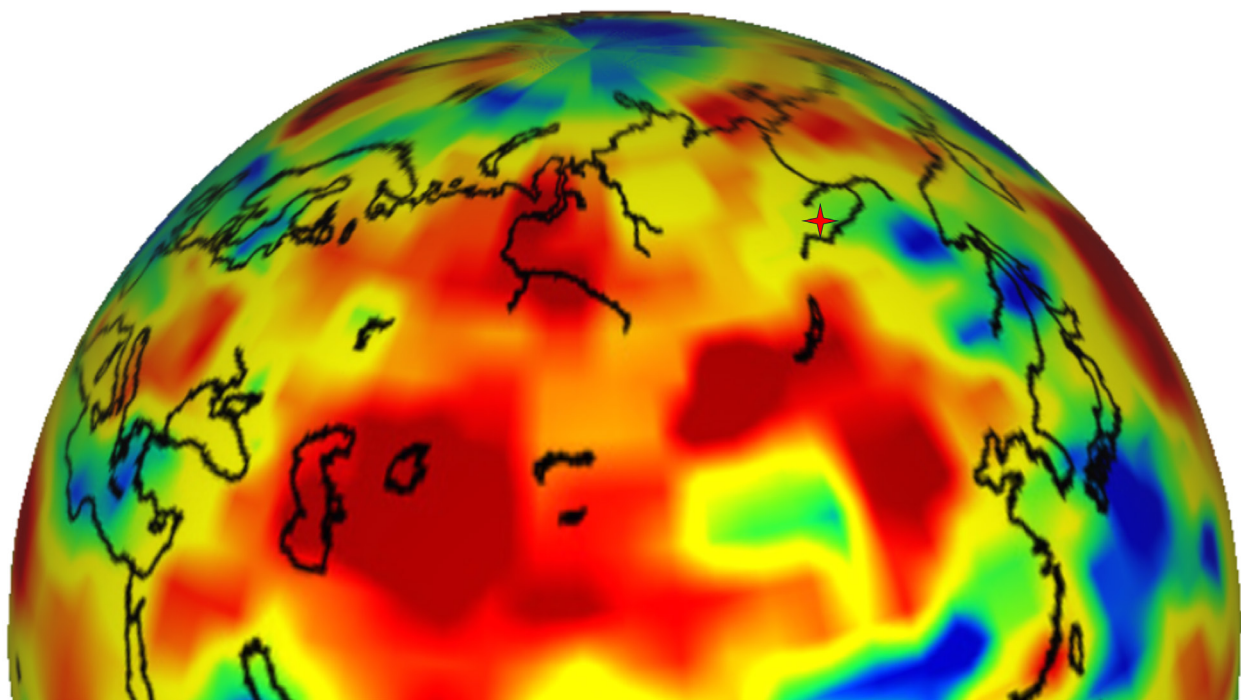


Рис. 65

Зони знижених швидкостей проходження сейсмічних хвиль у мантії на глибині близько 600 км. Гіпоцентр землетрусу $M_{5,1}$ 2023 року потрапляє в зону зіткнення відносно гарячих і відносно холодних областей мантії. Джерело: <https://members.elsi.jp/~hiroki.ichikawa/gst/gallery/gallery.html>

Коливання крайових частин Сибірського блока викликає зростання сейсмічної активності в Уральському регіоні. Дані для аналізу були відфільтровані з урахуванням гірських ударів під час гірничодобувної

діяльності. Так само обрано магнітуду від 3,5, щоб точно гарантувати виключення подій, пов'язаних із діяльністю людини (Рис. 66, 67). Тому хвилеподібне зростання сейсмічності відображає природні процеси.

Землетруси М3,5+ на Уралі

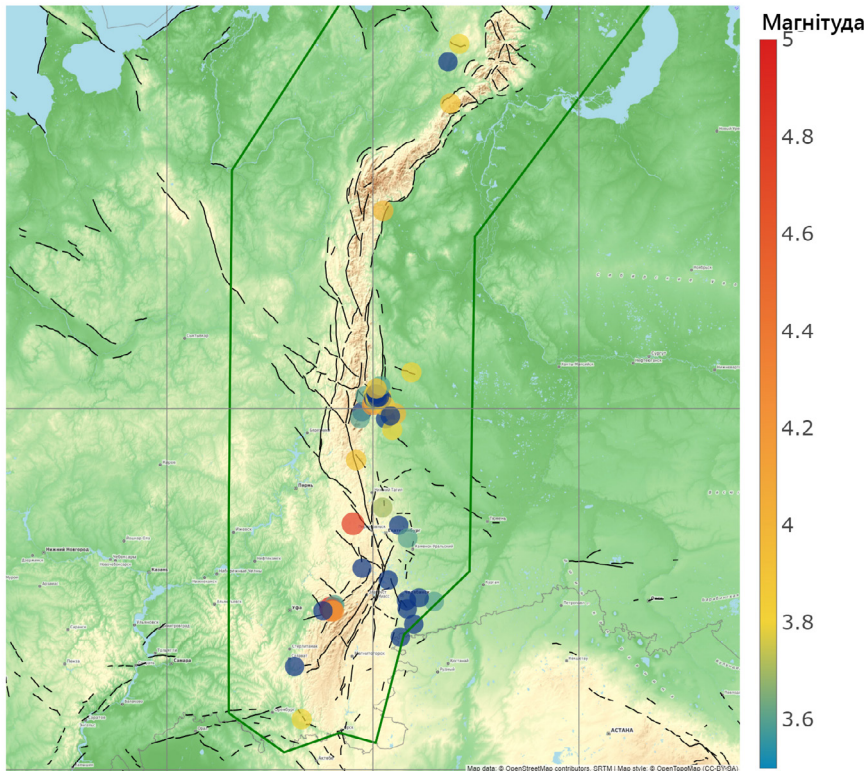
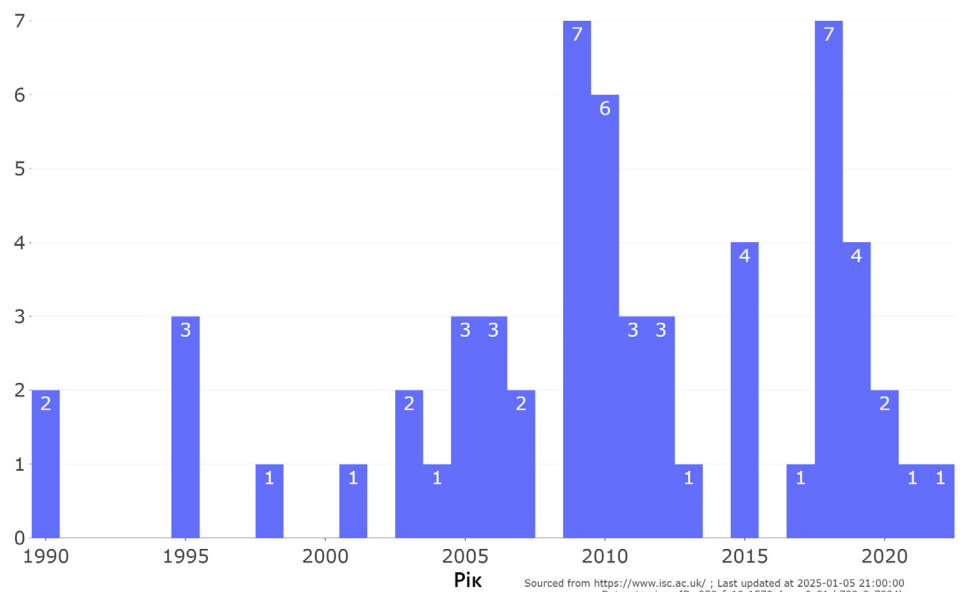


Рис. 66
Карта розташування епіцентрів землетрусів магнітудою від 3,5 і вище, зафіксованих в Уральському регіоні з 1990 по 2022 р.

Рік
:ac.uk/ ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
e ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

Землетруси М3,5+ на Уралі

Рис. 67
Кількість землетрусів магнітудою від 3,5 і вище, зафіксованих в Уральському регіоні з 1990 по 2022 р.



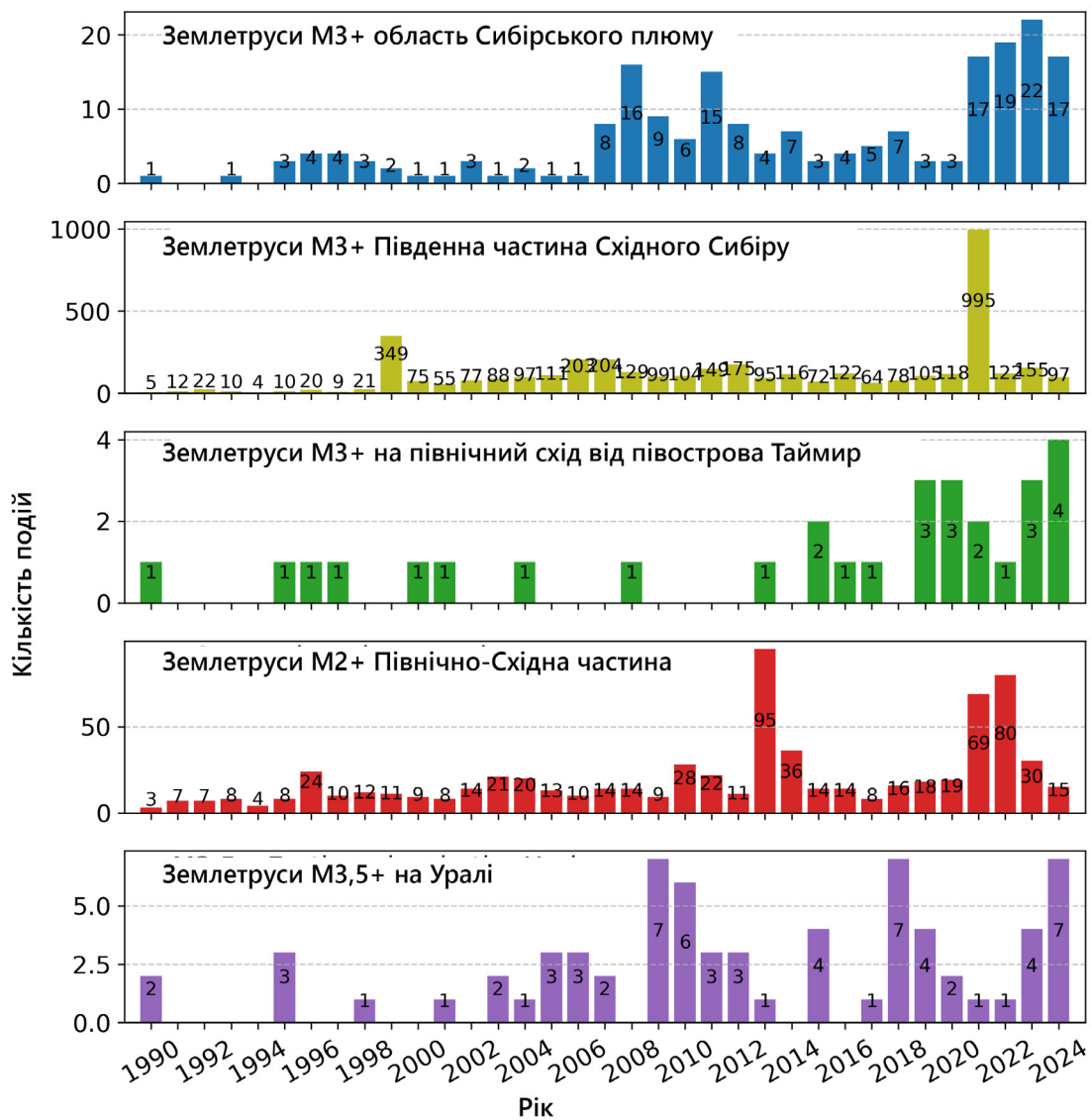


Рис. 69

Розподіл піків сейсмічної активності у Верхоянському регіоні (східніше Сибірської платформи), південній частині Східного Сибіру, на Уралі (західніше Сибірської плити) та в центральній частині Сибіру (включно із Західно-Сибірською плитою та Східно-Сибірською платформою) за роками. Землетруси магнітудою від 3,0 і вище. База даних: ISC.

Розглянемо прояви лісових пожеж у деяких регіонах. Збільшення площі пожеж у регіоні свідчить про зростання активності надр, оскільки пожежі часто виникають у зонах розломів, де відбувається вихід горючих газів. Такі пожежі важко загасити і вони надзвичайно швидко поширюються на великі території. В Уральському регіоні спостерігається

різке зростання площі природних пожеж, починаючи з 2020 року (Рис. 70). Графік складено на основі даних Федерального агентства лісового господарства «Авіалісоохорона».

Площа пожеж у Далекосхідному регіоні також зростає експоненційно, що чітко видно з графіку (Рис. 71).

Уральський федеральний округ

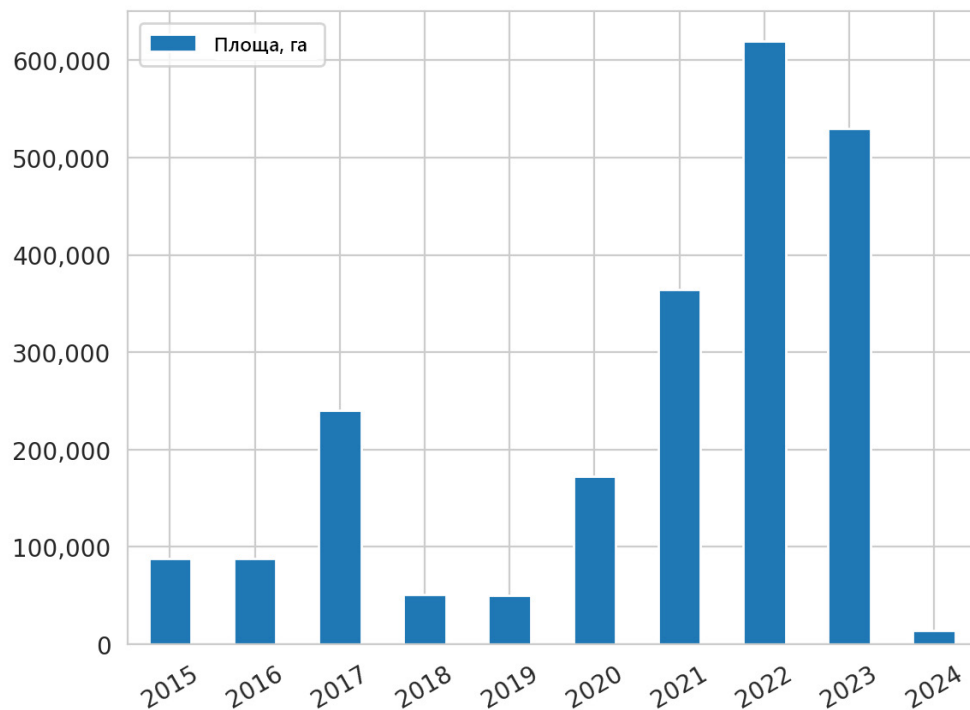


Рис. 70

Зростання площі поширення пожеж в Уральському регіоні за даними Федерального агентства лісового господарства ФБУ «Авіалісоохорона» (дані за 2024 рік неповні).

Далекосхідний регіон

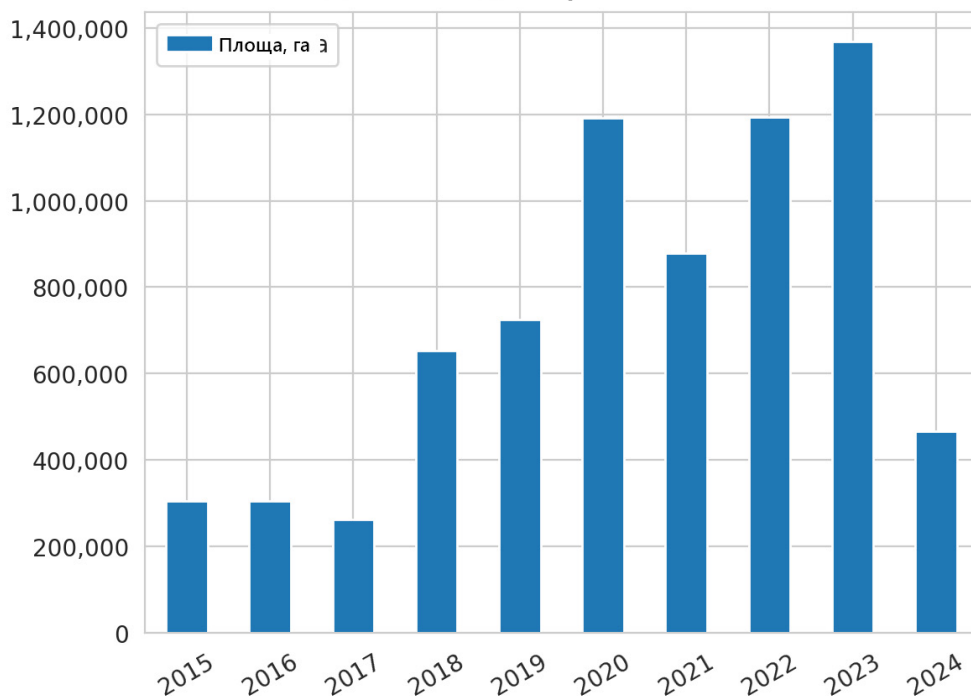


Рис. 71

Площа поширення пожеж на Далекому Сході: графік включає дані Хабаровського краю, Камчатського краю, Магаданської області, Чукотського автономного округу, Сахалінської області, Приморського краю, за даними Федерального агентства лісового господарства ФБУ «Авіалісоохорона» (дані за 2024 рік неповні).

Аналогічні процеси наростання пожеж відбуваються і з іншого боку Сибірського і Далекосхідного блока земної кори на кордоні з Тихоокеанською плитою.

Передбачається, що проникнення Сибірського плюму також впливає і на Курило-Камчатський регіон, як на область закінчення континентального блоку кори, що знаходиться під тиском плюму. Аналіз масиву сейсмічних даних у районі Камчатки та Курильських островів показує помітне

зростання кількості землетрусів магнітудою від 4,0 і вище (Рис. 72, 73). Регіон входить до Тихоокеанського вогняного кільця (Рис. 74), і, відповідно, демонструє тенденцію до зростання сейсмічності, відповідно до характеристик цієї тектонічної структури. Проте більшість сплесків сейсмічності мають незалежний характер. Це може вказувати на те, що Сибірський плюм має власний вплив на регіон Камчатки і Курильських островів.

