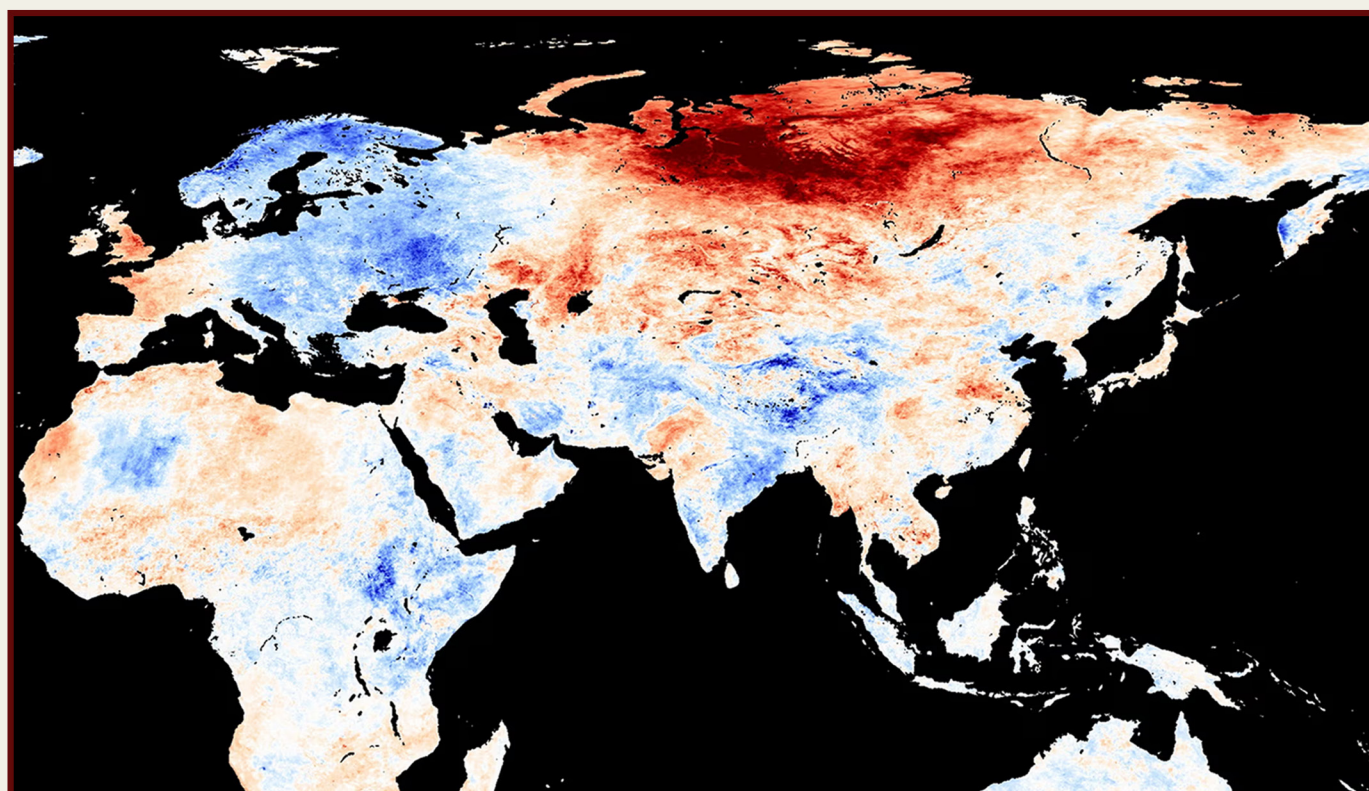


SULLA MINACCIA

DI UN'ERUZIONE DI UN PENNACCHIO DI MAGMA

IN SIBERIA E STRATEGIE PER AFFRONTARE IL PROBLEMA



SULLA MINACCIA

DI UN'ERUZIONE DI UN PENNACCHIO DI MAGMA

IN SIBERIA E STRATEGIE PER AFFRONTARE IL PROBLEMA

Contenuto

Breve descrizione del modello geodinamico del cambiamento climatico sulla Terra nel periodo attuale	4
Spostamento del nucleo verso la Siberia nel 1998.....	16
La Siberia e l'Artico Siberiano si stanno riscaldando 3-4 volte più velocemente del resto del mondo	21
Segni indiretti della risalita del Pennacchio Siberiano.....	25
Fusione del Permafrost	27
Manifestazioni di vulcanismo di fango.....	29
Riscaldamento del suolo.....	31
Temperatura dell'aria vicino alla superficie.....	32
Aumento dell'attività dei fulmini	34
Riduzione dello strato di ozono.....	36
Struttura, possibili dimensioni e localizzazione del pennacchio magmatico, sulla base di dati pubblicati e osservativi	38
Localizzazione del pennacchio magmatico.....	44
Aumento dell'attività sismica come indicatore della destabilizzazione delle placche tettoniche.....	48
Prova dell'inevitabilità dell'eruzione del Pennacchio Siberiano	72
Scenario 1: Eruzione istantanea del Pennacchio Siberiano	73
Attivazione di supervulcani e sistemi vulcanici	80
Pioffe acide.....	82
Inverno vulcanico	83
Scenario 2: Eruzione graduale del Pennacchio Siberiano	85
Conseguenze della graduale eruzione del Pennacchio Siberiano per la Russia	90
Conseguenze globali della graduale eruzione del Pennacchio Siberiano	91
Conseguenze a lungo termine della graduale eruzione del Pennacchio Siberiano per il pianeta.....	92
Scenario 3: Degassamento pianificato e controllato.....	93
Metodi di geingegneria vulcanica esistenti	93
Esempio di un programma per il degassamento pianificato del Pennacchio Siberiano.....	100
Giustificazione per la selezione di posizioni per i pozzi di ricerca per monitorare la dinamica del moderno Pennacchio del mantello Siberiano	102
Caratteristiche della perforazione e del blocco dei canali magmatici durante il degassamento pianificato	105
Selezione del tempo ottimale per la perforazione dei fori durante il degassamento pianificato.....	106
Risultati previsti del degassamento pianificato del Pennacchio Siberiano	106
Conclusione	109
Appendice 1	110
Riferimenti	112

Breve descrizione del modello geodinamico del cambiamento climatico sulla Terra nel periodo attuale

Negli ultimi 30 anni, la Terra ha sperimentato un aumento senza precedenti e sincronizzato dei cambiamenti climatici, anomalie ed eventi estremi in tutti gli strati del pianeta e dei suoi parametri geofisici. La progressione di questi cambiamenti sta accelerando in modo esponenziale. L'analisi completa dei dati scientifici indica che i principali motori delle anomalie osservate in tutte le sfere della Terra sono i cicli astronomici che hanno un impatto sull'intero Sistema Solare ogni 12.000 anni.