Щільність землетрусів M4+ в районі півострова Камчатка та Курильських островів

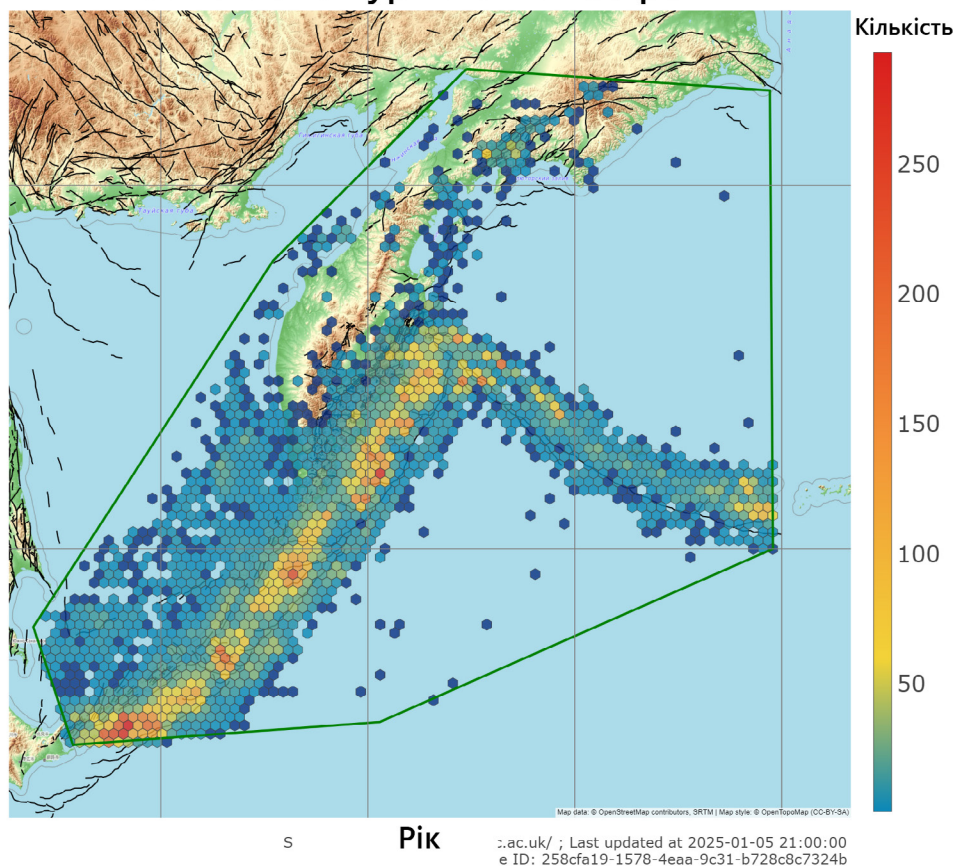


Рис. 72

Щільність землетрусів магнітудою від M4+ в межах півострова Камчатка і Курильських островів 1979–2024 рр. База даних: ISC.

Землетруси M4+ в районі півострова Камчатка та Курильських островів

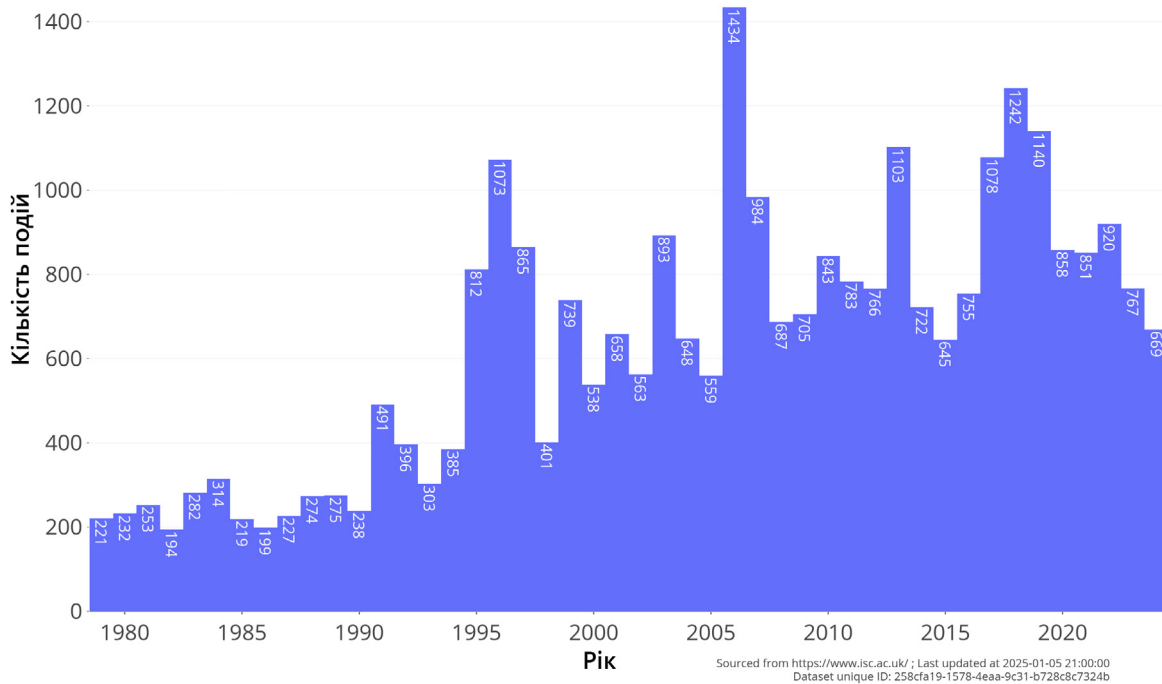


Рис. 73

Зростання кількості землетрусів магнітудою 4,0 і вище в межах п-ва Камчатка і Курильських островів 1979–2024 рр. База даних: ISC.

Землетруси в області вогняного кільця M4+ 1979–2022

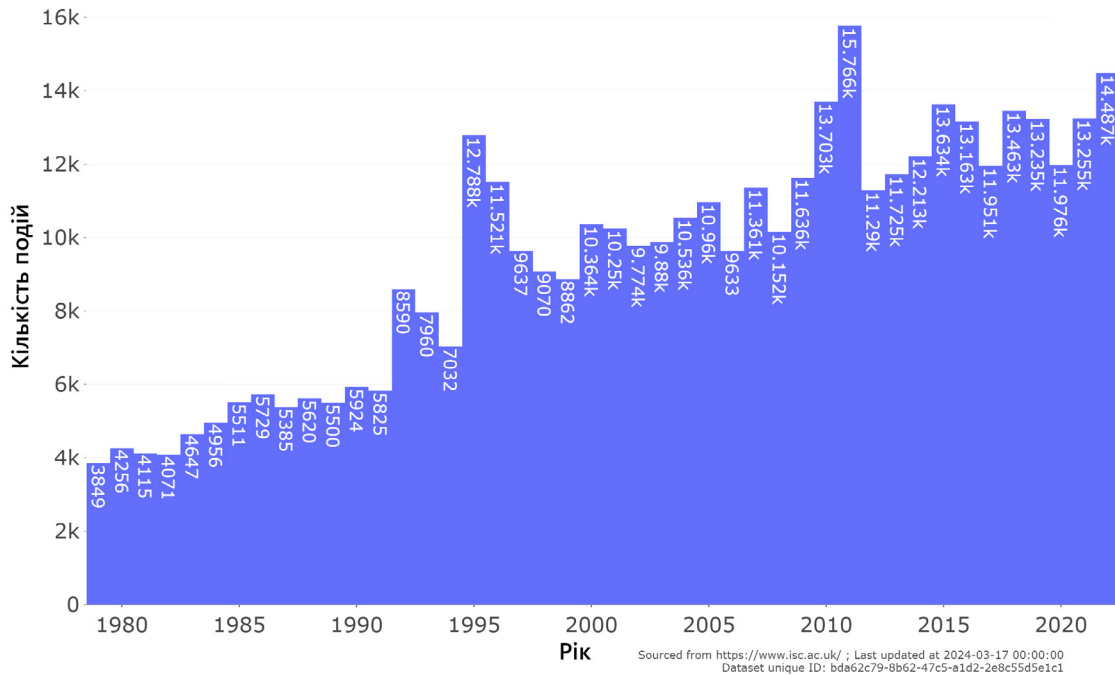
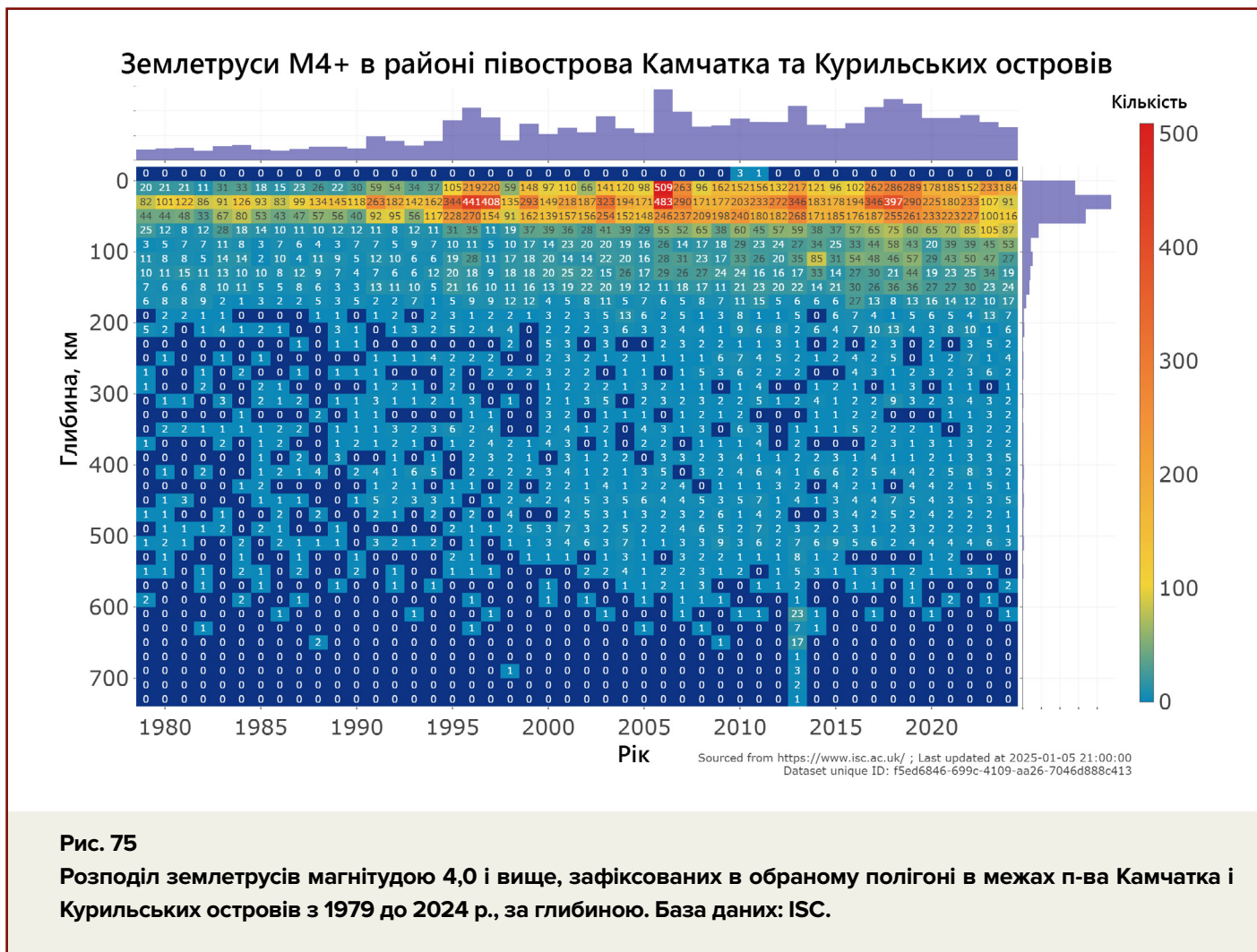


Рис. 74

Зростання кількості землетрусів магнітудою 4,0 і вище в зоні вогняного кільця 1979–2022 рр. База даних: ISC.

Варто зазначити, що також спостерігається зростання глибини землетрусів (Рис. 75). Це вказує на те, що стик літосферних плит стає більш рухливим через вплив Сибірського магматичного пюму. Очікується збільшення активності вулканів Курило-Камчатського

регіону, а також поява аномалій швидкого підйому глибинної магми, швидкої зміни складу під час вивержень вулканів на більш глибинні мафічні магми. Схожу зміну складу на більш глибинний продемонстрував вулкан Безіменний під час виверження 2017 року⁴⁵.



Зростання сейсмічної активності не тільки в Сибіру, але особливо по краях Західно-Сибірської плити і Східно-Сибірського кратону вказує на те, що підйом плити внаслідок тиску на неї знизу магматичним

пюмом уже почався. Це вказує на масштабний і значний вплив магматичного пюму на плиту.

⁴⁵V.O. Davydova, V.D. Shcherbakov, P.Yu. Plechov, I.Yu. Koulakov, Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezimianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 421, 2022, 107422, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107422>

Традиційні моделі припускали, що мантійні плюми під час підйому і нагрівання повинні створювати істотне підняття поверхні висотою до 2 км до моменту прориву магми. Геологічні свідчення такого драматичного підняття в зоні Сибірських трапів, що сформувалися в результаті впровадження магматичного плюму 250 млн років тому, відсутні.

На основі вивчення магматичних порід Сибірських трапів учені з інститутів Росії,

Німеччини та Франції встановили⁴⁶, що замість підйому у вигляді бульбашки плюму поступово еродував літосферу знизу (Рис. 76). Коли ерозія в зоні контакту між розплавленим матеріалом плюму і породами верхньої мантії досягла глибини 50 км, то в цей момент почалися масштабні виливи і виверження лави на поверхні.

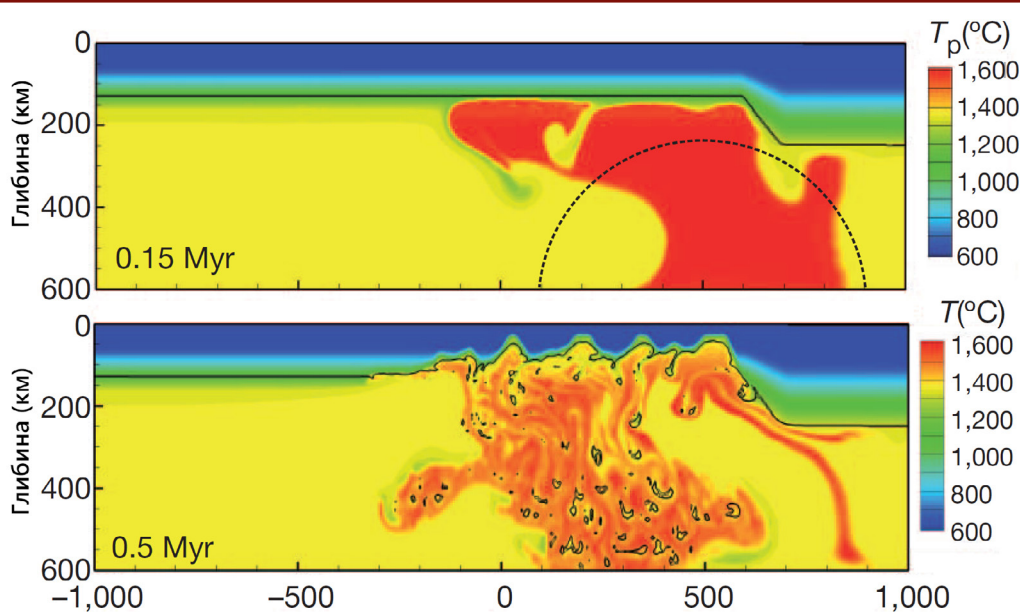


Рис. 76 Реконструкція початкових етапів утворення сибірських трапів.

По вертикальній осі — глибина (км). Різними кольорами показано температуру порід. Початкове положення вершини мантійного плюму показано пунктирним півколом. Плюм підходить до нижньої межі літосфери (суцільна чорна лінія) і «розтікається» під нею.

Знизу: вершина плюму внаслідок ерозії (видно уламки літосфери, що занурюються в надра) проклала собі шлях крізь верхню мантію до земної кори. Це відповідає початку основної фази трапового магматизму.

Джерело: Stephan V. Sobolev, Alexander V. Sobolev, Dmitry V. Kuzmin, Nadezhda A. Krivolutskaya, Alexey G. Petrunin, Nicholas T. Arndt, Viktor A. Radko, Yuri R. Vasiliev. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes // Nature. 2011. V. 477. P. 312–316.

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

Сучасна активність плюму, ймовірно, наслідує той самий механізм. Тому значного підйому поверхні тільки в одному місці при впровадженні голови плюму не очікується, але цей механізм не виключає масштабного регіонального підйому всієї Східно-Сибірської платформи на деяку невелику величину. Однак, згідно з тектонофізичним моделюванням, навіть цього підйому буде достатньо для прориву магми, що виведе розплав назовні під

високим тиском, що призведе до величезної катастрофи.

Місце ймовірного центру голови плюму — територія північніше плато Путорана, близько 225 км на північний схід від Норильська. Також прориви будуть охоплювати і всю Західно-Сибірську тонку плиту, де розійдуться старі шви — рифти і глибокі розломи в земній корі.



Обґрунтування неминучості виверження Сибірського плюму

Причини, через які прорив магми сучасного Сибірського плюму мають високі ризики в поточний період часу, пов'язані з такими умовами. Останні 30 років на Землі спостерігалось поступове наростання геофізичних аномалій, які були прямим наслідком зовнішнього впливу, що збільшує теплову енергію в межах ядра планети. Однак поточна ситуація кардинально відрізняється від попереднього періоду — наприкінці 2024 року планета входить у фазу підвищеного енергетичного впливу на ядро планети. І, виходячи з розрахунків, до 2030 року ми наблизимося до максимальної фази.

Критичним фактором, що погіршує ситуацію, стало глобальне забруднення океану внаслідок антропогенного чинника, зокрема вуглеводнями, мікро- і нанопластиком. Цей антропогенний фактор істотно змінив теплопровідні властивості океанічної води, порушивши її здатність ефективно відводити тепло з надр Землі. Океан, який історично слугував головним терморегулятором планети, втратив значну частину своєї теплопровідної функції. У результаті цього відбувається аномальна акумуляція теплової енергії в мантії, що призводить до її інтенсивного плавлення більше, ніж будь-коли в історії Землі.

Геофізичні дослідження показують безпрецедентне зростання кількості глибокофокусних землетрусів, які є прямим індикатором активного плавлення мантії.

Розплавлена магма, збільшуючись в об'ємі, створює колосальний тиск на земну кору. Цей процес можна порівняти з поступовим надуванням повітряної кулі — в якийсь момент тиск перевищить межу міцності оболонки.

Сибірський регіон особливо вразливий до цих процесів через специфічну геологічну структуру, бо саме тут піднімається потужний магматичний плюм — висхідний потік розплавленої речовини мантії, спровокований зміщенням ядра в цьому напрямку в 1997–1998 рр. Зростання температурних аномалій у Сибіру показує, що обсяг магми під Сибірським кратоном продовжує збільшуватися в геометричній прогресії. На основі геологічних даних і сучасних спостережень можна з високою часткою впевненості стверджувати, що Сибірський плюм перебуває в критичній фазі готовності до виверження.

Особливу занепокоєність викликає той факт, що одночасно з Сибірським плюмом критична ситуація складається в зоні Маріанської западини. Це найглибша точка океанічного дна, де кора найтонша і найвразливіша. Тут також спостерігається підйом розпеченої магми, і як наслідок цього спостерігається також істотний приріст сейсмічної активності. Існує реальна загроза розриву океанічного дна і сценарію загибелі планети.

Сценарій розвитку подій може піти двома шляхами. Перший — це прорив Сибірського плюму, який може статися в будь-який момент через зростаючий тиск магми. Другий — розрив у Маріанській западині, який може передувати сибірській катастрофі. Сибірський плюм не вибухне тільки в тому випадку, якщо першою вибухне Маріанська западина. Геологічна історія Марса показує нам можливі наслідки такого сценарію — западина Марінер залишається німим свідком подібної катастрофи, коли прорив плюму під океаном призвів до глобальних наслідків для всієї планети.

Згідно з розрахунками, що враховують поточні тренди зростання геофізичної активності, критична точка прориву Маріанської западини може бути досягнута до 2036 року. Однак важливо розуміти, що цей термін умовний. Земна кора в Сибіру

може не витримати зростаючого тиску значно раніше. За поточного розвитку подій прорив Сибірського плюму або розрив у Маріанській западині видається неминучим наслідком процесів, що відбуваються в надрах Землі. Єдина невизначеність полягає в точному часі та місці катастрофи, але не в самому факті її наближення.

Далі розглянемо три сценарії розвитку подій ситуації з Сибірським плюмом. Перший — відбудеться раптовий одноразовий прорив Сибірського плюму. Другий сценарій — відбудуться повільні та поступові виверження лави в Сибіру, подібно до формування Сибірських трапів. І третій сценарій — у разі, якщо людство вживає необхідних заходів щодо дегазації вторинних магматичних осередків Сибірського плюму в земній корі.

Сценарій 1.

Одномоментне виверження Сибірського плюму

Для того щоб оцінити потенційні збитки від одномоментного виверження Сибірського плюму, можна вдатися до порівняльного аналізу історичних геологічних подій. Однак варто врахувати, що подібних умов, які існують наразі на Землі, а саме збігу найсильнішого циклу 24 000 років і антропогенного забруднення «основної охолоджувальної системи планети» — океану — не існувало ще ніколи. Саме з цієї причини одномоментний прорив Сибірського плюму розглядають як найімовірнішу подію, якщо людство не зробить жодних кроків щодо зниження ризиків цього прориву.

Для оцінки потужності вивержень вулканів використовують обсяг викинутого матеріалу. Так, наприклад, під час одного з найсильніших вивержень супервулкану Єллоустоуна 2,1 мільйона років тому об'єм викинутої магми становив 2 500 км³, що було встановлено з вивчення відкладень туфів у Північній Америці⁴⁷. Під час цього виверження викиди попелу і газів піднялися на висоту 50 км, досягнувши

верхньої межі стратосфери. За масштабом це виверження можна було порівняти з виверженням супервулкану Тоба на острові Суматра, що сталося близько 72–74 тисяч років тому, яке було найсильнішим виверженням за останні 25 млн років.

Під час вивержень Сибірських трапів близько 250 млн років тому об'єм викинутого матеріалу склав, за різними оцінками, від 3 до 4 мільйонів км³ лав і туфів⁴⁸ (Рис. 77). Тобто виверження Сибірських трапів було в 1000 разів більшим за об'ємом викинутого матеріалу, ніж найсильніше виверження Єллоустоунської кальдери або супервулкану Тоба. **Таким чином, з огляду на одномоментний характер потенційного виверження Сибірського плюму, його активація може призвести до виверження, потужність якого в 1000 разів перевищить відомі історичні події, такі як виверження Єллоустонської кальдери або супервулкану Тоба.**

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

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>

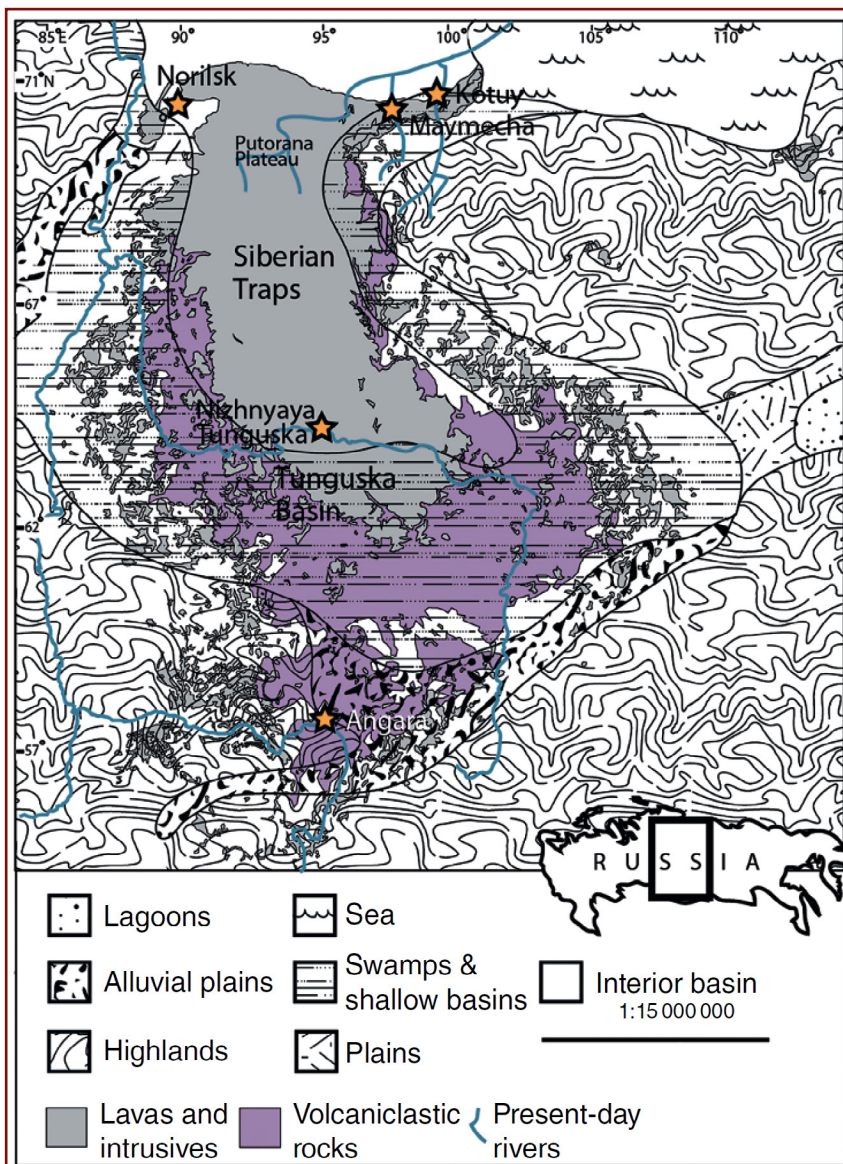


Рис. 77
Карта палеогеографії Сибірських трапів, що показує масштаби основних вулканокластичних виходів і місцевостей. За даними Малича та ін. (1974), Полозова та ін. (2010), Блек та ін. (2015), з пізньопермською палеогеографією спрощено з Czamanske et al. (1998).

Джерело: Black, B., Mittal, T., Lingo, F., Walowski, K. & Hernandez, A. Assessing the Environmental Consequences of the Generation and Alteration of Mafic Volcaniclastic Deposits During Large Igneous Province Emplacement. in Geophysical Monograph Series (eds. Ernst, R. E., Dickson, A. J. & Bekker, A.) 117–131 (Wiley, 2021).

<https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch5>

Вважається, що якщо станеться одномоментний прорив Сибірського плюму, то виверження матиме експлозивний, тобто вибуховий характер, і утворить єдину кальдеру. Згідно з гіпотезою, очікується, що кальдера від прориву Сибірського плюму матиме площу

75 000 км², область такою площею матиме радіус 150 км (або, наприклад, 380 км на 250 км). Під час виверження Сибірських трапів 250 млн років тому площа залитої лавою території, за літературними даними⁴⁹, становила від 4 до 7 мільйонів км² ⁵⁰. Аналогічних територій можуть торкнутися виверження і цього разу.

⁴⁹Fedorenko, 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>

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

Уявлення, що лавові потоки становлять найбільшу загрозу серед вулканічних явищ, хибне, і насправді попіл часто стає основною причиною смертельних наслідків. Для супервулканів, що характеризуються високою вибухонебезпечністю, значна частина магми не встигає перетворитися на лаву. Натомість вона фрагментується під час вибуху, утворюючи величезну кількість найдрібніших часток вулканічного попелу — розпечених уламків гострих і зазубрених гірських порід, що розносяться в атмосфері. При вдиханні цей попіл утворює цементоподібну суміш у легенях людини, що призводить до неминучої загибелі.

Припускають, що під час виверження Сибірського плюму радіус переміщення такого розпеченого попелу становитиме приблизно 9000 км, тобто покриє площу близько 255 мільйонів км². Оскільки площа всієї поверхні Землі трохи більша за 510 мільйонів км², то радіус ураження попелом, яким не можна буде дихати, охоплюватиме половину планети — ця територія становитиме близько 50 % поверхні Землі.

Таким чином, під час одномоментного прориву Сибірського плюму очікуються три небезпечні для життя радіуси ураження.

Перша (центральна) зона впливу — це область радіусом 150 км із центром у північно-західній частині плато Путорана, де передбачають формування кальдери (Рис. 78). У цю зону потрапляють міста Норильськ, Дудинка і Талнах Красноярського краю. У разі активізації плюму в межах цієї зони відбудеться миттєве руйнування усіх об'єктів через ударну хвилю і розпечені пірокластичні потоки в початковій фазі виверження.

Друга зона впливу (в радіусі 1500 км від центру) — це територія розповсюдження лави і важких вулканічних матеріалів (Рис. 79). Вона буде охоплювати обширні території північного Сибіру, включно з територіями Ямало-Ненецького автономного округу, Таймирського півострова, частини Ханті-Мансійського автономного округу, Півночі Красноярського краю, Західної частини Якутії, Північного сходу європейської частини Росії. У цей радіус потрапляють такі великі міста як Ігарка, Новий Уренгой, Надим, Салехард, Воркута, Нарьян-Мар, Мирний, Когалим, Лісосибірськ, Сургут, Красноярськ, Ханте-Мансійськ, Томськ, Нижньовартовськ. У перші години виверження ця територія зазнає впливу швидкісних (до 700 км/год) потоків розпеченого газу, попелу і лави. Ці потоки знищать усе живе і вкриють територію потужним шаром вулканічних матеріалів, хоронячи під собою міста і природні ресурси.

Третя зона впливу (радіус близько 9000 км) — це область поширення тонкодисперсних пірокластичних матеріалів і вулканічного попелу, охоплюючи приблизно 50 % площі земної поверхні (Рис. 80). На початковому етапі (перша доба після виверження) максимального впливу попелових викидів зазнають території Російської Федерації, континентальної Азії, Європи, Аравійського півострова, північної частини Африканського континенту і Північної Америки. Протягом наступних 7–10 днів прогнозується поширення попелових мас на території Австралійського континенту, Південної Америки та Антарктиди.

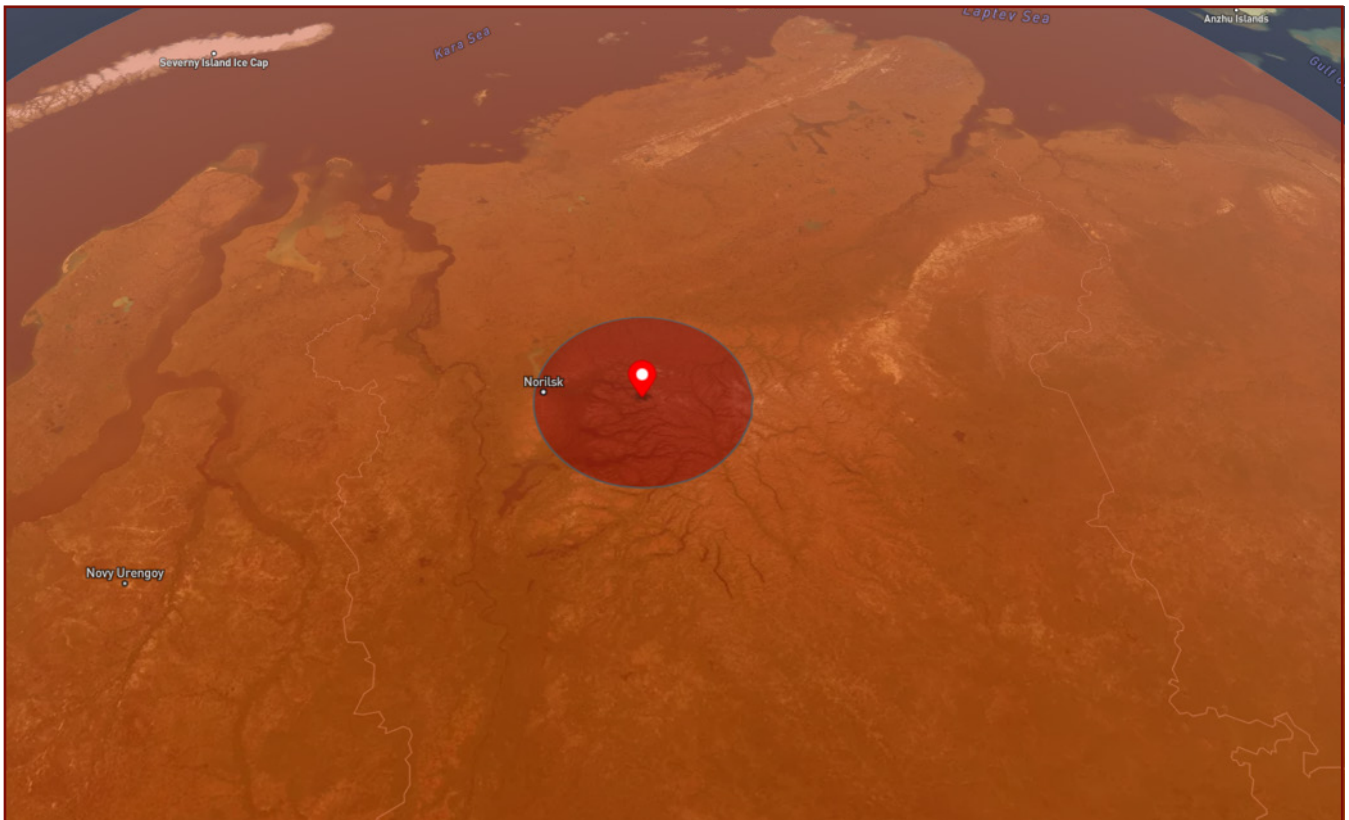


Рис. 78

Червоним показано зону утворення кальдери з приблизним радіусом близько 150 км.

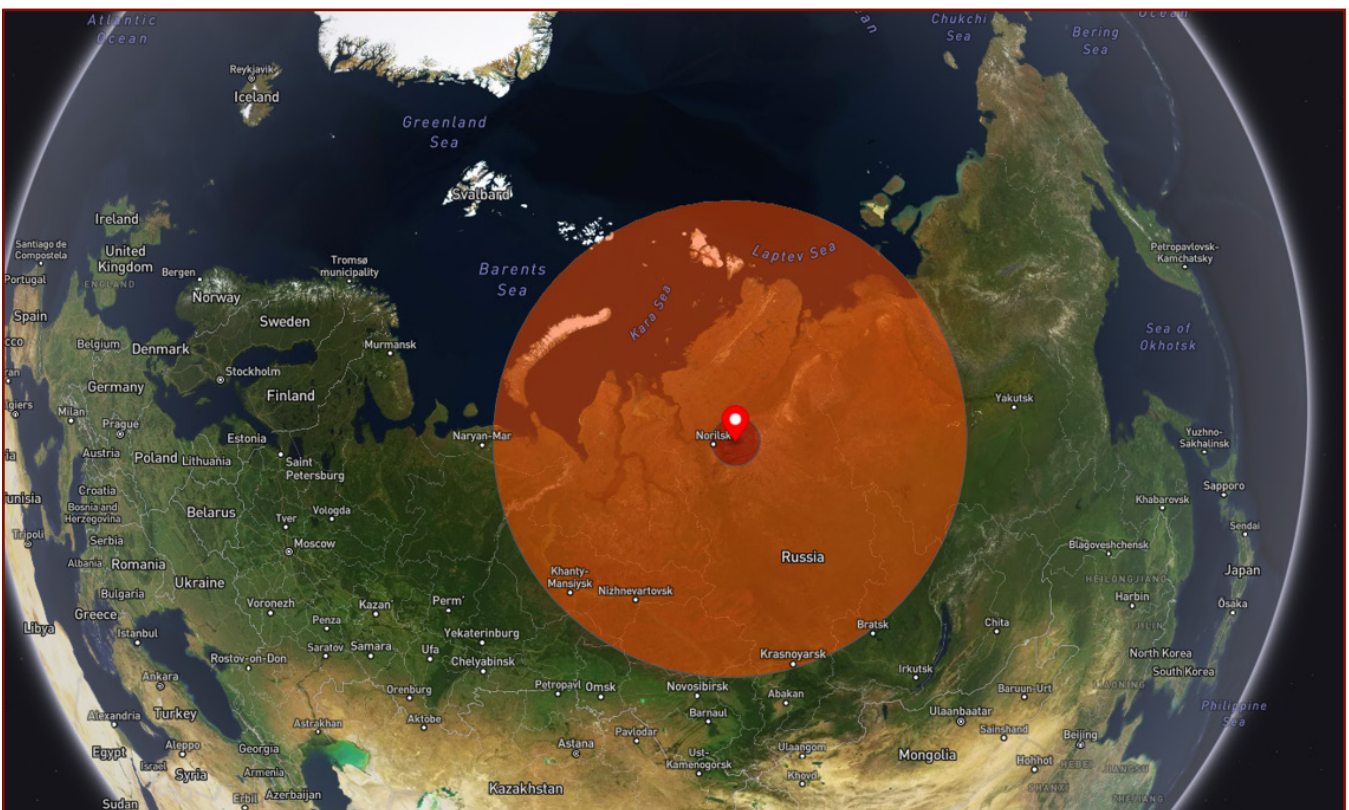
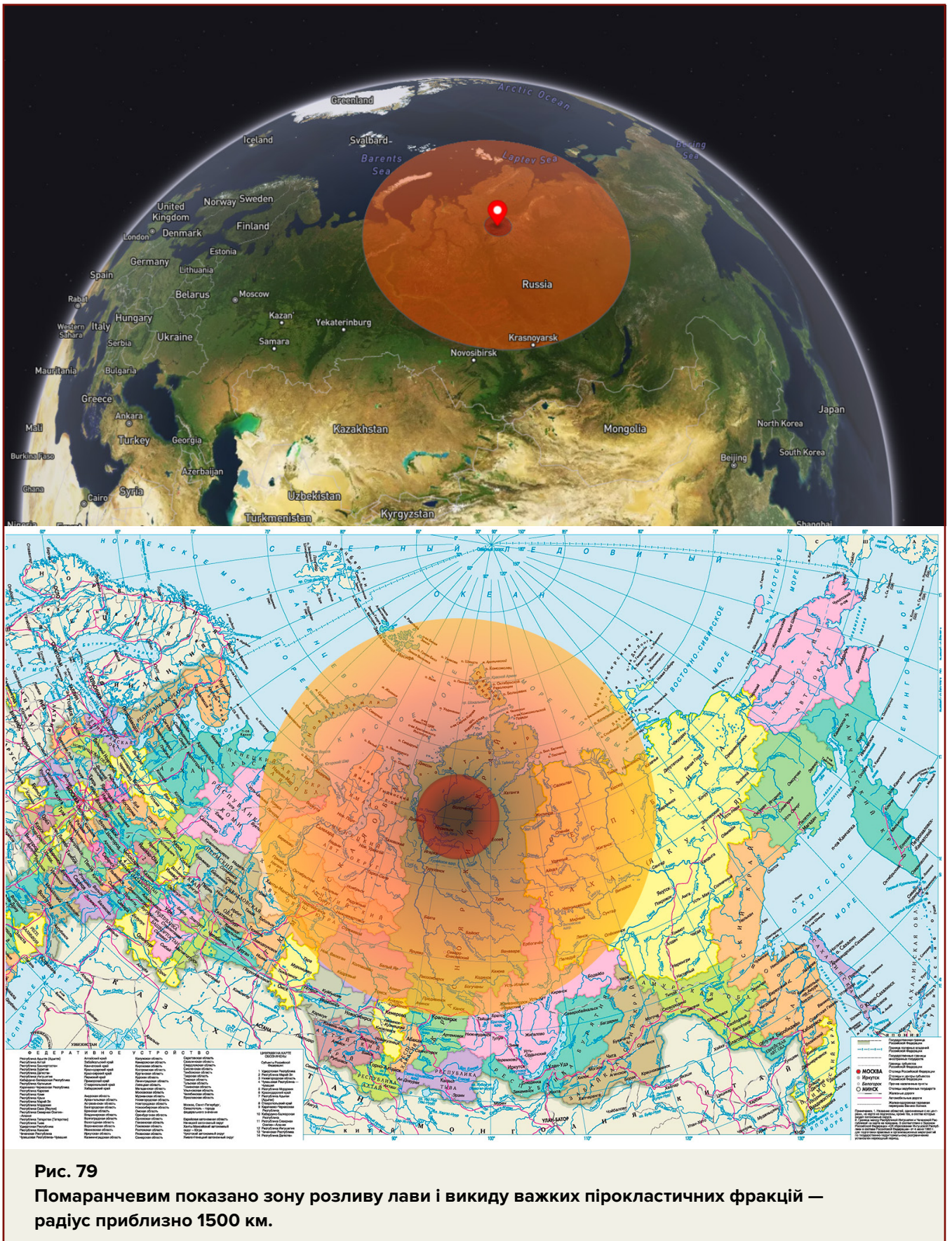


Рис. 79

Помаранчевим показано зону розливу лави і викиду важких пірокластичних фракцій — радіус приблизно 1500 км.