Questa ipotesi di influenza astronomica esterna è supportata dall'osservazione di anomalie climatiche, geodinamiche e magnetiche simili che si verificano simultaneamente su altri pianeti del Sistema Solare e sulle loro lune. Ad esempio, l'aumento della velocità del vento e l'espansione delle dimensioni degli uragani sono stati registrati su Urano, Giove e Venere. Nel frattempo, Marte

ha mostrato lo scioglimento delle calotte polari, insieme all'aumento dell'attività vulcanica come su Venere. Inoltre, l'attività sismica su Marte si è intensificata, indicando l'emergere di processi geodinamici anomali.

I cambiamenti critici all'interno dei sistemi della Terra a causa del ciclo astronomico di 12.000 anni sono iniziati nel ciclo attuale nel 1995. Notevoli anomalie geofisiche registrate in quel momento includevano una forte accelerazione nella rotazione della Terra (Fig. 1), uno spostamento nel suo asse¹ (Fig. 2), e l'inizio di una deriva pronunciata del Polo Nord magnetico² (Fig. 3). Questi fenomeni suggeriscono cambiamenti sostanziali che si verificano all'interno del nucleo della Terra.

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). I poli magnetici della Terra. MCCME.

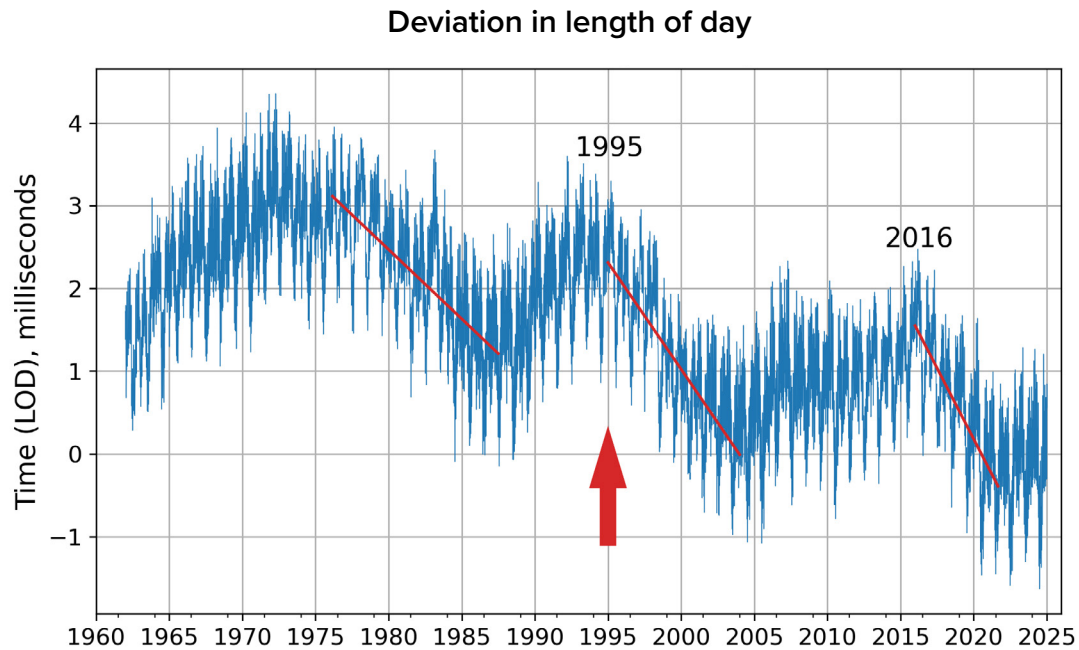


Fig. 1

Deviazione della lunghezza del giorno in millisecondi dal 1962 al 2023

Fonte: IERS Earth Orientation Center dell'Osservatorio di Parigi

Lunghezza del giorno – parametri di orientamento della Terra: https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

Nella figura, le linee rosse rappresentano le linee di tendenza che illustrano la velocità con cui la lunghezza di un giorno sta diminuendo. Ad esempio, la linea di tendenza a sinistra è relativamente dolce, mentre la linea di tendenza a destra, che segna l'accelerazione dal 2016, è quasi verticale. Ciò indica che la lunghezza di un giorno sta diminuendo significativamente più velocemente, il che significa che la rotazione del pianeta sta accelerando.

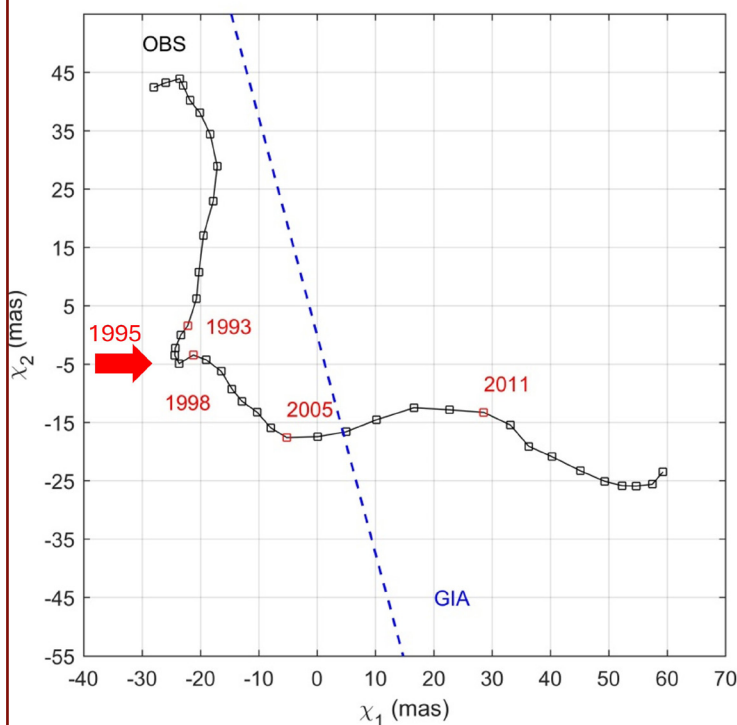


Fig. 2

Traiettoria a lungo termine dell'eccitazione osservata dopo la rimozione dei cicli annuali e di Chandler utilizzando il metodo della media mobile.

Linea nera con quadrati: traiettoria osservata; linea tratteggiata blu: direzione della deriva polare causata dalla regolazione isostatica glaciale (GIA). La dimensione media mobile del sottoinsieme è stata impostata a 84 mesi, che è il multiplo meno comune di 12 mesi (ciclo annuale) e 14 mesi (ciclo di Chandler), secondo lo studio di Liu et al. (2017).