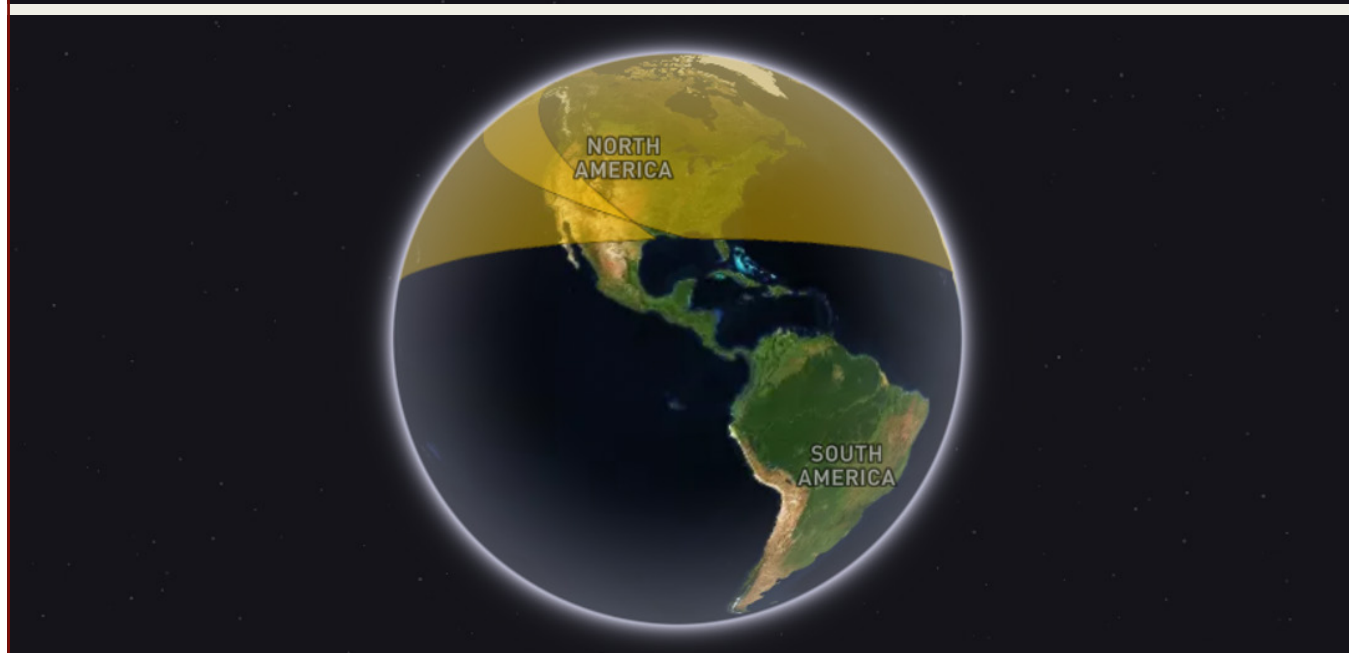
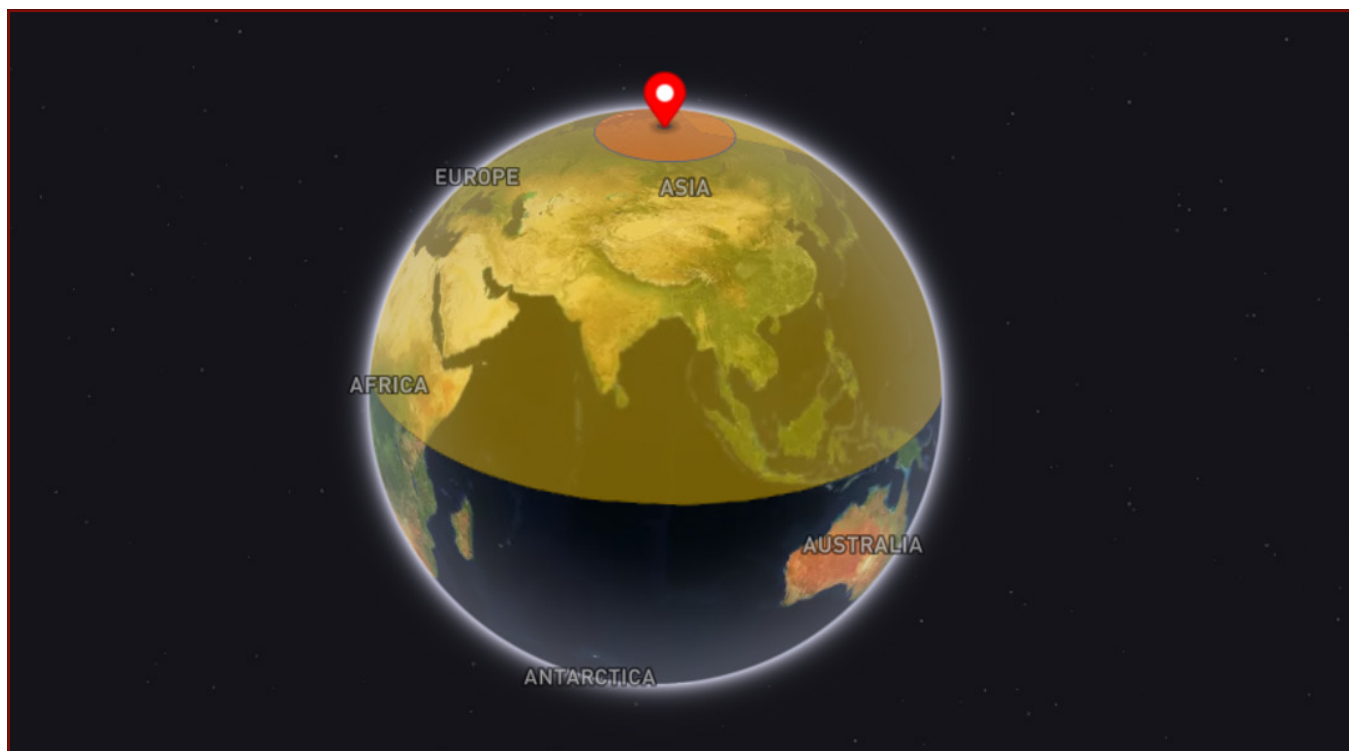


Рис. 80

Жовтим показано область поширення дрібного вулканічного попелу — радіус приблизно 9000 км.



Рис. 80

Жовтим показано область поширення дрібного вулканічного попелу — радіус приблизно 9000 км.

Дослідження геологічних процесів показує, що активізація Сибірського плюму викличе цілу низку додаткових катастрофічних явищ. Очікується поява потужної ударної хвилі, виникнення землетрусів виняткової сили (магнітудою близько 10), утворення руйнівних цунамі та ймовірне пробудження інших найбільших вулканічних систем Землі. Енергія, що виділяється під час виверження, може запустити ланцюгову реакцію, призводячи до

активізації супервулканів і великих вулканічних областей по всій планеті. Ці висновки ґрунтуються на математичних розрахунках енергетичних процесів та їхнього впливу на земну кору.

Далі розглянемо додаткові фактори ризику, які загрожують людству внаслідок одномоментного прориву Сибірського плюму.

Ударна хвиля

За даними з відкритих джерел, виверження Єллоустоунського супервулкану може вивільнити енергію близько 900 000 мегатонн і спричинити землетрус магнітудою 11,2. Оскільки шкала магнітуд логарифмічна (кожне збільшення на одиницю означає зростання енергії в 32 рази), то виверження Сибірського плюму, яке в 1000 разів потужніше за Єллоустоун, може викликати землетрус магнітудою 13,2. Це в 350 000 разів сильніше за найпотужніший зареєстрований землетрус — Великий Чилійський (магнітуда 9,5, 1960 рік), і його можна порівняти з падінням великого астероїда.

Енергія, що виділиться, близько 10^{24} джоулів, створить найпотужнішу ударну хвилю глобального масштабу. У центрі виверження тиск буде настільки високим, що породи миттєво випаруються і будуть викинуті у верхні шари атмосфери. Надзвукова ударна хвиля за лічені хвилини спричинить руйнування на відстані тисяч кілометрів,

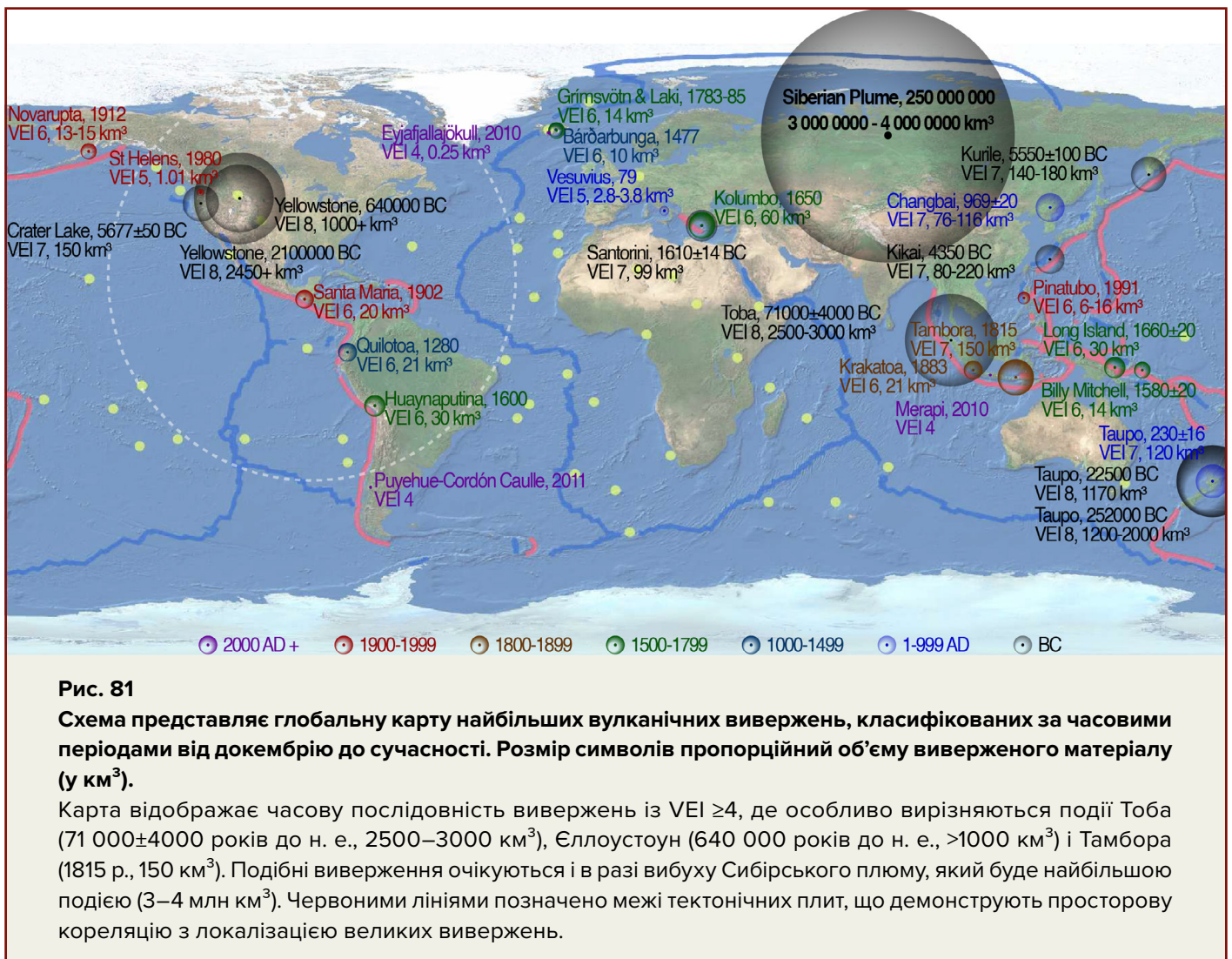
подібно до Тунгуського падіння метеорита, але набагато потужнішого.

У сибірській тайзі виникнуть масштабні пожежі, а величезні території опиняться під товстим шаром вулканічного попелу. Відбудеться швидке танення вічної мерзлоти на тисячі кілометрів, що супроводжуватиметься викидом парникових газів. Ландшафт зазнає масштабних руйнувань з активізацією розломів земної кори. Сейсмічні хвилі пройдуть по всій планеті, викликаючи нові землетруси силою понад 10 балів. У Північному Льодовитому океані виникнуть гігантські цунамі заввишки сотні метрів, що загрожуватимуть узбережжю Росії, Канади, Гренландії та Скандинавії. Вторинні цунамі накриють береги Індонезії, Японії, Австралії, Північної та Південної Америки. Глобальні атмосферні коливання призведуть до утворення надпотужних ураганів і штормів.

Активація супервулканів та вулканічних систем

Сейсмічні хвилі від виверження поширяться не тільки повітрям і поверхнею Землі, а й глибоко в мантію. Оскільки всі супервулкани пов'язані між собою через розплавлені шари мантії, сейсмічні хвилі такої сили від виверження Сибірського плюму, ймовірно, викличуть ланцюгову реакцію вивержень інших супервулканів уже

в першу добу (Рис. 81). Очікується активізація найбільших вулканічних систем, включно з кальдерами Єллоустоун і Лонг-Веллі (Північна Америка), Флегрейськими полями (Апеннінський півострів), Тоба (Зондський архіпелаг), кальдерою Айра (Японські острови) і вулканічним комплексом Таупо (Нова Зеландія).



Крім супервулканів, ймовірно почнуться виверження багатьох вулканів, розташованих уздовж Тихоокеанського вогняного кільця та в інших сейсмічно активних зонах. Висока ймовірність відновлення вулканічної діяльності таких вулканів як Фудзіяма (Японія), Кракатау і Мерапі (Індонезія), Везувій і Етна (Італія), Попокатепетль (Мексика), вулканічних груп Камчатки, Андського та Аляскінського вулканічних поясів, а також підлідних

вулканічних систем Західної Антарктиди. Передбачається реактивація тривало неактивних вулканічних структур, включно зі стратовулканом Арарат (Анатолійське плато), вулканічним масивом Ельбрус (Кавказький регіон), вулканом Лаахер-Зе (Центральна Європа), стратовулканом Кіліманджаро і Ньірагонго (Східно-Африканська рифтова система) та вулканічними центрами Аравійського півострова.

Кислотні дощі

Катастрофічні викиди вулканічного попелу і діоксиду сірки внаслідок виверження призведуть до того, що опади по всій планеті набудуть форми кислотних дощів. Для ілюстрації масштабів викидів можна звернутися до виверження супервулкану Єллоустоун 630 тисяч років тому, коли в атмосферу було викинуто близько 500 мегатонн діоксиду сірки. Масштабуючи ці дані з урахуванням потужності гіпотетичного виверження Сибірського плюму, можна припустити обсяг викидів діоксиду сірки близько 1 500 000 мегатонн (або $1,5 \times 10^{12}$ тонн), що перевищує викиди Тамбори 1815 року («рік без літа») приблизно в мільйон разів. Варто підкреслити, що цей розрахунок не враховує викидів інших вулканів, які можуть бути активовані в рамках ланцюгової реакції.

Така концентрація викидів діоксиду сірки спричинить глобальне утворення аерозольних частинок у стратосфері, які поступово вимиватимуться з атмосфери протягом десятиліть у вигляді кислотних дощів. Основний період кислотних опадів, за прогнозами, становитиме від 3 до 10 років, залежно від кліматичних процесів і циркуляції речовин в атмосфері. Регіони, що знаходяться ближче до епіцентру таких викидів, наприклад, у межах сучасного Сибіру, опиняться під впливом опадів з рН менше 1,5, що аналогічно розведеним

сірчаній кислоті. Це призведе до знищення рослинності, зокрема коріння, листя і гілок, а також вимивання мінералів із ґрунту, що зробить його непридатним для підтримки життя. Водні екосистеми також зазнають різкого закислення: водойми перетворяться на кислотні озера з рівнем рН 2–3, що зробить їх токсичними для більшості форм життя. Крім цього, кислота, що потрапляє у водопровідні системи, зробить питну воду непридатною без складної фільтрації. Інфраструктура, включно з будівлями з цементу, мармуру і металів, зазнає прискореної корозії під впливом сульфатних сполук.

Однак максимальна концентрація кислотних дощів триватиме лише в перші місяці після виверження, після чого опади поступово локалізуються в певних регіонах. З настанням вулканічної зими більша частина опадів перейде у форму снігу, що знизить кислотне навантаження на екосистеми, але до цього моменту глобальні руйнування флори і фауни, спричинені кислотними опадами, вже будуть незворотніми. Збиток екосистемам матиме помітний вплив на природні та антропогенні процеси задовго до початку глобального охолодження.

Вулканічна зима

Сумарний вплив виверження Сибірського плюму, посилений одночасною активацією безлічі вулканів, матиме колосальний катастрофічний ефект, виражений у зміні глобальних кліматичних та екологічних умов. Масштабні викиди вулканічного попелу, газів (особливо діоксиду сірки — SO_2) та аерозолів в атмосферу створять непрохідний бар'єр для сонячного випромінювання на десятиліття.

Висока концентрація сульфатних аерозолів у стратосфері відбиватиме більшу частину сонячної радіації, що спричинить порушення енергетичного балансу планети. Очікується різке скорочення надходження тепла, що призведе до екстремального охолодження клімату — стану, який можна визначити як «гіпервулканічна зима». У результаті подібних процесів Земля перетвориться на «крижану кулю», де умови для підтримки життя збережуться лише в обмежених регіонах, переважно в екваторіальній зоні.

Оцінки можливого впливу ґрунтуються на історичних даних про значні виверження. Наприклад, під час максимального виверження Єллоустоуна 2,1 мільйона років тому температура на планеті знизилася в середньому на 3–5 °С. Для виверження Сибірського плюму, масштаби якого багаторазово перевищують згадану подію, можна припустити, що середня температура на Землі впаде на ~24–31 °С. У полярних зонах зниження температури очікується до 28–36 °С і більше, що призведе до повного замерзання ключових водойм, включно з

Північною Атлантикою і значними ділянками Тихого океану. Середні широти зазнають зниження температури на 24–31 °С, що знищить всю рослинність і спровокує масову загибель організмів.

Океанічні екосистеми зазнають різкого руйнування. Замерзання почнеться з поверхні та прибережних ділянок океанів, спричиняючи зникнення морської біоти на глобальному рівні. В екваторіальних регіонах температура впаде на 20–27 °С, що зробить навіть тропічні зони занадто холодними для підтримки життя.