Fonte: 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>

Velocity of the north magnetic pole (km/year)

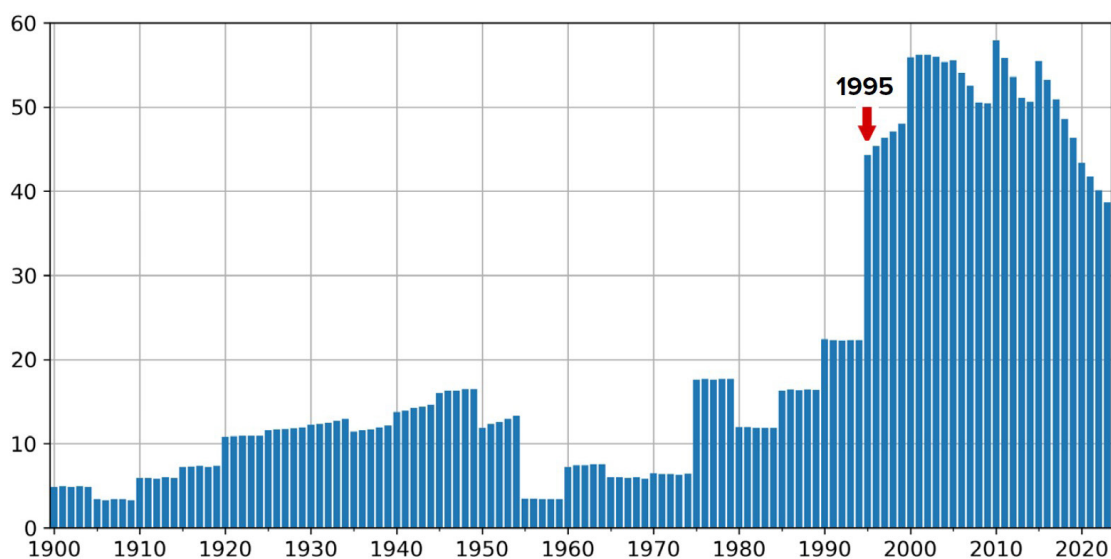


Fig. 3

Velocità della deriva del Polo Nord magnetico (km/anno)

Fonte: dati NOAA sulla posizione del Polo Nord magnetico

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

Secondo l'ipotesi, in questo momento, il Sistema Solare ha iniziato ad entrare in una regione in cui le forze cosmiche esterne hanno iniziato a esercitare un'influenza significativa sui nuclei planetari. I cambiamenti osservati nel nucleo della Terra nel 1995 suggeriscono un aumento del riscaldamento del nucleo esterno, il che implica che l'energia aggiuntiva ha iniziato a raggiungere il nucleo della Terra. Tali profondi cambiamenti nel nucleo della Terra richiedono input di energia quadrilioni di volte superiori a tutta l'energia mai prodotta dalla civiltà umana durante la sua esistenza.

L'afflusso di energia esterna nel nucleo della Terra ha innescato processi associati alla fusione del mantello e all'ascesa del magma in superficie. Questo, a sua volta, ha avviato una reazione a catena di attività sismica e vulcanica, un aumento del calore proveniente dall'interno della Terra e un aumento dei disastri climatici in tutto il mondo.

Ad esempio, dal 1995, è stato osservato un significativo aumento dell'attività sismica, caratterizzato da una maggiore frequenza, maggiore magnitudo e maggiore energia dei terremoti. Questa tendenza riguarda sia le regioni continentali che il fondale oceanico (Fig. 4), comprese le aree precedentemente considerate sismicamente inattive, indicando la natura globale di questi cambiamenti.

È importante notare che l'aumento del numero di terremoti di magnitudo 5.0 o superiore non è attribuibile ai progressi nella tecnologia di monitoraggio sismico (Fig. 5) ma riflette cambiamenti genuini nel sistema geodinamico della Terra. I dati cumulativi del Centro Sismologico Internazionale confermano che il numero di terremoti è notevolmente aumentato negli ultimi 25 anni e continua ad aumentare (Fig. 6).

Aumento dei terremoti del fondale oceanico lungo le dorsali medio-oceaniche

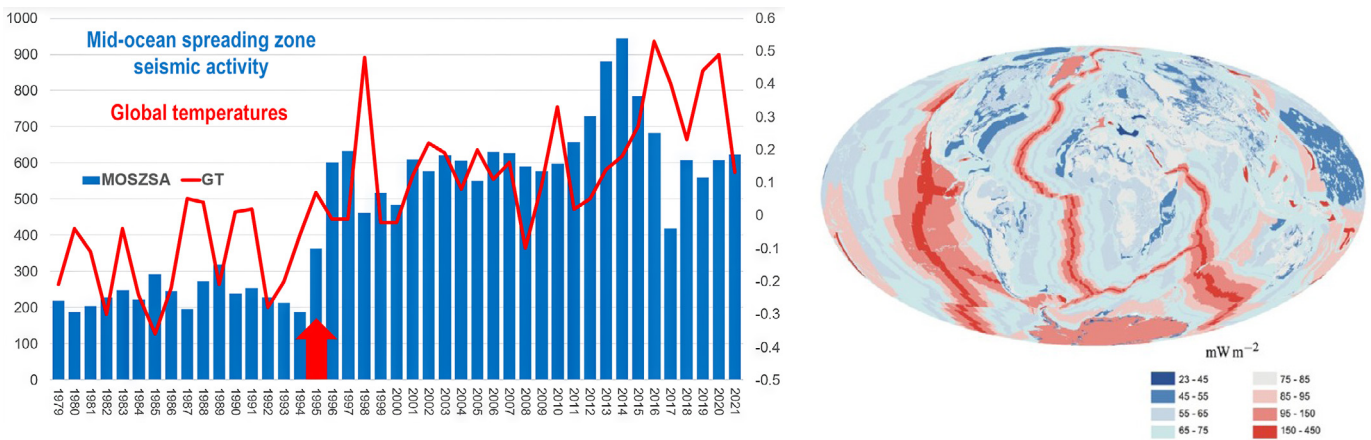


Fig. 4
Aumento simultaneo dei terremoti del fondale oceanico e delle temperature atmosferiche globali (a sinistra). Riscaldamento geotermico delle dorsali medio-oceaniche (a destra)

Fonte: Davies & Davies, 2010; Viterito, A. (2022). 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Il diagramma illustra un forte aumento del numero di terremoti del fondale oceanico lungo le dorsali medio-oceaniche a partire dal 1995, insieme a una forte correlazione tra la sismicità del fondale oceanico e le temperature atmosferiche. Ciò indica un'ulteriore fonte di calore profondo che colpisce sia gli oceani che l'atmosfera.