Практично вся поверхня суші виявиться безплідною внаслідок глобального холоду, затінення і припинення фотосинтезу. Харчові ланцюги буде зруйновано, що призведе до краху сільського господарства і масового вимирання як флори і фауни, так і значної частини людства. Життєздатність збережуть лише окремі мікробні екосистеми, адаптовані до екстремальних умов.

Сульфатні аерозолі, що тривалий час перебуватимуть у стратосфері, продовжать блокувати сонячне світло впродовж кількох десятиліть. Однак наслідки гіпервулканічної зими відчуватимуться значно довше. Навіть після завершення осідання попелу та аерозолів планеті знадобляться сотні або навіть тисячі років для відновлення природного кліматичного та екологічного балансу, враховуючи замерзання океанів, формування льодовиків і радикальні зміни біосфери.

Висновки за першим сценарієм — одномоментним проривом Сибірського плюму

Одномоментне виверження Сибірського плюму стане катастрофічною геологічною і кліматичною подією, що спричинить глобальні зміни в атмосфері, гідросфері та біосфері. Потужний вибух на плато Путорана миттєво знищить усе в радіусі 150 км, сформувавши гігантську кальдеру, а пірокластичні потоки і лави охоплять територію радіусом 1500 км, перетворюючи Сибір на випалену пустелю. Половина поверхні планети вкриється шаром попелу. Землетрус магнітудою до 13,2 від вибуху плюму спричинить руйнівні сейсмічні хвилі, які розповсюджуватимуться всією земною кулею, що активує сейсмічні розломи, вторинні землетруси та мегацунами заввишки до кількох сотень метрів, які затоплюватимуть прибережні зони континентів.

Викиди 1,5 мільйона мегатонн SO_2 спричинять кислотні дощі з рН нижче 1,5, знищуючи ґрунти, рослинність і водні екосистеми. Водойми стануть непридатними для життя, а суша швидко втратить родючість. Колапс фотосинтезу і харчових ланцюжків призведе до масового вимирання флори, фауни і, відповідно, людської цивілізації.

Масова активізація супервулканів, включно з Єллоустоуном, Кампі Флегрей і Тоба, посилить глобальні зміни клімату, збільшивши викиди вулканічного попелу, діоксиду сірки (SO_2) та аерозолів. Їхнє накопичення в стратосфері викличе блокування сонячного світла, охолодження планети («гіпервулканічна зима») і падіння температури на десятки градусів. У полярних регіонах температура знизиться на 28–36 °С, у помірних — на 24–31 °С, а в тропіках — на 20–27 °С, що спричинить замерзання океанів, зупинку океанічної циркуляції, руйнування екосистем і формування гігантських льодовиків на суші.

Вплив гіпервулканічної зими зробить Землю практично безлюдною, відновлення природних умов потребуватиме від тисяч до мільйонів років. Ця подія стане найбільшим вимиранням у геологічній історії планети.

Сценарій 2.

Поступове виверження Сибірського плюму

Другий сценарій виверження Сибірського плюму передбачає не одномоментний вибух, а поступову серію вивержень і потоків лави через розломи й ослаблені зони земної кори. Цей процес можна порівняти з формуванням Сибірських трапів, що сталося наприкінці пермського періоду 250 мільйонів років тому в цьому ж регіоні.

Утворення Сибірських трапових провінцій стало наймасштабнішим проявом земного вулканізму. У цей час Земля пережила найбільшу екологічну катастрофу у своїй історії — пермсько-тріасове масове вимирання, під час якого зникло до 90 % морських і 70 % наземних видів (Рис. 82, 83).

Геологічні дані⁵¹ вказують на те, що сибірські виверження на території Східно-Сибірського кратону могли бути надзвичайно вибуховими (Campbell et al. 1992), з пірокластичними відкладеннями, що сягають товщини 800 м (Khain 1985). Потужність вибуху була настільки висока, що виштовхувала осадові породи іноді й з глибини 10 км.

Вулканічна активність у регіоні проявилася в кілька етапів, кардинально змінивши геологічний ландшафт. Спочатку магма проникала в товщу осадових відкладень, формуючи різноманітні інтрузивні тіла, такі як сілли. Потім характер вивержень змінився на вибуховий, що призвело до викиду величезної кількості пірокластичного

матеріалу й утворення потужних вулканічних відкладень. Кульмінацією цього процесу став вилив колосальних обсягів базальтової лави, що обчислюються сотнями тисяч кубічних кілометрів. Сукупний обсяг вулканічних порід, включно з інтрузіями, пірокластичними відкладеннями та лавовими потоками, оцінюється приблизно в 3 мільйони кубічних кілометрів. Важливо відзначити, що ця цифра відображає лише породи, які збереглися до наших днів, і можна з впевненістю стверджувати, що початкові масштаби вивержень були значно більшими, але пізніше зазнали ерозії.

Формування сибірських трапів стало причиною колосальних викидів вуглекислого газу (CO₂), сірки (SO₂), хлору (HCl) та інших летких речовин. Ці гази різко посилили парниковий ефект і спричинили стрімке потепління після вулканічної зими. Концентрація CO₂ в атмосфері сягала 8000 ppm, що у 20 разів перевищує сучасні рівні. У результаті температура тропічних морів піднялася з 22–25 °C до 30 °C, а океани почали закислюватися, вбиваючи організми з карбонатними скелетами.

Загальний викид сірки становив до 7800 гігатонн, хлору — до 8700 гігатонн, а фтору — до 13 600 гігатонн⁵².

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>

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>



Рис. 82
Художнє представлення вивержень у Сибіру під час пермсько-тріасового вимирання.

Ілюстрація: Image by Tigran Nshanyan

Рис. 83
Художнє уявлення: лістрозаври, які пережили масове вимирання, домінують у спустошеному ландшафті, ілюструючи зміни екосистем після Пермсько-Тріасової кризи.

Ілюстрація: Хуліо Ласерда (Julio Lacerda)

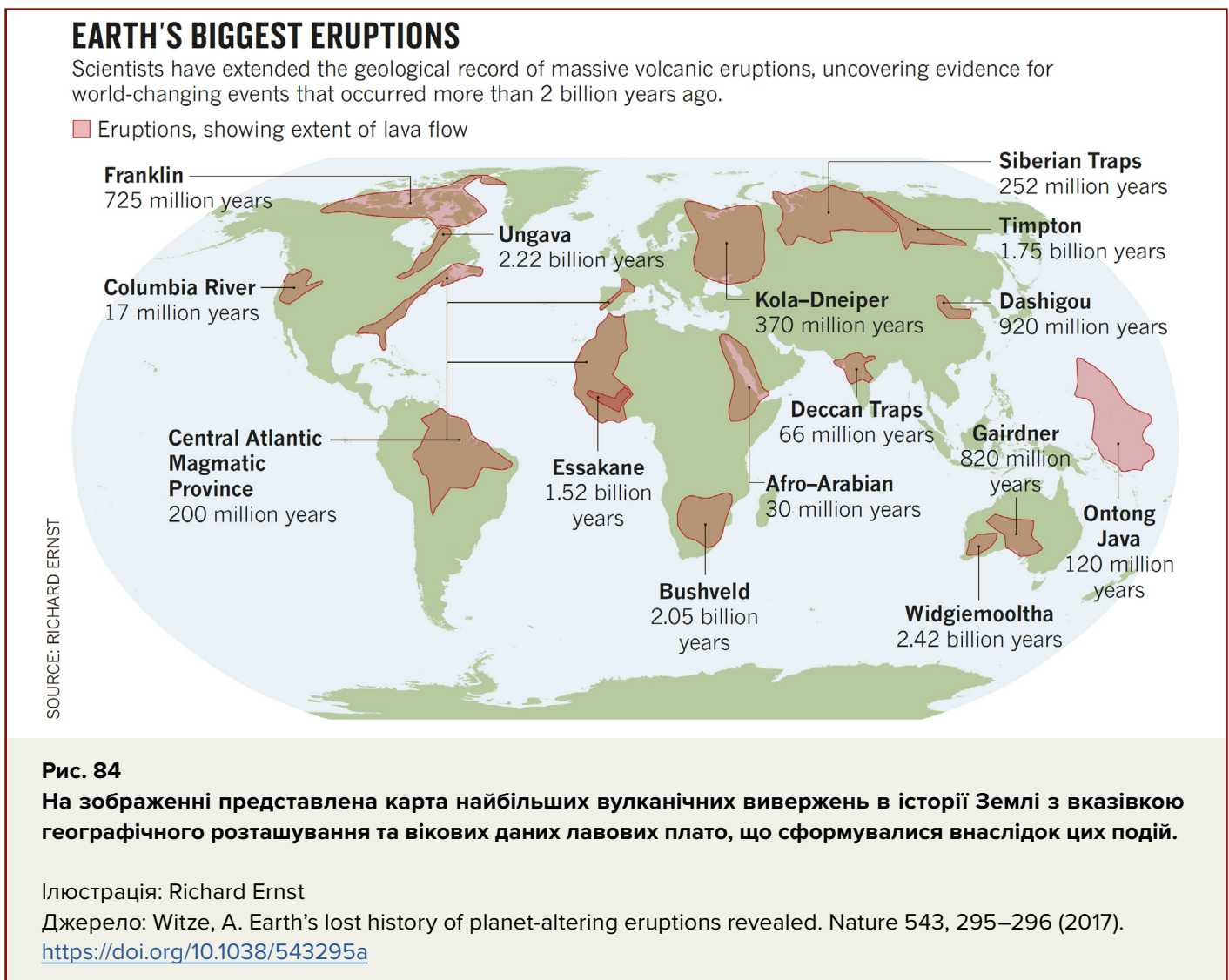


Вулканічний попіл і аерозолі блокували сонячне світло, порушували фотосинтез, викликали масове зникнення лісів і руйнування харчових ланцюгів, що ускладнювало вимирання як рослинних, так

і тваринних видів. Екологічна криза тих часів служить свідченням масштабу можливих наслідків навіть при поступовому виверженні Сибірського плюму.

Згідно з дослідженнями, період вивержень, що розпочався 250 мільйонів років тому, був викликаний підйомом мантийного плюму — потужного потоку магми, що піднімається з глибин Землі в районі сучасного плато Путорана. Повторення такого сценарію сьогодні призведе до формування обширних лавових плато — одних із найбільших геологічних утворень на планеті, які знищать практично

все життя в радіусі кількох тисяч кілометрів, охопивши території Сибіру та сусідні регіони. Геологічний літопис свідчить про те, що подібні катастрофи, які супроводжувалися виливом гігантських базальтових полів⁵³, траплялися неодноразово, викликаючи щоразу масштабні масові вимирання (Рис. 84).



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

Як і в попередні геологічні епохи, магма піднімається з мантії, проникаючи через тріщини в земній корі, подібно до того, як м'яка речовина просочується через щільний фільтр. Цей процес призведе до перегрівання поверхні, утворення безлічі внутрішньокорових магматичних включень, і плавлення літосфери.

На Рис. 85 відображений розподіл ефузивних порід в Сибіру: лави (фіолетовий

колір) і магматичних тіл, застиглих в товщі земної кори (зелений колір). Зелені зони на карті демонструють, як магма, роз'їдаючи земну кору, формувала тріщини і проникала уздовж цих ослаблених зон. Подібний посилений тиск магми здатний знову викликати аналогічний процес.

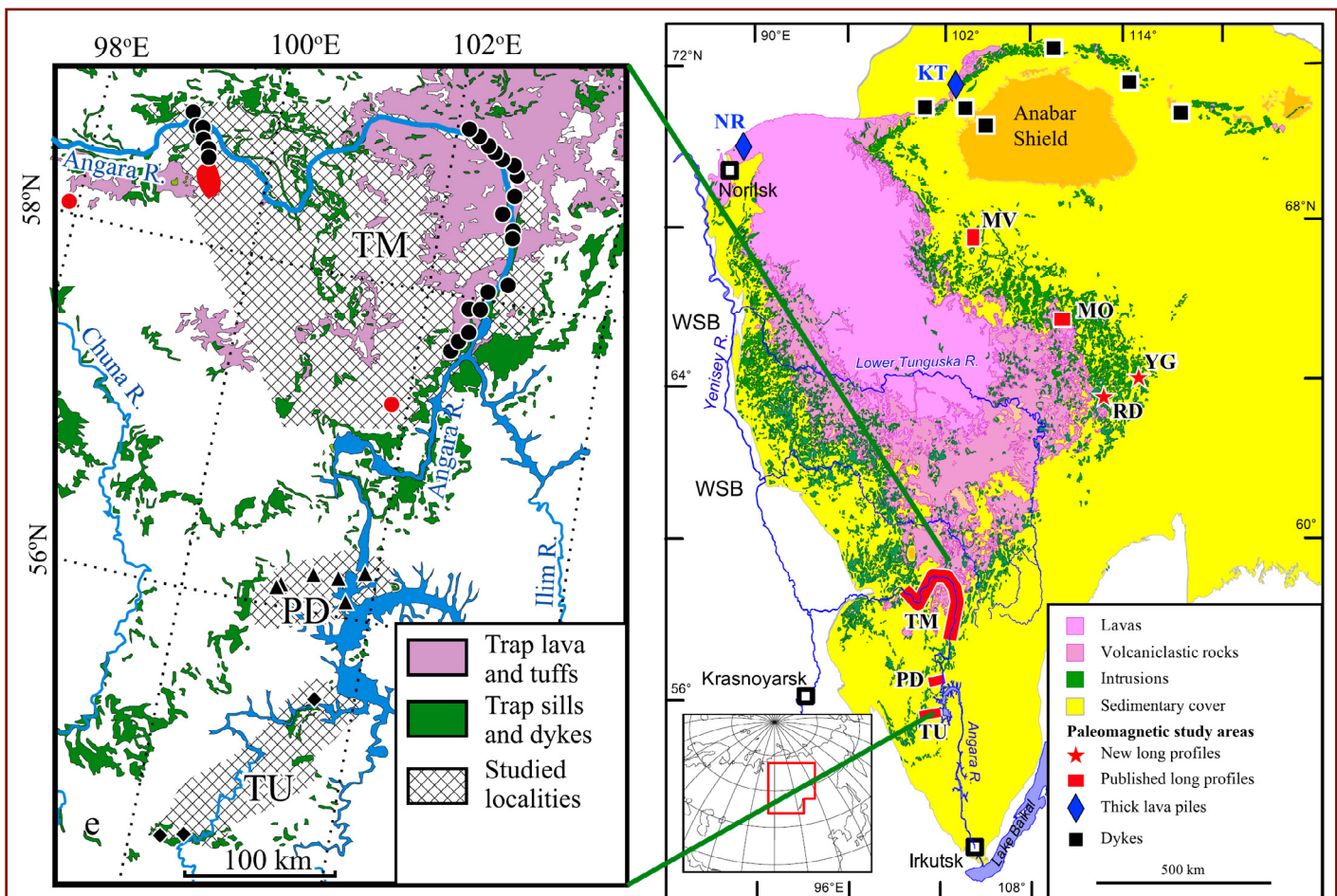


Рис. 85

Праворуч: Оглядова карта Сибірської трапової провінції (спрощена і модифікована по Svensen et al., 2009). На оглядовій карті різними кольорами позначені основні геологічні структури: рожевим показані лавові потоки, зеленим — інтрузивні тіла, жовтим — осадовий чохол. Ліворуч: на детальній карті лівої частини рисунка представлений розподіл трапового магматизму: фіолетовим кольором показані лави і туфи, зеленим — сілли і дайки.

Джерело: 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>

Повільний сценарій виверження можна порівняти з одномоментним вибухом Сибірського плюму, але розтягнутим в часі. Це можна представити як чергу вулканів, що вивергаються кожного тижня, разом з раптовими тріщинами, через які тектимуть базальтові лави по всьому Західному Сибіру.

На карті на Рис. 86 фіолетовим позначені області лавових потоків. У районі щільнішої та стійкішої кори Східно-Сибірської платформи лава розтікалася по площі, а на території Західного Сибіру, яка характеризується тоншою, молодшою і неодноріднішою корою, виверження відбувалися уздовж витягнутих провалів або рифтів. Червоним на карті позначені зони туфів, що складаються

із зцементованих пірокластичних уламків і попелу.

Слід зазначити, що виверження на Східному і Західному Сибіру відрізнятимуться. Під Східним Сибіром магма стикається з щільним архейским кратоном, що створює значний бар'єр. В процесі підйому магма «в'їдається» у вміщуючі породи, охолоджується і насичується леткими компонентами, що може призвести до вибухових вивержень з високим викидом попелу і можливим утворенням кислої в'язкої магми. Тоді як під Західним Сибіром, де кора тонка і молода, передбачається переважання виливання рідких базальтових лав.

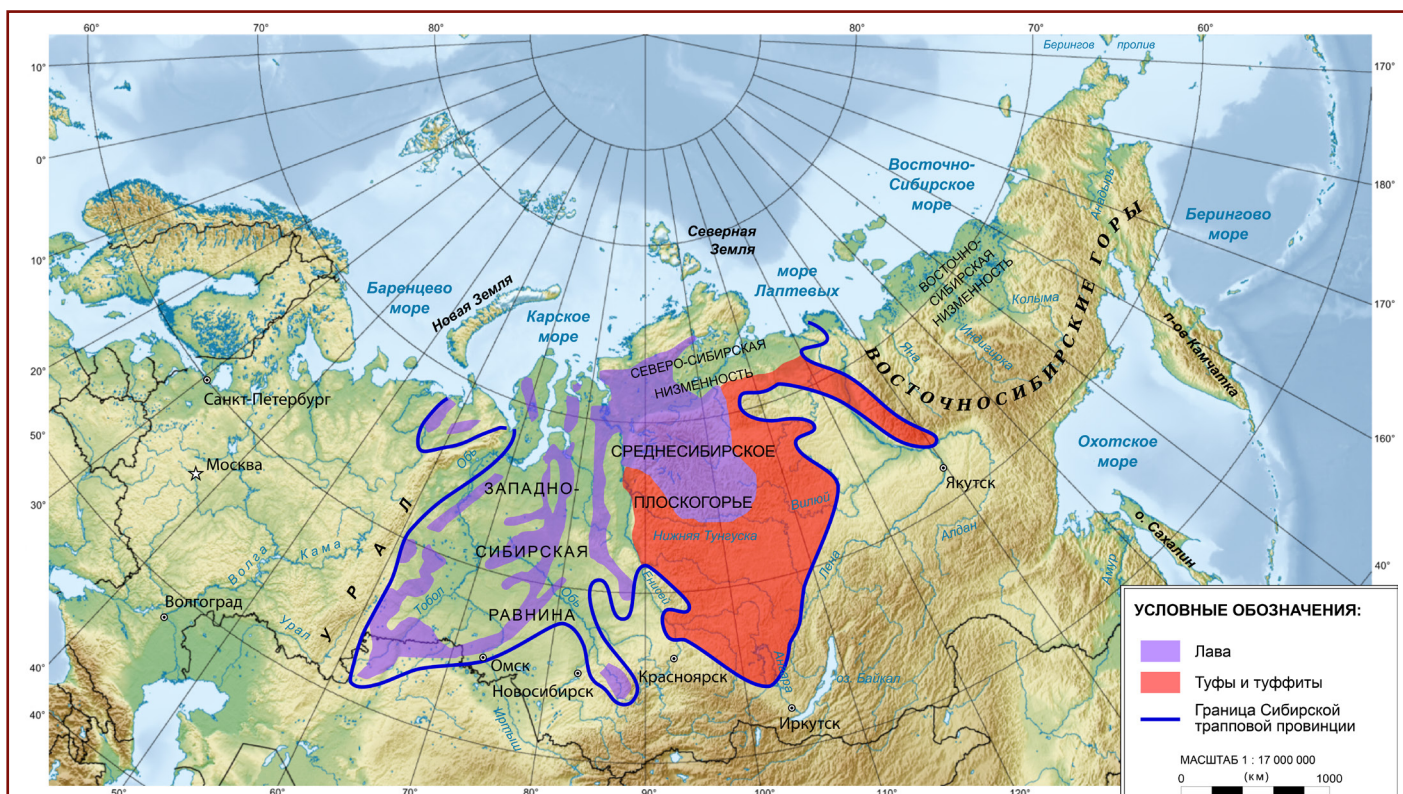


Рис. 86
Карта Сибірської трапової провінції. На карті представлені основні геологічні структури, включаючи райони поширення лавових потоків (фіолетовий колір) і туфів з туфитами (пурпурний колір). Сині лінії означають межі Сибірської трапової провінції.