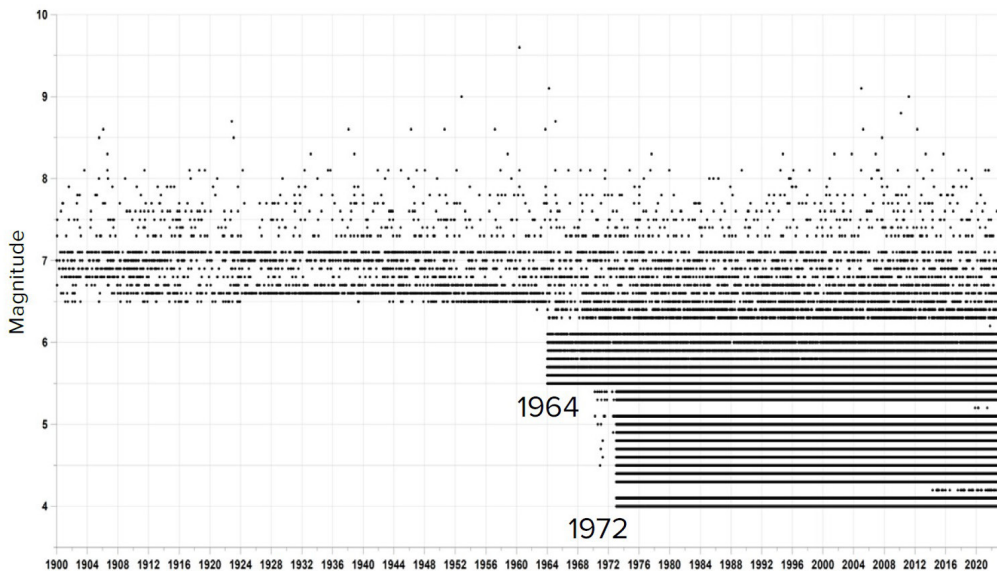


Fig. 5
Magnitudo sismica registrata nel tempo

I punti neri rappresentano terremoti di diversa magnitudo registrati in diversi anni. Prima del 1964, sono stati registrati solo terremoti di magnitudo pari o superiore a 6.5. A partire dal 1964, con l'introduzione di sensori più sensibili, sono stati documentati terremoti di 5.5 e superiori. Dal 1972, terremoti di 4.0 e superiori sono stati costantemente registrati, indipendentemente dalla posizione.

M5+ Earthquakes 1979-2023, ISC

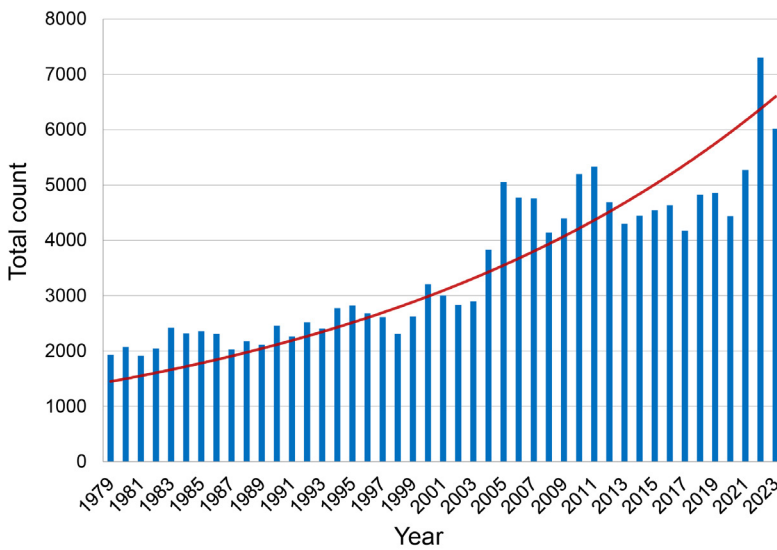


Fig. 6
Terremoti M5+ dal 1979 al 2023
Fonte: Database ISC.

Il set di dati è stato compilato utilizzando l'algoritmo di magnitudo massima, selezionando il valore di magnitudo più alto registrato nel database ISC per ciascun evento (vedi Appendice 1).

Inoltre, l'attività sismica vicino ai vulcani è in aumento, inclusi i supervulcani come Yellowstone (USA), Campi Flegrei (Italia), Taupo (Nuova Zelanda) e altri che hanno eruttato durante i precedenti cicli di 12.000 anni. Anche il numero totale di giorni di eruzione vulcanica è in aumento, accompagnato da eruzioni anomale. In questi eventi, la lava espulsa è surriscaldata e presenta una composizione atipica caratteristica del magma dagli strati del mantello più profondi.^{3,4,5,6,7}

Particolare attenzione è rivolta all'aumento dei terremoti a focalizzazione profonda che si verificano a profondità superiori a 300 km e talvolta raggiungono fino a 750 km sotto la

superficie terrestre. Questi eventi non hanno origine nella crosta terrestre ma nel mantello, dove il materiale tende generalmente a deformarsi in modo graduale piuttosto che fratturarsi. Questo rende la natura di tali terremoti molto insolita.

Date le pressioni e le temperature estreme a queste profondità, questi fenomeni possono essere intesi come potenti esplosioni paragonabili per energia alla detonazione simultanea di multiple bombe atomiche all'interno del mantello terrestre. Inoltre, i terremoti a focalizzazione profonda spesso innescano eventi sismici significativi nella crosta terrestre, amplificando il loro impatto distruttivo.^{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>

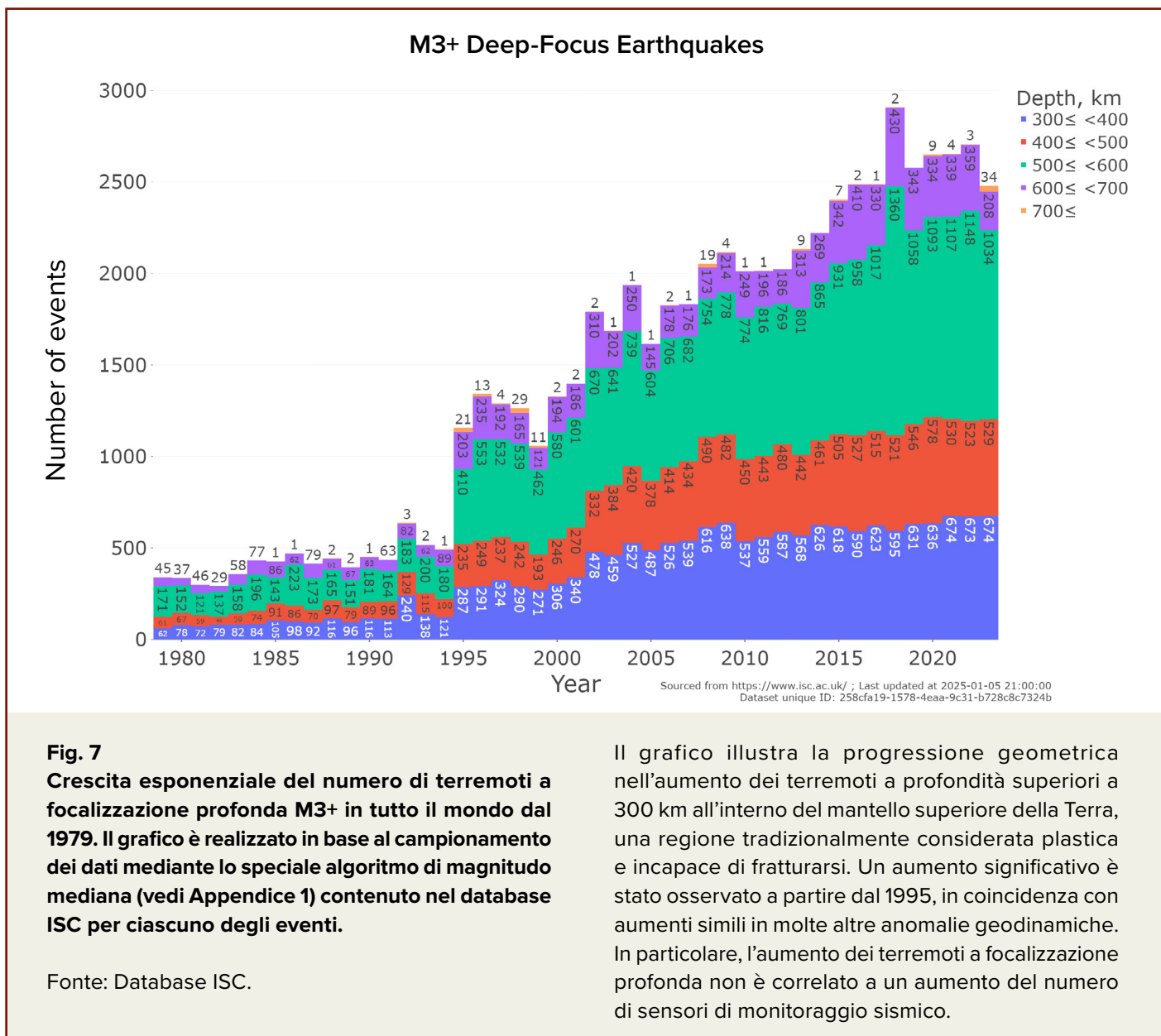
⁷D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports*, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>

⁸Mikhailova, R.S. (2014) "Forti terremoti nel mantello e la loro influenza nelle zone vicine e lontane", Servizio Geofisico dell'Accademia Russa delle Scienze. Disponibile all'indirizzo: <http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mihaylova.pdf>

⁹Mikhailova, R.S., Ulubieva, T.R. e Petrova, N.V. (2021) "Il terremoto dell'Hindu Kush del 26 ottobre 2015 con Mw=7,5, 10⁻⁷: sismicità precedente e sequenza di aftershock", *Terremoti dell'Eurasia settentrionale*, 24(2015), pp. 324-339. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.31>

Dal 1995, c'è stato un rapido aumento esponenziale del numero di terremoti a fuoco così profondo (Fig. 7, 8), in coincidenza con altre anomalie geodinamiche iniziate nello stesso periodo. L'aumento di queste esplosioni dentro il

mantello indica un aumento dell'energia all'interno delle profondità della Terra e un intensificato scioglimento del mantello, che potrebbe provocare eruzioni vulcaniche su larga scala.



M3+ Deep-Focus Earthquakes

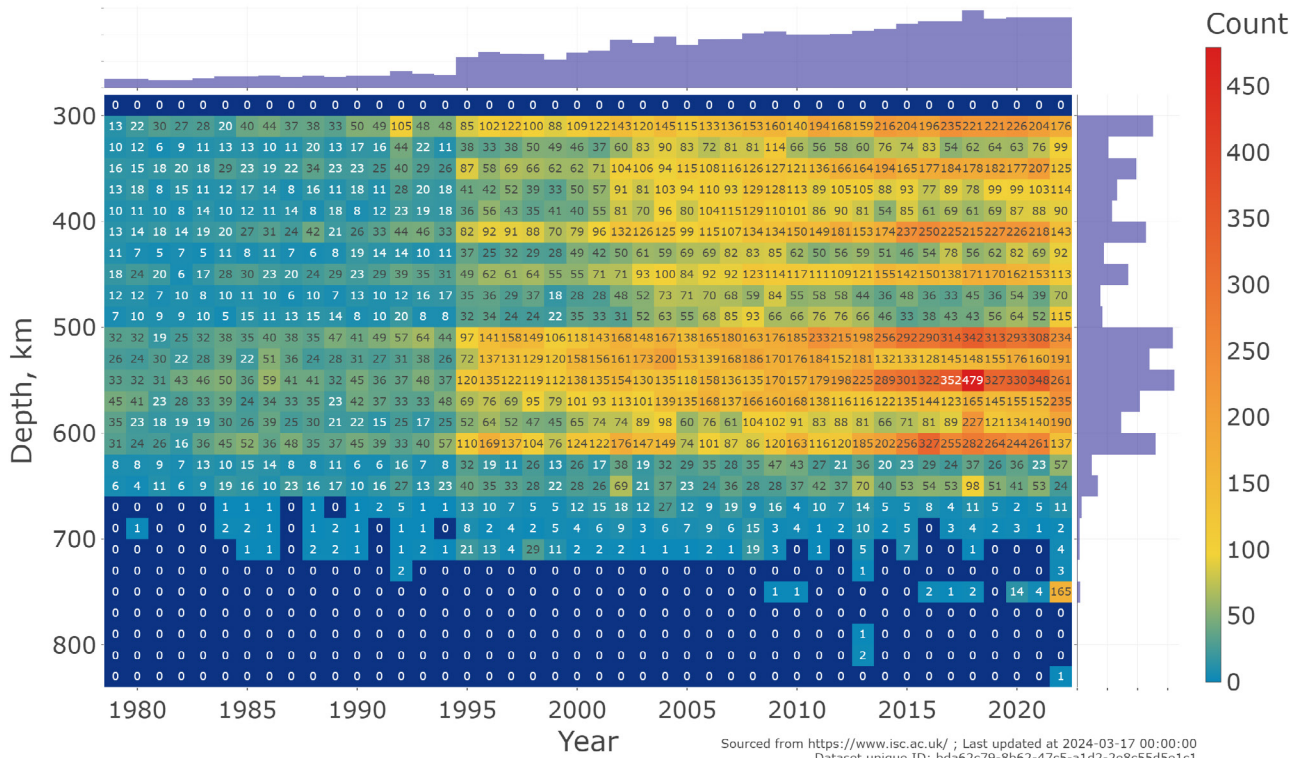


Fig. 8
Distribuzione dei terremoti a focalizzazione profonda M3+ per anno e profondità
 Fonte: Database ISC.