Джерело: wikipedia.org, за даними Masaitis, 1983

Очікується, що площа, покрита лавовими потоками і туфами, складе близько 7 мільйонів км² в Західному і Східному Сибіру, що можна порівняти з територією сучасної Австралії. Проте площі, схильні до деградації, ймовірно, перевищать десятки мільйонів км². Ці території зазнаватимуть масштабних пожеж, ерозій внаслідок кислотних дощів, попелопадів, зсувів і селей, що несуть вулканічні опади. Уся вічна мерзлота Сибіру зазнаватиме руйнування.

Варто зазначити, що на півострові Таймир, на захід від плато Путорана, розташовано найбільше у світі родовище нікелю, міді і металів платинової групи, що розробляється компанією «Норнікель». Ці родовища мають магматичне походження і сформувалися близько 250 мільйонів років тому в ході вивержень

Сибірської трапової магматичної провінції, що сприяло утворенню унікальних рудних вузлів. Висока концентрація нікелю в магмі того часу, ймовірно, була пов'язана з винесенням речовин ядра Землі на поверхню. Нині спостерігається підйом магматичного плюму в Сибіру, прискорення якого було викликано зміщенням ядра в 1998 році у напрямку півострова Таймир, що було встановлено доктором наук Юрієм Баркіним. В найближчому майбутньому є високий ризик прориву Сибірського плюму в районі міста Норильськ, в тому ж самому місці, де це сталося 250 мільйонів років тому.

Розглянемо далі, які наслідки очікують на Росію і весь світ в результаті цього сценарію.

Наслідки поступового прориву Сибірського плюму для Росії

Існують дослідження, які точно визначають розташування астеносферних розплавлених лінз в літосфері південної частини Сибіру, що пов'язано з тонкістю земної кори в зазначеному регіоні. Проте північна частина Сибіру на сейсмічних картах залишається практично не вивченою, являє собою «білу пляму» в дослідженнях нижньої кори і мантії. Це робить неможливим прогноз місць перших проривів лави і вивержень насиченої газами магми, особливо з урахуванням відсутності повноцінного моніторингу надр в зоні Сибірського плюму.

Відомо, що першими ознаками катастрофи, що насувається, стануть все частіші землетруси і локальні викиди газу. При просуванні магми до поверхні розпочнеться стрімке танення вічної мерзлоти, що може призвести до руйнування інфраструктури на мерзлотних ґрунтах. Також услід за нагрівом ґрунту можливі вибухи газогідратів (метану в структурі льоду), що викличе появу великих вирв і знищення населених пунктів. Масові пожежі стануть неминучістю, обумовленою виходом метану, перегріванням ґрунту і вивільненням вулканічних газів. Вуглеводи в родовищах Сибіру і вугільні басейни, такі як Кузбас, можуть спалахнути, як це вже відбувалося в пермсько-тріасовий період⁵⁴, коли вугільні родовища піддавалися термічному нагріванню до 600 °С.

Виверження почнуться несподівано, охопивши численні точки на великій території. Землетруси магнітудою 7–8, тріщини і розломи призведуть до розливу лави на сотні тисяч

квадратних кілометрів. У областях навколо проривів лави відбудеться масова загибель рослин, тварин і людей через токсичні викиди, які утворюють в атмосфері отруйний «коктейль». Вже в перші дні загинули б мільйони людей, а вулканічний попіл знищив би транспортне сполучення, осідаючи на дорогах і шляхах, погіршуючи видимість і руйнуючи інфраструктуру. Авіація також повністю припинить роботу через небезпеку для двигунів.

Танення вічної мерзлоти ще більше погіршить ситуацію: шляхи сполучення, трубопроводи, будівлі і комунікації почнуть руйнуватися. Багато міст будуть без доступу до постачання води, продовольства та електрики, що викличе гуманітарну кризу. Масова евакуація буде неможливою в значній частині ареалу виверження, оскільки лава, гази, пожежі і кислотні дощі зроблять транспортні шляхи непридатними. Паніка охопить мільйони людей. Евакуація мільйонів жителів Сибіру призведе до соціальної нестабільності та масових безладів.

Економіка країни зазнає катастрофічних втрат: видобуток нафти, газу, вугілля, алмазів і металів припиниться через фізичне знищення інфраструктури, що призведе до зупинки підприємств, дефіциту сировини і електроенергії. Вулканічна активність зруйнує природні багатства регіону, включаючи нафту і вугілля, знищивши ключові економічні активи країни.

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>

Через десятиліття Сибір залишиться зоною екологічного лиха. Катастрофа, що спіткала Росію, безповоротно змінить її географію, економіку і суспільство. Безпечними залишаться лише 25 % території країни, вони знаходитимуться під тиском

екологічної і соціальної кризи. Економічні позиції, історичні пам'ятники і значна частина природних багатств будуть загублені, а Сибір стане непридатним для існування сучасної цивілізації.

Наслідки поступового прориву Сибірського плюму для всього світу

Глобальні наслідки виверження Сибірського плюму торкнуться всього світу, і відбудеться це у декілька етапів.

У перші дні припиниться транспортне сполучення між Європою та Азією через Сибір, а авіаційні перевезення зупиняться через вулканічний попіл в атмосфері. Ці процеси порушать глобальну логістику, спричинивши масштабну продовольчу кризу, оскільки Росія, як один з провідних експортерів продовольства, припинить постачання пшениці та інших продуктів. Порушення експорту нафти, газу та інших сировинних ресурсів Росії призведе до росту цін, енергетичної кризи та економічної нестабільності у багатьох країнах. Світова економіка зіткнеться з ланцюговою реакцією фінансових і соціальних потрясінь.

Хмари попелу і сірчистих аерозолів призведуть до ефекту глобального затемнення, знижуючи надходження сонячного світла. Це призведе до «вулканічної зими» з падінням температур на 2–3 °С. Кислотні дощі і забруднення ґрунтів завдадуть збитків сільському господарству не лише в Росії, але й у всьому світі. Масовий голод, нестача води, токсичне повітря і руйнування кліматичної системи призведуть до поступової загибелі мільярдів людей і тварин. Через декілька років соціальні системи рухнуть.

З часом вулканічний попіл почне осідати, але відбудуться різкі кліматичні зміни. Викид метану і вуглекислого газу через танення вічної мерзлоти призведе до посилення парникового ефекту. Температура почне поступово рости на 5–10 °С, спричиняючи нестійкий клімат з різкими перепадами температури. Руйнування озонового шару призведе до зростання рівня ультрафіолетового випромінювання в Північній півкулі, посилюючи наслідки вивержень.

Незважаючи на віддаленість від Сибіру, Європу серйозно торкнеться виверження Сибірського плюму: попіл накриє Північну і Східну Європи, викликаючи численні респіраторні захворювання у населення. Кислотні дощі знищать ліси, міську інфраструктуру і сільгоспугіддя. Після фази тимчасового похолодання розпочнеться різке потепління, що супроводжуватиметься посухами на півдні та повенями в Центральній і Північній Європі. Масова міграція з Росії, Азії і Близького Сходу призведе до демографічної кризи і конкуренції за ресурси. Європейські країни боротимуться з безперервними екологічними, економічними і соціальними викликами.

Азія, що знаходиться найближче до епіцентру вивержень, візьме основний удар. Забруднення повітря пилом і попелом спровокує задуху і кислотні дощі, особливо в Китаї, Монголії і Казахстані. Сільське господарство північного Китаю, ключового продовольчого регіону, буде знищено через нестачу сонячного світла і погіршення якості ґрунту. Перепади температури зруйнують інфраструктуру і сільськогосподарські системи на всьому континенті. Поступове зростання

температури океанів викличе знекиснення води, що знищить морські екосистеми, у тому числі рибальські ресурси.

З часом наслідки тривалих вивержень стануть ще руйнівнішими. Кліматичні та екологічні кризи загостряться, людство втратить багато сучасних технологій і знань, піддавшись глибокому відкату в розвитку. Світова цивілізація опиниться на межі колапсу.

Довгострокові наслідки поступового прориву Сибірського плюму для планети

Повільне виверження Сибірського плюму викличе масштабні довгострокові наслідки, які радикально змінять планету на мільйони років. Атмосфера піддається глобальному забрудненню токсичними речовинами, що призведе до утворення кислотних дощів планетарного масштабу і руйнування озонового шару. У океанах відбудеться критичне закиснення, викликаючи масову загибель морських організмів. Ці процеси призведуть до краху морських екосистем, порушення глобальних харчових ланцюгів і колапсу усієї морської біорізноманітності.

На суші масове вимирання стане неминучим через токсичні викиди в атмосферу, руйнування ґрунтових екосистем і зникнення більшості рослин. Втрата запилювачів призведе до краху наземних

екосистем. Передбачається, що вимирання торкнеться від 75 до 95 % існуючих видів.

В результаті виверження станеться комплексна кліматична, біологічна та геологічна криза, яка повністю трансформує біосферу Землі. Цей процес призведе до колапсу людської цивілізації, загибелі мільярдів людей і відкату розрізнених груп людей, що вижили, в розвитку в кам'яне століття. Масштаби цієї катастрофи можна буде порівняти з найбільшими масовими вимираннями в історії Землі, що відкриє новий еволюційний етап біосфери не менше ніж через мільйони років.

Сценарій 3.

Планова контрольована дегазація

Існуючі методики вулканічної геоінженерії

Враховуючи зростаюче напруження під Західно-Сибірською плитою і Східно-Сибірським кратоном, пов'язане з підйомом Сибірського плюму, необхідно вжити невідкладних заходів для мінімізації можливих катастрофічних наслідків. Одним з таких рішень є контрольоване скидання тиску, лави і газів із вторинних магматичних вогнищ, тобто **планова дегазація**.

Сучасні наукові дослідження розглядають дегазацію магматичних камер як перспективний метод запобігання масштабних вивержень. Цей підхід дає підстави для застосування технологій вулканічної геоінженерії не лише на вулканах або супервулканах, але й для управління активністю магматичних плюмів. Концепція контрольованої дегазації знайшла відображення у низці наукових публікацій і патентів, розроблених фахівцями з різних країн.

Теоретичні основи вулканічної геоінженерії були закладені на початку ХХ століття, а практичні експерименти проводилися впродовж останнього століття. Методи вулканічного втручання включали буріння кратерів, осушення вулканічних озер, створення каналів для відведення лави, охолодження потоків лави морською

водою, бомбардування лавових потоків і відкачування парникових газів (вуглекислого газу і метану) (Рис. 87).

З 1960-х років Геологічна служба США (USGS) здійснювала буріння в областях лавових озер на вулкані Килауеа на Гавайях для перенаправлення лави. Аналогічні ініціативи реалізуються в Японії, Ісландії та Італії. Наприклад, в Японії тестувалися технології зниження тиску в магматичних камерах, а в Ісландії був успішний досвід перенаправлення лави, зокрема на острові Хеймаей, де потоки охолоджували водяними гарматами. В Італії розвиваються системи раннього попередження, а також методи управління лавовими потоками; прикладом може служити вибухове руйнування лавових бар'єрів на Етні у 1983 році.

Сьогодні проводяться міжнародні наукові конференції і симпозиуми, присвячені глибокому бурінню в зонах вулканічної та геотермальної активності, що розширює перспективи застосування вулканічної геоінженерії для запобігання вивержень та зниження їхніх наслідків на глобальному рівні.

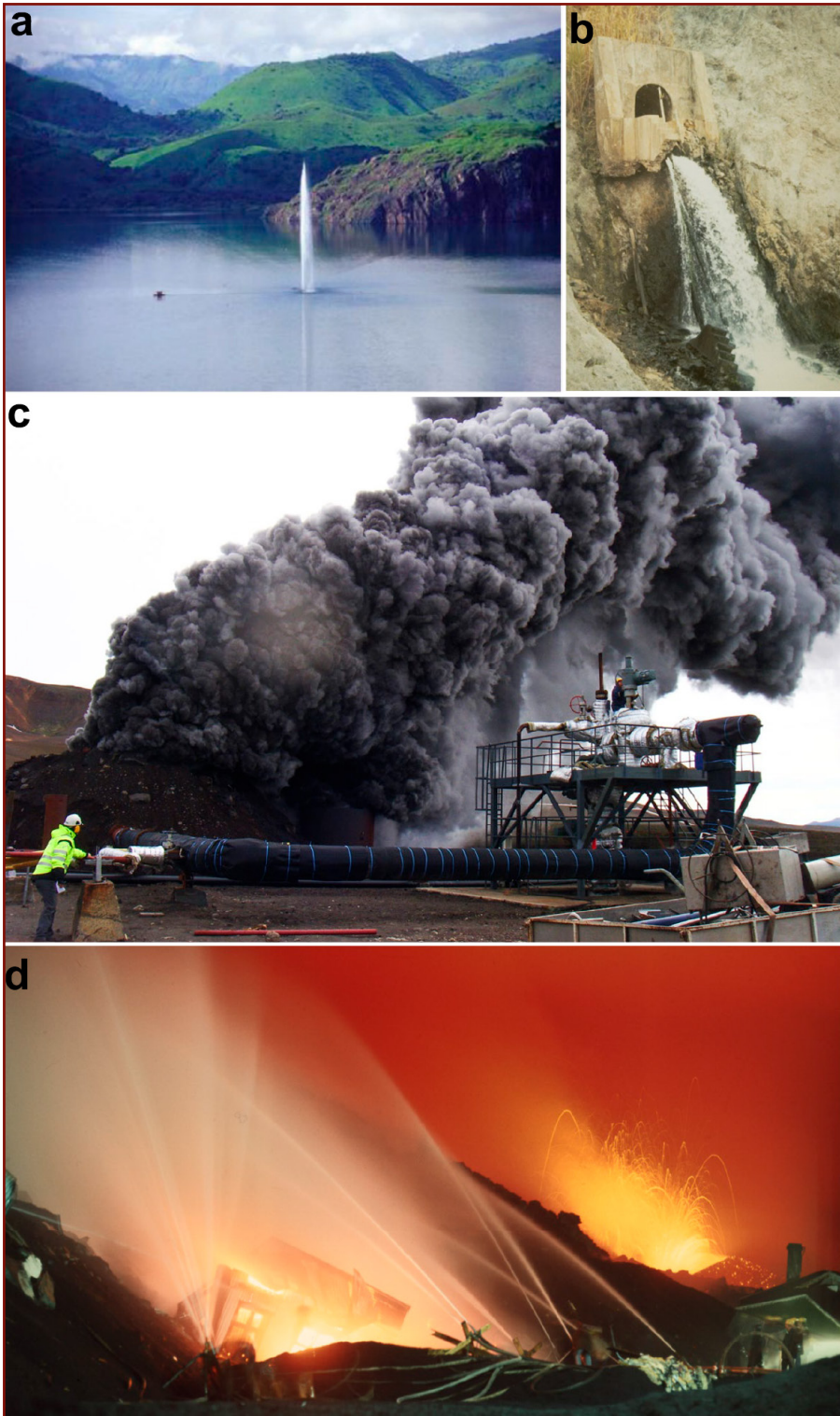


Рис. 87

(а) Дегазация вуглекислого газу з озера Ніос, Камерун, за даними Halbwachs et al. (2020).

(б) Дренажний тунель в стіні кратера вулкана Келуд, Індонезія (Глобальна програма вулканізму, зображення GVP-01120).

(с) Попутне буріння магматичної кишені в Крафлі, Ісландія, в 2009 році (зображення від GO Friðleifsson/IDDP).

(d) Охолодження потоків лави закачуваною морською водою в Хеймаей в Ісландії в 1973 році, Трістинн Х. Бенедиктссон.

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

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

На діаграмі на Рис. 88 представлено хронологію найбільш значущих випадків вулканічної геоінженерії. Чорні кола означають цілеспрямовані втручання, а червоні — ненавмисні впливи на вулканічну активність.

Існують також запатентовані методики планової дегазації та зниження ризиків виверження вулканів і супервулканів.

Наприклад, принцип однієї з технологій, запатентованої двома російськими фахівцями, полягає в запобіганні неконтрольованому лавиноподібному виверженню вулканів за допомогою похилого буріння свердловин і регулювання тиску в магматичних камерах (Рис. 89).

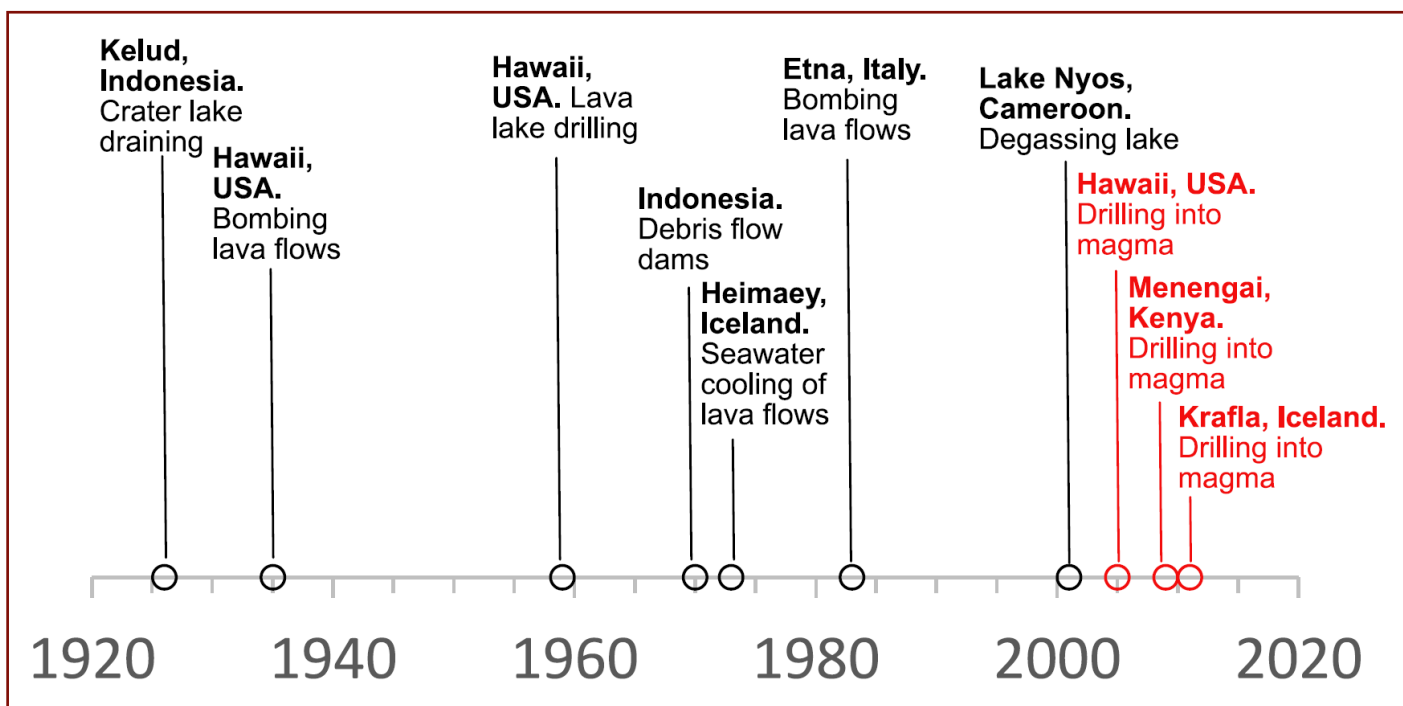


Рис. 88

Хронологія деяких значущих випадків вулканічної геоінженерії. Чорні кола позначають цілеспрямовані втручання, тоді як червоні кола позначають ненавмисні вулканічні втручання.

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



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

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

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.04.2007

(45) Опубликовано: 10.01.2009 Бюл. № 1

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

(72) Автор(ы):

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

(73) Патентообладатель(и):

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

(54) СПОСОБ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЛАВИНООБРАЗНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ

(57) Реферат:

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

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

5 0 8 C 1

R U 2 3 4 3 5 0 8 C 1

Рис. 89

ПАТЕНТ: СПОСІБ ЗАПОБІГАННЯ ЛАВИНОПОДІБНОМУ ВИВЕРЖЕННЮ ВУЛКАНІВ.

Винахід належить до способів запобігання неконтрольованому, лавиноподібному виверженню вулканів та організації контрольованого транспортування магми для її використання при будівництві. Це підвищує ефективність підходу.

Суть винаходу: Метод передбачає управління тиском у вторинних магматичних камерах під сульфатно-активними вулканами. Це досягається похилим бурінням каналів у основі вторинної магматичної камери. В цю камеру подають стиснутий газ, підвищуючи тиск у вторинній магматичній камері, тим самим сповільнюючи приплив магми з первинної камери. Одночасно накопичена у вторинній камері магма витягується та транспортується для будівельних цілей через пробурені канали. Процес гарантує, що тиск не досягне критичних рівнів, які можуть спровокувати лавиноподібне виверження.

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

Інша технологія розроблена американським винахідником (Рис. 90). Ця технологія описує методи евакуації магми з вулканічних магматичних камер, таких як камера в Єллоустоунському супервулкані, з метою запобігання можливому катастрофічному виверженню. Основна ідея полягає у створенні

штучних каналів (труб) для виведення магми на поверхню, де її можна обробити та використати, наприклад, для виробництва енергії.

(12) **United States Patent**
Stratford

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

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

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

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

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

FOREIGN PATENT DOCUMENTS

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

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

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

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

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

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

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

(58) **Field of Classification Search** 405/52, 405/258.1, 130, 131, 303; 165/45; 166/302, 166/304, 57-62
See application file for complete search history.

(56) **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

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

* cited by examiner

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

(57) **ABSTRACT**

An apparatus controls the evacuation of volcanic magma to prevent explosions. Magma evacuation is through a single evacuation tube that heats the magma flow within the tube to prevent stickiness of the magma in the tube. The heating may use small combustion chambers to heat steam, which in turn heats and stabilizes the magma flow. Stability is aided by central cooling, where needed, using water jets from nozzles located at the wall of the tube.

25 Claims, 2 Drawing Sheets

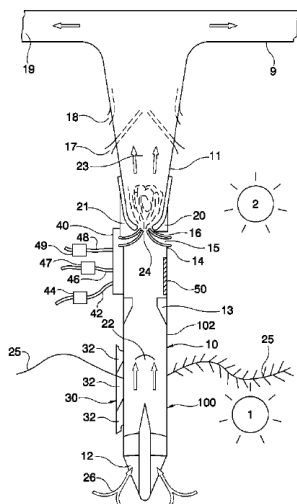


Рис. 90
ПАТЕНТ: СИСТЕМИ ЕВАКУАЦІЇ МАГМИ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ВИБУХІВ ІЗ СУПЕРВУЛКАНІВ.

Цей пристрій керує евакуацією вулканічної магми для запобігання вибуховим виверженням. Магма евакуюється через одну евакуаційну трубу, де її потік нагрівається, щоб запобігти залипання магми всередині труби. Невеликі камери згоряння використовуються для нагрівання пари, яка, у свою чергу, нагріває та стабілізує потік магми. Стабільність підтримується центральним охолодженням, де необхідно, за допомогою струменів води з форсунок, розташованих на стінках труби.

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

Прикладом успішної дегазації є японський проєкт «[Наукове буріння вулкана Ундзен](#)» (USDP) — це шестирічна ініціатива, започаткована у квітні 1999 року. Спрямована на вивчення історії зростання, підповерхневої структури та процесів підйому магми вулкана Ундзен (Рис. 91). Перша фаза включала буріння двох свердловин на схилах вулкана і створення

моделі його структури. Другий етап був зосереджений на бурінні магматичного каналу після вивержень 1990–1995 років для аналізу механізму дегазації. Для успішного буріння було розроблено стратегію, що включає вертикальне буріння з подальшим збільшенням нахилу стовбура свердловини (Рис. 92).



Рис. 91
Бурове обладнання для буріння вулкана Ундзен 1995 року.

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

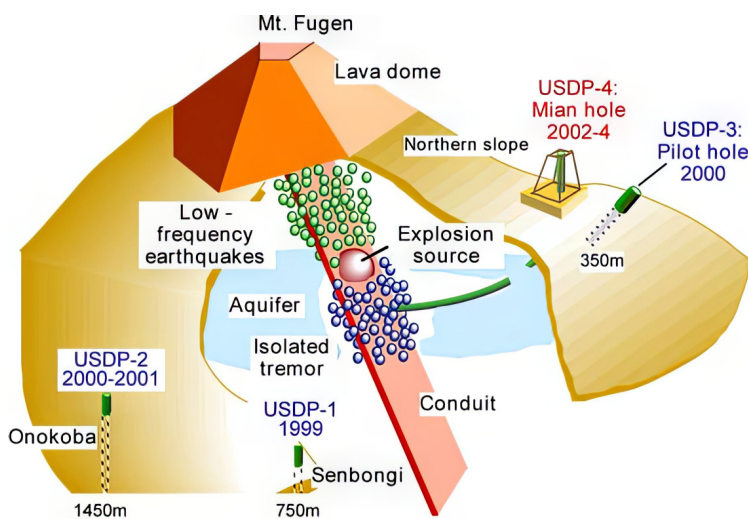
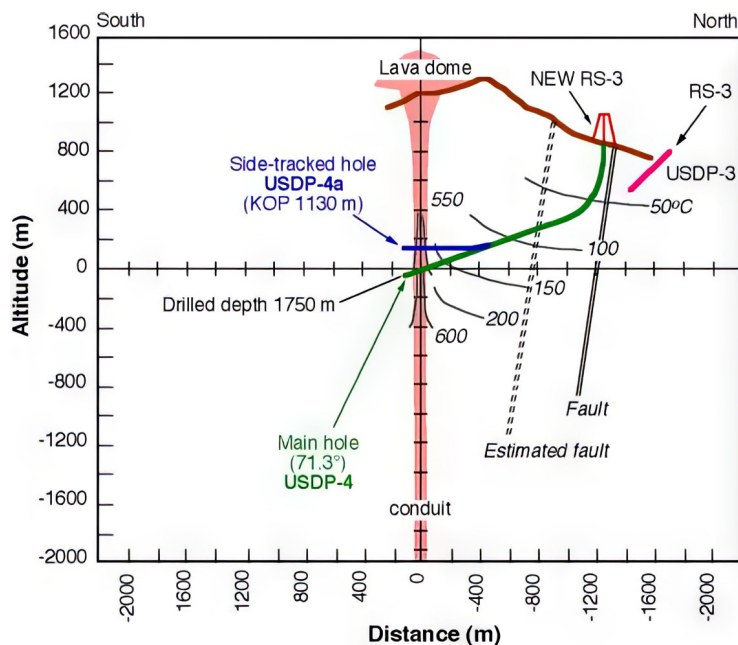
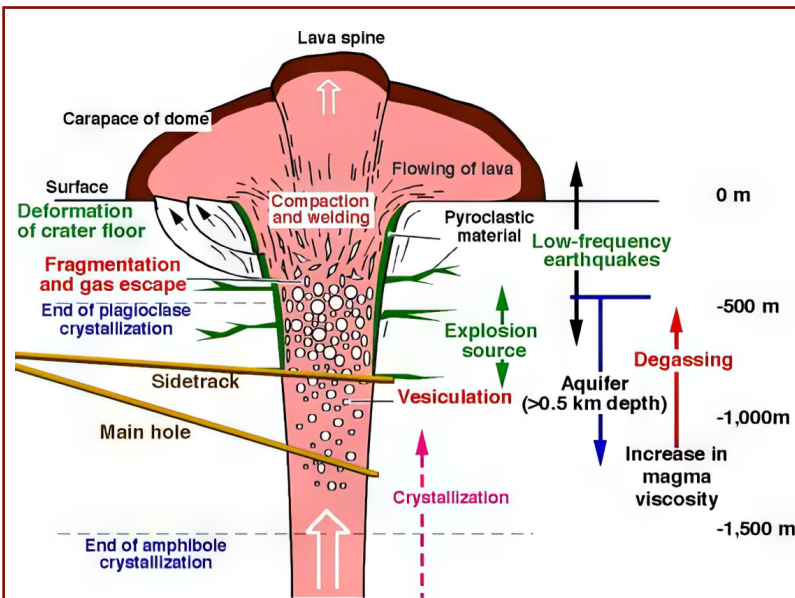


Рис. 92

А. Зображення лавового купола і верхньої частини каналу в Унцені.

Ефективна дегазація пінистої магми відбувалася під час її фрагментації та відпалу у верхній частині каналу. Канал буде досліджено під час буріння основної свердловини (USDP-4) у 2003 році, а суцільний відбір керна буде виконано під час буріння бічного стовбура (USDP-4a) у 2004 році.

Джерело: Проект USDP. (n.d.). Інститут дослідження землетрусів Токійського університету. Отримано 31 грудня 2024 року з <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20>

В. Траєкторії буріння трубопроводу. Нові РС-3 та РС-3 – це місця буріння основного бокового ствола та дослідної свердловини відповідно.

Джерело: проєкт USDP. (n.d.). В Інституті дослідження землетрусів Токійського університету. Отримано 31 грудня 2024 року з <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20>

С. Тривимірне зображення свердління трубопроводу.

Джерело: Центр дослідження вулканічної рідини. (n.d.). Розуміння системи трубопроводів на вулкані Унзен. Інститут дослідження землетрусів Токійського університету. Отримано 31 грудня 2024 року з <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/vrc/usdp/conduit.html>

Сьогодні людство володіє достатнім технологічним та інженерним потенціалом для проникнення у вулканічні системи, але кожен випадок планової дегазації вимагає максимально ретельної підготовки, аналізу великого масиву даних та точного розрахунку. І навіть у цьому випадку ризики залишаються.

Наведені приклади було випробувано на звичайних вулканах, що, безумовно, відрізняється від масштабів гігантського магматичного плюму в Сибіру. Цей плюм являє собою загрозу, що значно перевищує міць навіть одного супервулкана, яку можна порівняти з енергією вибухів тисячі кальдер Єллоустоуна. Проте обговорення цієї проблеми набуло актуальності саме завдяки тому, що існують потенційні підходи для її вирішення.

За відповідного наміру людство здатне розробити програму дегазації магматичного плюму, що ґрунтується на глобальних напрацюваннях фахівців. Її головним завданням стане мінімізація наслідків підйому Сибірського плюму шляхом зниження тиску лави і газів у вторинних магматичних вогнищах, що дасть змогу запобігти масштабним неконтрольованим виверженням.

Реалізація такої програми вимагатиме тісної міжнародної співпраці, консолідації зусиль учених та інженерів з усього світу. Тільки об'єднаний підхід дасть змогу виробити ефективні рішення, спрямовані на забезпечення безпеки всього людства.

Приклад програми планової дегазації Сибірського плюму

Програма може охоплювати паралельно розробку кількох напрямів:

1. Створення мережі моніторингу:

1.1 Необхідно буде створити мережі високочутливих датчиків і супутникового спостереження для моніторингу сейсмічної та термальної активності в регіоні. Це допоможе своєчасно виявляти зони впровадження вторинних вогнищ.

1.2 Знадобиться провести детальне картування вторинних магматичних вогнищ з використанням методів сейсморозвідки. Важливо буде попередньо оцінити тиск і обсяг магми в кожному вторинному вогнищі.

1.3 Потім необхідно буде пробурити науково-дослідні, моніторингові свердловини

та встановити датчики тиску, температури і сейсмічної активності в аномальних зонах.

2. Розробка технології контрольованої дегазації та блокування магматичних каналів:

2.1 Необхідно буде розробити план буріння похилих глибоких свердловин (на глибину до 8 км) у безпечних зонах. Буде потрібен детальний розрахунок траєкторій похилих свердловин для досягнення вторинних вогнищ. Необхідно буде використовувати технології буріння, стійкі до високих температур і тиску, тобто використання жароміцних матеріалів для укріплення стінок свердловин, створення системи моніторингу тиску та температури в свердловинах.

2.2 Буде потрібно продумати процес відведення газів і лави, через поетапне керування тиском у вторинних вогнищах через систему свердловин. Контроль за швидкістю дегазації для запобігання різких перепадів тиску і використання системи компресорів для управління тиском газів. Необхідним буде використання системи фільтрації та охолодження, щоб запобігти викидам токсичних речовин в атмосферу. Виведення лави і газів буде проводитися до стабілізації тиску в кожному з вогнищ.

2.3 Потім необхідно буде розробити план спрямованого ядерного вибуху в визначених свердловинах для перекриття пластів над вторинним магматичним вогнищем. Це дасть змогу запобігти зайвому виходу магми на поверхню і мінімізувати викид попелу.

Поступове скидання тиску забезпечить стабільність Сибіру і збереже ключові населені пункти, окрім, можливо, Норильська та навколишніх населених пунктів.

2.4 У процесі відведення лави з вогнищ необхідно буде контролювати по можливості її розливи. Спробувати направляти її

через спеціально підготовлені канали в бік Арктичних морів. Розробити програму використання магми для будівництва (наприклад, створення штучних островів або зміцнення берегової лінії).

3. Евакуація населення:

Необхідним буде впровадження системи раннього попередження та розробка планів евакуації на випадок непередбачених ситуацій. Також буде потрібна планова організація безпечної евакуації населення із зон ризику та його адаптації, соціального забезпечення, з урахуванням можливості довгострокового переселення.

4. Збереження інфраструктури:

Необхідна буде розробка планів захисту та евакуації стратегічних об'єктів з території можливого затоплення лавою. Створення резервних сховищ на безпечних територіях для евакуйованих стратегічних ресурсів регіону, таких як нафта, газ, кольорові та дорогоцінні метали, руди, добрива, продовольство, вода, медикаменти.

Обґрунтування вибору місця закладання науково-дослідних свердловин для моніторингу динаміки сучасного магматичного плюму Сибіру

Найпершим кроком, необхідним для розуміння того, як швидко і в якому напрямку відбувається проникнення плюму та розтікання його голови, проникнення по тріщинах у земну кору, є здійснення моніторингу геотермальних та геофізичних параметрів на глибині. Для таких досліджень необхідне буріння нових свердловин та проведення в них регулярних вимірів

температури, тиску, відбір проб газового складу та маркерів посилення магматичних процесів, сейсмічних шумів та інших параметрів.

Для цих досліджень було намічено 10 точок під буріння науково-дослідних свердловин (Рис. 93, 94).

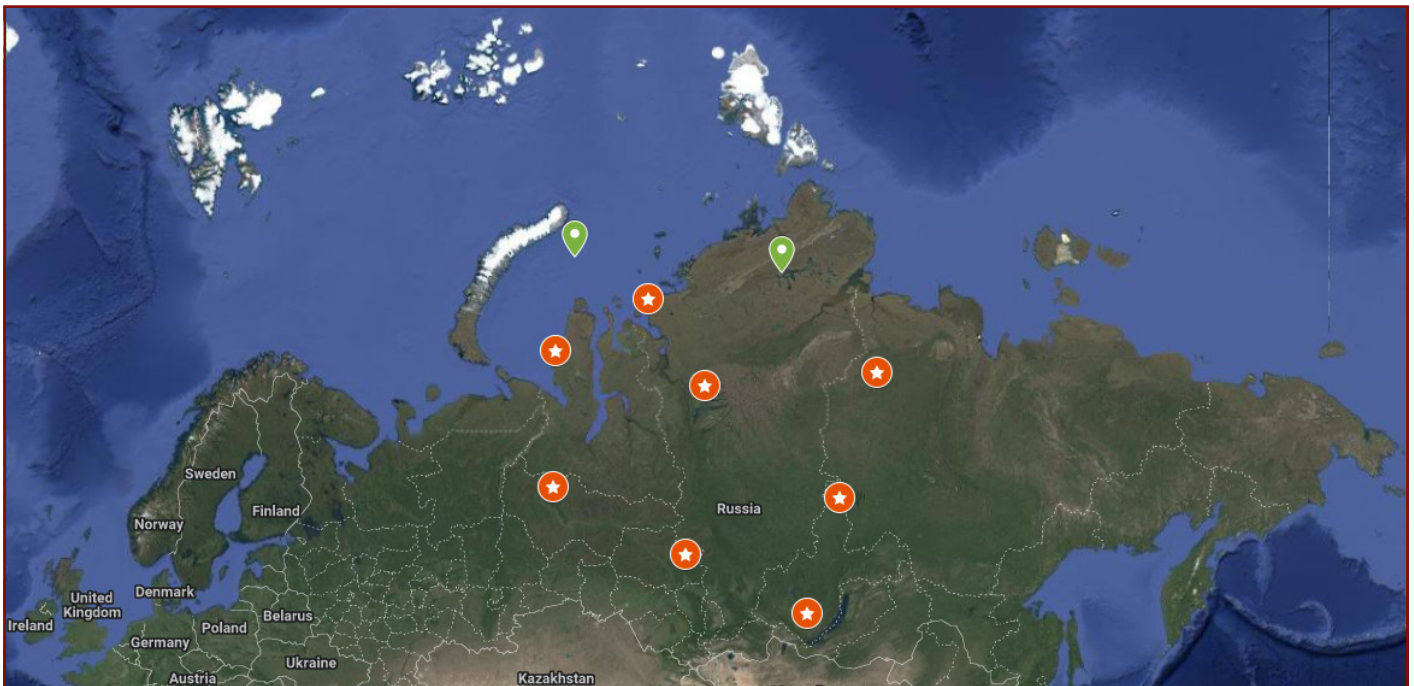


Рис. 93

Попереднє розташування 10 рекомендованих точок під буріння науково-дослідних свердловин

Назва свердловини	Населений пункт або прилегла інфраструктура	Координати X (широта)	Координати Y (довгота)	Область / Район
Ц 1	Талнахський район, Норильськ, Красноярський край	69.4459423	88.7670478	Півострів Таймир
ЗСЗ 2	Родовище Харасавей, півострів Ямал	71.1849618	66.9830117	Західний Сибір
ЗЮЗ 3	Родовище Кіслорське, Білоярський район, Ханти-Мансійський автономний округ	63.6572613	66.5569363	Західний Сибір
ЮЗ 4	Селище Центральний, Верхньокетський район, Томська область	58.9454	86.0127	Західний Сибір
Ю 5	Село Чічкова, Чічковське муніципальне утворення, Усть-Удинський район, Іркутська область	54.19598	103.7021	Східний Сибір
Ц 1	Талнахський район, Норильськ, Красноярський край	69.4459423	88.7670478	Півострів Таймир
ЗСЗ 2	Родовище Харасавей, півострів Ямал	71.1849618	66.9830117	Західний Сибір
ЗЮЗ 3	Родовище Кіслорське, Білоярський район, Ханти-Мансійський автономний округ	63.6572613	66.5569363	Західний Сибір
ЮЗ 4	Селище Центральний, Верхньокетський район, Томська область	58.9454	86.0127	Західний Сибір
Ю 5	Село Чічкова, Чічковське муніципальне утворення, Усть-Удинський район, Іркутська область	54.19598	103.7021	Східний Сибір

Рис. 94

Таблиця 10 рекомендованих свердловин для науково-дослідного буріння з метою моніторингу просування Сибірського плюму, що включає назву свердловини, координати, населений пункт або інфраструктуру поряд, геологічну будову розрізу

Критерії вибору цих свердловин ґрунтувалися на таких принципах:

1. Розташування свердловини відносно найбільшого перетину теплових та геодинамічних аномалій, асоційованих з проникненням та розтіканням голови плюму. Виходячи з цього принципу одна свердловина була закладена в районі центральної частини ймовірного підняття голови плюму, 7 свердловин були намічені по периметру ймовірного розтікання магми. Ще одна свердловина була намічена в районі Байкалу, у напрямку ймовірного активного просування магми під подошвою Східно-Сибірського кратону. І ще одна свердловина була намічена в районі Карського моря для моніторингу просування плюму під океанічною корою Арктичного шельфу.
2. Розташування свердловин обиралося оптимальним для подальших робіт із сейсмотомографії, щоб інформація з сейсмічних датчиків у свердловинах при подальшій обробці могла дати найбільш прийнятну картину ЗД. Тобто, щоб сітка сейсмодатчиків у свердловинах була оптимально розташована для сейсмотомографії надр.
3. Місця свердловин обиралися з урахуванням можливості доставки обладнання для буріння та забезпечення під'їзних шляхів (транспортної доступності). Оскільки на півночі Західного та Східного Сибіру вкрай важкопрохідні території, болотисті ландшафти, мало доріг, екстремальні кліматичні умови, то вибір майданчиків для буріння спирався на розташування вже існуючої інфраструктури для проведення науково-дослідних робіт: наявність доріг, населених пунктів, діючих бурових майданчиків. Дві точки були обрані на нафтових родовищах, що діють у цей момент та належать компаніям Газпром і Роснафта, інші розташовані в районах поблизу родовищ нафти, газу та інших корисних копалин. Необхідно зазначити, що за відсутності можливості пробурити свердловини за заданими координатами, допустиме зміщення свердловин на 10–20 км у будь-яких напрямках.