L'aumento dei terremoti a focalizzazione profonda indica lo scioglimento del mantello che viene riscaldato dal nucleo. A causa delle forze centrifughe, il magma fuso all'interno del mantello inizia a salire bruscamente verso la superficie terrestre. Questo movimento erode e riscalda la litosfera dall'interno ad un ritmo accelerato. L'ascesa del magma è direttamente responsabile dell'aumento del flusso geotermico dall'interno del pianeta e dell'attivazione di pennacchi di magma sotto i ghiacciai nell'Antartide Occidentale e nella Groenlandia centrale. Questo processo accelera significativamente lo scioglimento dei ghiacciai e del permafrost dal basso verso l'alto.

Oggi, l'oceano si sta riscaldando come mai prima d'ora, intensificando in modo significativo

eventi naturali estremi come inondazioni, uragani e cicloni tropicali. L'oceano svolge un ruolo cruciale nella regolazione del calore del pianeta perché può assorbire e ridistribuire il calore in eccesso, prevenendo conseguenze catastrofiche. Tuttavia, ora che il riscaldamento della Terra si sta intensificando a causa dell'attività geodinamica causata dai cicli astronomici, l'oceano ha perso la sua funzione di rimuovere il calore dalle profondità. Questo è accaduto a causa dell'inquinamento oceanico causato dall'uomo. I rifiuti di plastica si scompongono in microplastiche e nanoplastiche, riducendo la conducibilità termica dell'acqua (Fig. 9).

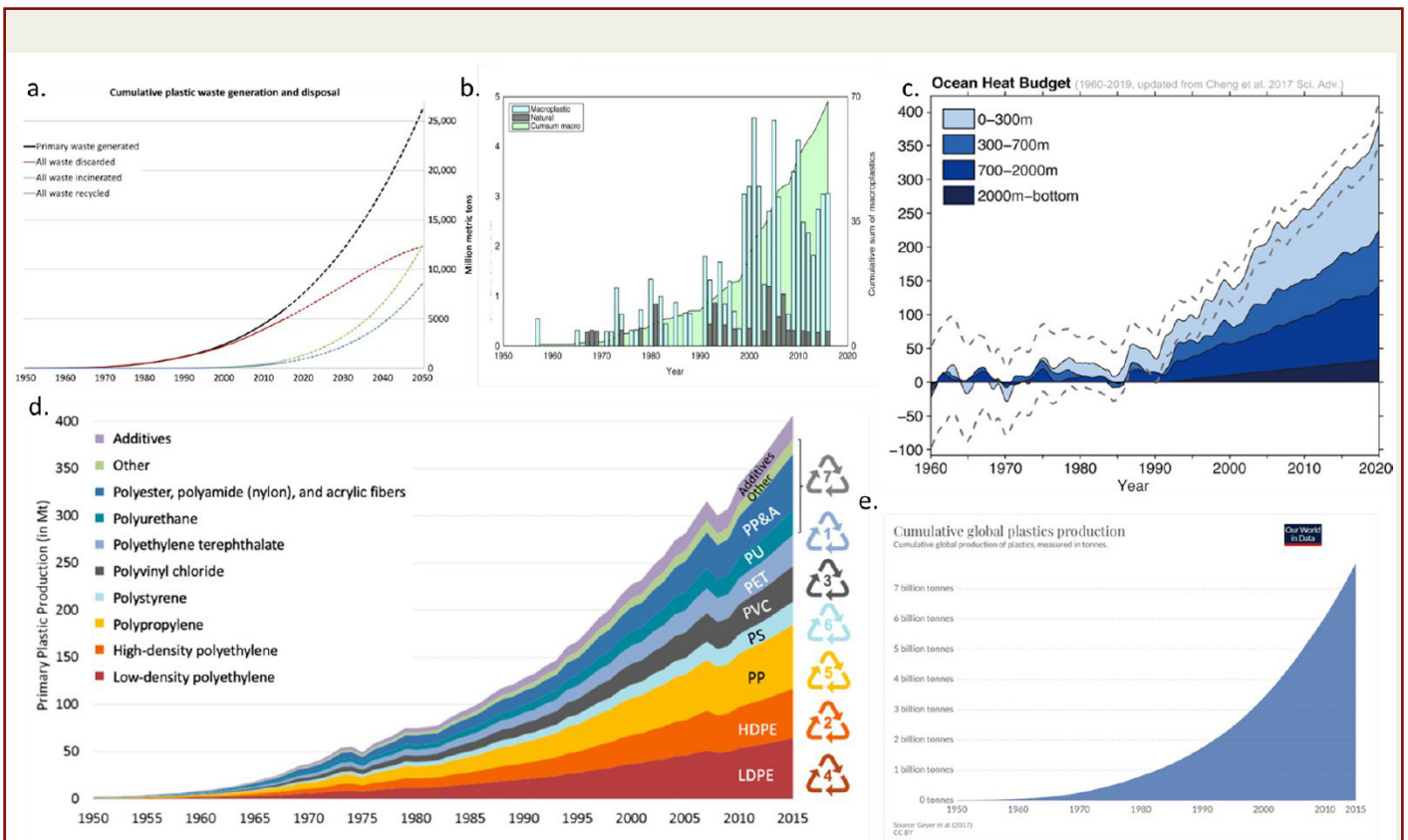


Fig. 9
Diagrammi delle variazioni della temperatura dell'oceano dal 1960 al 2019 e il loro confronto con i diagrammi di crescita della produzione di polimeri sintetici, il loro uso in vari settori dell'economia e lo smaltimento dei rifiuti di plastica nell'oceano (da varie fonti).

a. Produzione e smaltimento cumulativi di rifiuti di plastica

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

b. Somma cumulativa di macroplastica nell'oceano e conteggi annuali

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

c. Bilancio di calore dell'oceano dal 1960 al 2019

(Purkey and Johnson, 2010; c обновлением данных Cheng и др., 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>

d. Produzione di plastica primaria globale per tipo di polimero

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

e. Produzione globale cumulativa di plastica dal 1950

Fonte dei dati: Plastic Marine Pollution Global Dataset

L'aumento delle temperature dell'acqua si verifica non solo in superficie, ma in tutta la profondità e sul fondo dell'oceano. Il riscaldamento dell'oceano è causato dall'aumento del magma, che riscalda in particolare la crosta oceanica, che è più sottile e più vulnerabile della crosta continentale.

I dati storici delle carote geologiche e di ghiaccio indicano che la Terra ha affrontato cicli catastrofici simili ogni 12.000 anni.¹⁰ Ogni 24.000 anni, queste catastrofi planetarie sono state significativamente più intense, come evidenziato dagli studi sugli strati di cenere vulcanica e nei carotaggi di ghiaccio¹¹ (Fig. 10) e altre ricerche geocronologiche. Ora la Terra sta entrando in un tale ciclo. Tuttavia, il ciclo attuale è esacerbato da fattori antropogenici, come l'inquinamento degli oceani, che ha ulteriormente diminuito la capacità degli oceani di regolare il bilancio energetico della Terra.

Mentre gli oceani si riscaldano, i rifiuti di plastica si scompongono in microplastiche e nanoplastiche, che riducono ulteriormente la conduttività termica degli oceani. Questa perdita di conducibilità termica è di fondamentale importanza durante i periodi di intensa attività

geodinamica guidata da cicli astronomici. L'accumulo di energia in eccesso all'interno della Terra ha portato ad un aumento del numero di terremoti a focalizzazione profonda e alla rapida formazione di nuove camere magmatiche, intensificando l'instabilità del pianeta. Questo ciclo di retroazione accelera il riscaldamento e la destabilizzazione della Terra, spingendo il pianeta più vicino all'inevitabile distruzione.

La modellazione matematica indica che i sistemi economici e sociali del mondo potrebbero collassare entro i prossimi 4-6 anni a causa dei crescenti danni causati dai disastri climatici. L'aumento esponenziale degli eventi catastrofici minaccia di rendere la Terra inabitabile entro il prossimo decennio (Fig. 11). A differenza dei cicli precedenti, lo stato attuale del pianeta è esacerbato dall'inquinamento causato dall'attività umana, lasciando poche speranze per la sopravvivenza degli ecosistemi o della Terra stessa. **È importante capire che affrontare le questioni legate agli oceani può rallentare la progressione dei cataclismi, ma non fermarli del tutto.**

¹⁰Arushanov, M. L. (2023). Dinamiche climatiche: fattori spaziali. 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>

Eruzioni vulcaniche catastrofiche che si verificano con un ciclo di 12.000 anni

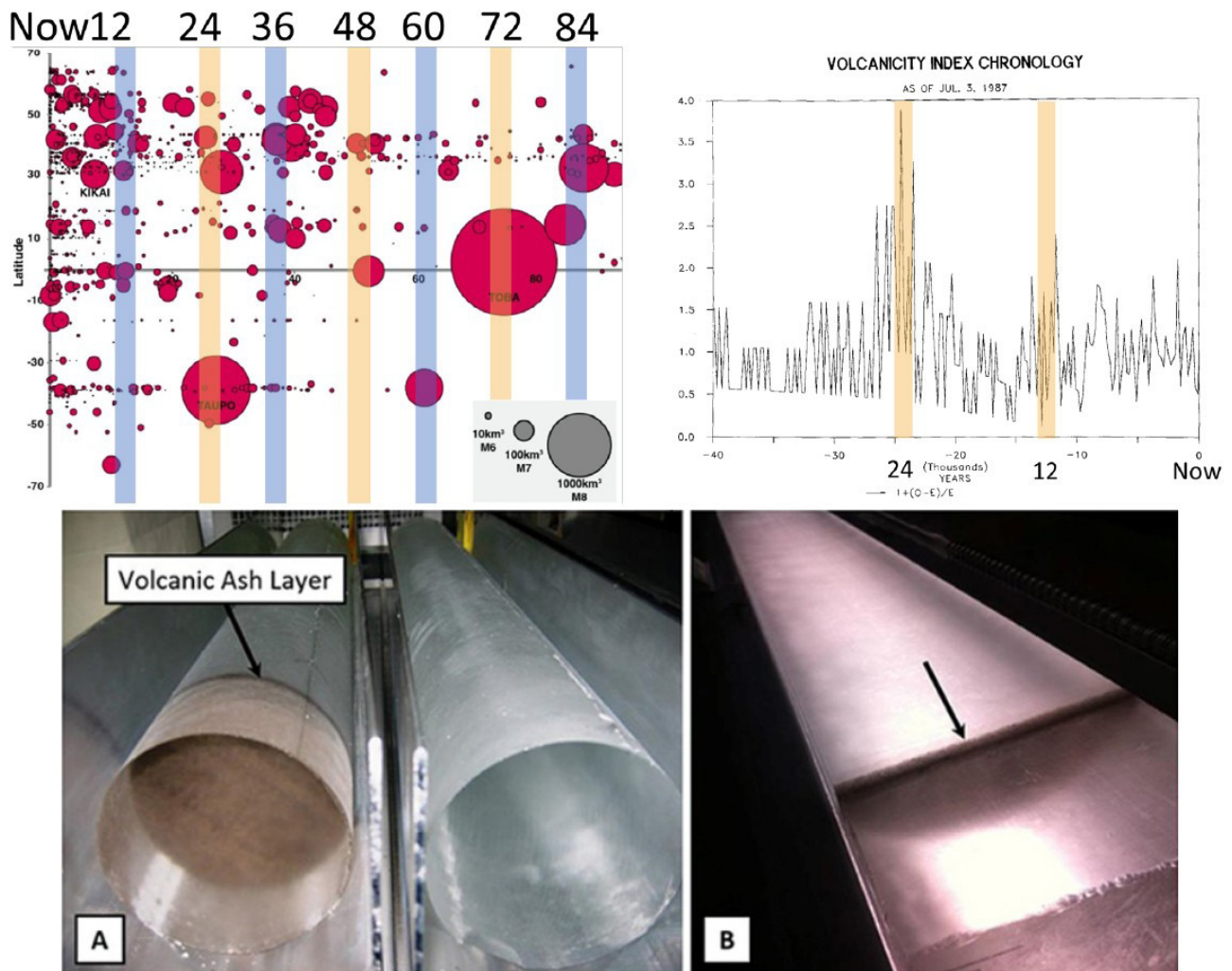


Fig. 10

Dati di ricerca sugli strati di cenere vulcanica delle eruzioni degli ultimi 100.000 anni nelle carote di ghiaccio dell'Antartide e dell'Artico, compilato da opere di vari autori.