Рекомендовані методи досліджень у свердловинах:

Для комплексного моніторингу та вивчення мантийного плюму необхідний збір наступних параметрів із датчиків у науково-дослідних свердловинах:

1. Температурний моніторинг: вимірювання температури на різних глибинах для аналізу термічних аномалій та посилення геотермального потоку в результаті просування магми в області розтікання плюму.

2. Тиск: визначення тиску в свердловині для оцінки змін гідродинамічних умов внаслідок активності магми та флюїдної фази.

3. Відбір проб газів: збирання проб газів, що надходять з глибинних пластів, для вивчення їх складу та можливого впливу магматичної активності.

4. Сейсмічні дослідження: встановлення як стандартних, так і широкосмугових

сейсмічних датчиків для реєстрації сейсмічної активності з метою створення деталізованої сейсмотомографії земної кори та мантиї для постійного моніторингу стану плюму.

5. Склад пластового флюїду: вивчення складу пластових рідин для ідентифікації можливого термального або магматичного підживлення.

6. Геомеханічні дослідження: вимірювання напруження в породах для аналізу напруженого стану літосфери, що зазнає деформації від проникнення плюму.

7. Електромагнітні методи: проведення електромагнітних досліджень для фіксації змін електричних властивостей середовищ, пов'язаних із проникненням магми.

Зібрані дані слугуватимуть основою для побудови комплексної моделі динаміки мантийного плюму, а також для оцінки його впливу на геологічні процеси в Сибіру.

Особливості буріння та проведення блокування магматичних каналів під час планової дегазації

Основною метою буріння свердловин під час планової дегазації буде зниження тиску у вторинних магматичних вогнищах плюму, запобігання вибухам магми та організація контрольованого виведення газу та лави.

На початковому етапі буріння виконуватиметься за участю операторів, оскільки на невеликій глибині цей процес являє собою стандартне технологічне завдання з мінімальними ризиками для персоналу. Для цього застосовуються традиційні бурові установки, обладнані системами моніторингу температури та тиску, що дозволяє контролювати процес та оперативно реагувати на відхилення від норми.

При досягненні критичної глибини та наближенні до активних зон магматичної системи ризик для людей суттєво зростає. На цьому етапі роботи повинні повністю перейти в режим автоматизації. Використовуватимуться спеціалізовані бурові установки з автоматичним керуванням. Процес буріння регулюватиметься дистанційно за допомогою програмного забезпечення, яке аналізує дані, що надходять у реальному часі, і коригує дії обладнання. Для підвищення точності контролю оператори застосовуватимуть технології віртуальної реальності, які забезпечують детальне керування обладнанням без фізичного знаходження у небезпечній зоні. Це дозволить зменшити ймовірність аварій, пов'язаних із викидом газів під високим тиском або руйнуванням обладнання ударною хвилею.

Моніторинг стану бурового комплексу та навколишнього середовища здійснюватиметься за допомогою дронів та роботів. Дрони, оснащені камерами, тепловізорами та датчиками, фіксуватимуть витік газів, теплові аномалії та сейсмічну активність. Роботи, що працюють безпосередньо в зоні буріння, будуть збирати дані про температуру, тиск і хімічний склад вогнища, передаючи їх до автоматизованих центрів управління. Ці технології дозволять звести до мінімуму присутність людей у зоні підвищеного ризику та забезпечити високий рівень точності та безпеки.

Після завершення буріння на наступному етапі передбачається проведення контрольованої дегазації — поступового стравлювання тиску і виведення великих об'ємів лави. На фінальних стадіях після значного зниження об'єму магми і газів може виникнути необхідність проведення контрольованого вибуху для закриття шляхів підйому магми. Один із запропонованих методів передбачає спрямований ядерний вибух у пробуреній свердловині. Його метою є розвантаження тектонічних напружень та створення стабільних структурних бар'єрів, що перекривають магматичні канали.

Такий підхід передбачає руйнування порід у зонах високого напруження з подальшим їх плавленням та охолодженням під дією теплової енергії.

Це сприяє формуванню монолітного бар'єра, здатного повністю або частково блокувати доступ магми до поверхні. Термодинамічний вплив також може знизити тектонічне напруження, зменшуючи ймовірність подальших вивержень.

Реалізація ядерних вибухів потребує високого рівня точності в розрахунках,

включаючи оцінку літостатичного тиску, твердості та щільності гірських порід, а також характеристик магматичного розплаву. Ці фактори мають бути враховані для досягнення максимальної ефективності методу та мінімізації можливих ризиків.

Вибір оптимального часу для буріння свердловин під час планової дегазациї

Наразі основна увага наших фахівців зосереджена на вивченні оптимальних часових рамок буріння для проведення планової дегазациї. Хоча робити остаточні висновки поки що передчасно, попередні розрахунки вже вказують на можливість точного вибору найбільш сприятливого часу для початку дегазациї. Отримані результати свідчать, що, правильно визначивши момент, ризик можливих ускладнень може бути знижений у декілька разів.

У процесі буріння необхідно враховувати не лише фізико-механічні характеристики порід, включно з їхньою міцністю і тріщинуватістю, але й часові параметри, пов'язані з небесною механікою. Розрахунки повинні ґрунтуватися на аналізі положення Землі на екліптиці, фазі Місяця, розташуванні

великих планет, таких як Юпітер, а також поточному рівні сонячної активності. Крім того, важливим фактором є моніторинг глибокофокусних землетрусів у регіоні майбутнього буріння, оскільки вони можуть значно підвищити локальну сейсмічну активність.

На сьогодні сформовано загальне уявлення про механізм та ключові закономірності процесу, проте ці дані вимагають подальшої багаторазової перевірки. Отримані результати повинні бути не тільки ретельно перевірені ще раз нашою науковою групою, але й підтверджені незалежними дослідженнями та моделями інших фахівців.

Сценарії результатів проведення планової дегазації Сибірського плюму

Під час проведення планової дегазації Сибірського плюму можливі три основні сценарії розвитку подій, розраховані з урахуванням двох стадій проекту: раннього та пізнішого етапів. Розглянемо їх детальніше.

1. Мінімальні збитки для території Росії

У випадку, якщо процес дегазації та скидання надмірної лави з вторинних магматичних вогнищ моделюватиметься міжнародною командою експертів, а розрахунки будуть ретельно і точно виконані з урахуванням усіх геологічних особливостей, обидва етапи дегазації пройдуть без аварій та ускладнень. Тоді збитки для території Росії зведуться до мінімуму: втрата становитиме 5–7 % площі країни, у крайньому разі — до 10 % (радіус ураження близько 500–600 км). У межах цього сценарію можливе забезпечення захисту великих міст Красноярського краю, а загибелі людей вдасться уникнути. Ба більше, передбачається, що за сприятливого розвитку подій відведення лави може бути перенаправлене у бік арктичних морів, що дозволить Росії збільшити свої території за рахунок розширення берегової лінії.

2. Середні збитки для території Росії

У межах цього сценарію передбачається успішне проведення раннього етапу дегазації, проте на пізніх стадіях можуть виникнути непередбачувані складнощі, такі як раптовий газовий вибух або викид лави. Оскільки до цього моменту частина газів та лави буде вже стравлена, наслідки

будуть менш руйнівними. Може статися розлив рідких базальтових лав, характерний для Ісландії чи Гавайських островів, або виверження середньої експлозивності. І тут можлива втрата території збільшиться до 25–30 % (близько 4–5 мільйонів квадратних кілометрів). Наслідки можуть торкнутися міст в радіусі 1000 км від зони активності. Однак цей сценарій не призведе до глобальної катастрофи для цивілізації чи незворотних руйнувань на території Росії. Людство зможе впоратися з виникаючими кліматичними та екологічними викликами.

3. Максимальні збитки для Росії та усього світу

Цей сценарій передбачає, що пізня ініціатива чи недостатня кваліфікація фахівців призведуть до серйозних проблем. Нестача досліджень, помилка в розрахунках або буріння через м'які чи тріщинуваті породи можуть порушити перебіг операції. Якщо ускладнення відбудеться на ранньому етапі дегазації, коли тиск у вогнищах максимально високий, це може викликати один із двох катастрофічних наслідків: миттєвий вибух усієї системи Сибірського плюму або повільні, але масштабні виливи лави, за аналогією з формуванням Сибірських трапів. Незважаючи на потенційні ризики, ймовірність такого розвитку подій дуже мала, оскільки важко уявити реалізацію такого складного проекту без належної міжнародної підготовки.

Оптимістичний і найімовірніший варіант передбачає втрату лише 5–7 % території Росії з мінімальними збитками. Навіть у разі ускладнень на пізніх етапах збитки можуть зрости до 25–30 %, що лишається значно сприятливішим, аніж наслідки бездіяльності. Ризик же серйозніших руйнувань у процесі планової дегазації для Росії або для всього світу мізерно малий.

Реалізація планової дегазації забезпечить Росії унікальний досвід керування глобальними геодинамічними ризиками, що зміцнить її позиції як міжнародного наукового і технологічного лідера. Успішне виконання проєкту покаже здатність країни справлятися з викликами планетарного масштабу, сприяючи зміцненню глобального співробітництва у сфері запобігання природним катастрофам. Це не тільки стабілізує внутрішню політичну та соціальну обстановку, але й зміцнить міжнародну взаємодію для вирішення глобальних проблем.

Контрольована дегазація Сибірського плюму може впливати не лише на локальну зону, а й на інші вулканічні системи, такі як Єллоустоун і стратовулкани по всьому світу. Магматичні резервуари та їх динаміка утворюють єдину взаємопов'язану глобальну мережу, що функціонує як єдиний геомеханічний механізм. Контрольоване

зняття тиску в одному сегменті може знизити систему напружень у магматичних резервуарах, запобігаючи ланцюговим реакціям та виверженням. Це можна уявити як розгерметизацію автомобільної шини: зниження тиску в одній її частині дозволяє перерозподілити навантаження та уникнути розриву на критично напружених ділянках. Аналогічний підхід до дегазації може сприяти стабілізації магматичних систем у глобальних масштабах.

Отже, проведення планової контрольованої дегазації в будь-якому випадку залишається єдиним шансом на порятунок як Росії, так і всього людства, що значно вигідніше і розумніше, ніж бездіяльність. Цей сценарій дозволить уникнути глобальної катастрофи та дасть людству час для розробки подальших рішень.

Однак, незважаючи на значні перспективи, успішна реалізація навіть оптимістичного сценарію стане викликом величезного масштабу. Діяти необхідно вже зараз, оскільки зволікання підвищує ймовірність катастрофічних подій. Дивно, але реалізація такого проєкту може зустріти заперечення всередині Росії, з огляду на потенційні ризики руйнування інфраструктури та послаблення контролю за стратегічними ресурсами.

■ Висновки

Сибірський плюм є глобальною геодинамічною загрозою, яку за масштабом можна порівняти із тисячею катастрофічних вивержень найбільших супервулканів. У разі неконтрольованого виверження можуть виникнути наслідки планетарного масштабу, включно з настанням льодовикового періоду, знищенням екосистем, руйнуванням інфраструктури та загибеллю людства. Ці ризики диктують необхідність вживання превентивних заходів у вигляді планової дегазації магматичної системи Сибірського плюму.

Бездіяльність створює загрозу стихійних неконтрольованих вивержень, наслідки яких будуть катастрофічними не лише для Росії, але й для усїєї планети. Контрольоване зниження тиску в магматичних вогнищах допоможе уникнути гірших сценаріїв і надасть людству життєво необхідний час для розробки довгострокових рішень.

Додатково, інтеграція технології атмосферних генераторів води у повсякденне використання разом із дегацією Сибірського плюму створить нові можливості для відновлення екологічного балансу. Це дасть змогу очистити океани від пластику, посилити водний цикл, а також відновити теплову рівновагу планети.

Комплексне впровадження таких рішень може стабілізувати кліматичну ситуацію та забезпечити майбутнє для всього людства, вивільнивши час для пошуку рішення щодо зовнішнього космічного впливу, що спричиняє катастрофічні події під час циклу 12 000 років.

Ці завдання вимагають термінового міжнародного співробітництва вчених із різних дисциплін, включно з квантовими фізиками, для розробки та реалізації комплексних рішень. Проте така співпраця ускладнюється геополітичними та військовими конфліктами. Тому необхідний глобальний мораторій на війни та перенаправлення військових ресурсів на пом'якшення наслідків катастроф і гуманітарні зусилля. У людства залишилося лише 4–6 років відносно стабільного часу, щоб встигнути вжити необхідних заходів.

Якщо будуть створені умови для відкритої співпраці, то вчені не розпочинатимуть з нуля, оскільки вже є реальні напрацювання та розуміння причинно-наслідкових зв'язків в цьому напрямку. Нездатність людства віддати пріоритет глобальній єдності і науковій співпраці призведе до безповоротних наслідків для життя на Землі.

■ Додаток 1

Методика аналізу сейсмічної активності включала скачування і спеціальну обробку даних, отриманих на сайті Міжнародного Сейсмологічного центру (International Seismological Centre — ISC). Оскільки дані містять різні джерела з різних країн та дослідницьких інститутів, а також різні типи магнітуд (M_w , M_s , M_b , M_L , M_D і тд.), то було виконано певний алгоритм обробки даних для вибору відповідного типу магнітуди з різних джерел. Ми використали два різні підходи:

1. Названий в тексті як **спеціальний алгоритм медіанних значень магнітуди**. Метод полягає у виборі переважної оцінки величини магнітуди та включенні події у вибірку, якщо переважна оцінка знаходиться в необхідному діапазоні магнітуд. Ми вибираємо переважну оцінку магнітуди, шукаючи серед оцінок наступні типи магнітуд (в порядку переваги) : M_w , M_L , M_S , m_b , M_D , M_V . Якщо для переважного типу є вибірка магнітуд для однієї події, то для розрахунку медіани беруться всі оцінки магнітуди вибраного типу для цієї події. Потім для них знаходиться медіана. Якщо для цієї події немає оцінки жодного з вище перелічених переважних типів (що буває рідко, лише кілька відсотків подій в усій базі даних), то обирається будь-яка оцінка магнітуди зі значенням, що співпадає з медіаною, обчисленою на основі усіх типів магнітуд цієї події.

2. Названий в тексті як **по алгоритму максимальних значень магнітуди**. Вибирається оцінка магнітуди з максимальним значенням серед усіх оцінок величини для цієї події.

Перший алгоритм в середньому призводить до невеликого зниження величини магнітуди відносно максимального переданого значення. Але, як показав досвід, медіанний алгоритм дає адекватну поведінку Закону Гутенберга Ріхтера та інших закономірностей, і досить добре узгоджується з даними інших сейсмологічних баз, таких як Геологічна служба США (USGS), Об'єднані науково-дослідні інститути сейсмології (IRIS).

Другий алгоритм дозволяє оцінити кількість землетрусів, зареєстрованих будь-яким з дослідницьких інститутів, зі значенням вищим за вибране. Такий розгляд дозволяє побачити тенденцію в кількості землетрусів у вибраному діапазоні магнітуд.

Усі графіки, представлені в розділі «Зростання сейсмічної активності як ознака дестабілізації плит внаслідок активності Сибірського магматичного плюму», були побудовані з використанням першого алгоритму — спеціального алгоритму медіанних значень магнітуди (Рис. 44–75).

Після вибору магнітуди отримані дані були відфільтровані по типах подій у базі ISC, щоб виключити події, що викликані людською діяльністю в ході гірничодобувних робіт: вибухи, можливі вибухи, гірські удари і так далі. Були виключені такі типи подій :

km = known mine explosion – відомий вибух на шахті

sm = suspected mine explosion – передбачуваний мінний вибух

kh = known chemical explosion

(Notstandard IMS) – відомий хімічний вибух (не стандартний IMS)

sh = suspected chemical explosion

(Notstandard IMS) – передбачуваний хімічний вибух (не стандартний IMS)

kx = known experimental explosion – відомий експериментальний вибух

sx = suspected experimental explosion – підозрюваний експериментальний вибух

kn = known nuclear explosion – відомий ядерний вибух

sn = suspected nuclear explosion – підозрюваний ядерний вибух

Також, оскільки на території Росії знаходиться багато гірничодобувних підприємств, то база даних ISC була зіставлена з даними Єдиної геофізичної служби РАН на січень 2025 року, в якій вказані усі відомі вибухи і гірські удари на території Росії. Ці події також були виключені, щоб гарантувати, що в отриманих даних не залишилося подій, що відповідають вибухам.

Перелік літератури

- 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.gsras.ru/zr/contents.html>

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mikhailova, R. S., Ulubieva, T. R., & Petrova, N. V. (2021). The Hindu Kush earthquake of October 26, 2015 with Mw=7.5, I0~7: 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., Krivolutskaya, N. A., Petrunin, A. G., Arndt, N. T., Radko, V. A., & Vasiliev, Y. R. (2011). Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. *Nature*, 477, 312-316.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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