Fonte: 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>

I grafici illustrano l'attività vulcanica catastrofica che si verifica ogni 12.000 anni, con eventi ancora più intensi ogni 24.000 anni (tenendo conto delle incertezze di datazione). Questi episodi catastrofici hanno portato a forti fluttuazioni di temperatura, disastri naturali, inverni vulcanici ed estinzioni di massa di specie. Molti supervulcani che sono esplosi durante i cicli passati hanno iniziato a mostrare attività anomala negli ultimi anni, in particolare dal 1995.

Progressione dei disastri crescenti, illustrata dai terremoti

M3+ Earthquakes Globally 1979-2024

volcanodiscovery.com

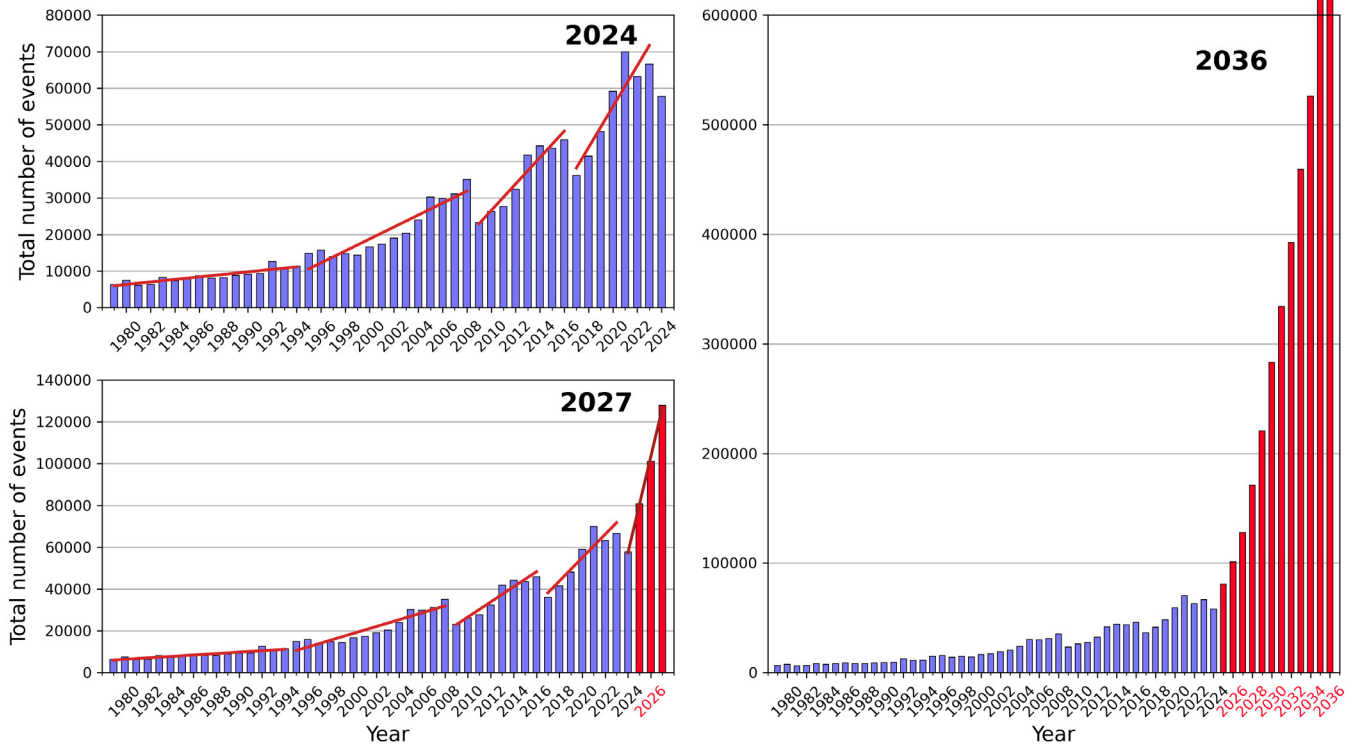


Fig. 11
Modello della crescita esponenziale del numero di cataclismi naturali sull'esempio dei terremoti fino al 2036

I grafici mostrano la progressione geometrica della frequenza e della grandezza dei terremoti in tutto il mondo in base alle tendenze attuali. Ad ogni fase successiva, il numero di terremoti triplica. Entro il

2028, si prevede che la Terra sperimenterà 1.000 terremoti al giorno con magnitudo superiore a 3,0, rispetto alla media attuale di 125 tali terremoti al giorno.

È altamente probabile che entro 6 anni, la Terra sperimenterà terremoti quotidiani distruttivi come quello in Turchia e Siria del 6 Febbraio 2023.

Questo rapporto affronta un'ulteriore minaccia rappresentata dai cambiamenti nel nucleo della Terra derivanti da un afflusso di energia esterna. Nel 1997-1998, gli scienziati, utilizzando i dati satellitari del Centro di studi di massa della Terra, hanno osservato un fenomeno senza precedenti: un improvviso spostamento del nucleo interno del pianeta. Di conseguenza, il nucleo si è spostato verso nord lungo una traiettoria dall'Antartide occidentale alla Siberia orientale e alla penisola di Taimyr nella Federazione Russa. Questo spostamento del nucleo ha causato una risalita incontrollata del magma in quella direzione, portando alla rapida ascesa di un massiccio pennacchio di magma sotto la Siberia.

Allo stato attuale, il Pennacchio Siberiano ha già raggiunto la base della crosta terrestre nella regione settentrionale del Cratone della Siberia

Orientale e ha iniziato a sollevare la placca. Ciò indica che il magma incandescente ha già iniziato a farsi strada bruciando verso la superficie. Un'eruzione incontrollata del Pennacchio Siberiano può portare all'estinzione globale, lasciando all'umanità nessuna possibilità di sopravvivenza. Secondo i calcoli, un'eruzione del genere sarebbe 1.000 volte più potente della più grande eruzione del supervulcano di Yellowstone. Eruzioni simili di un pennacchio di magma in Siberia si sono verificate 250 milioni di anni fa, causando la Grande estinzione del Permiano.

Questo rapporto delinea tre possibili scenari per l'evoluzione di questa situazione e propone misure per affrontare l'innalzamento del Pennacchio Siberiano e mitigare i rischi di una sua eruzione incontrollata.



Spostamento del nucleo verso la Siberia nel 1998

Nel 1997-1998, studiando il centro di massa terrestre via satellite, gli scienziati hanno registrato un fenomeno senza precedenti: uno spostamento del nucleo interno della Terra.^{12,13}

Di conseguenza, il nucleo del pianeta si è spostato verso nord, lungo la linea dall'Antartide Occidentale alla penisola di Taimyr a nord della Siberia Orientale (Fig. 12).

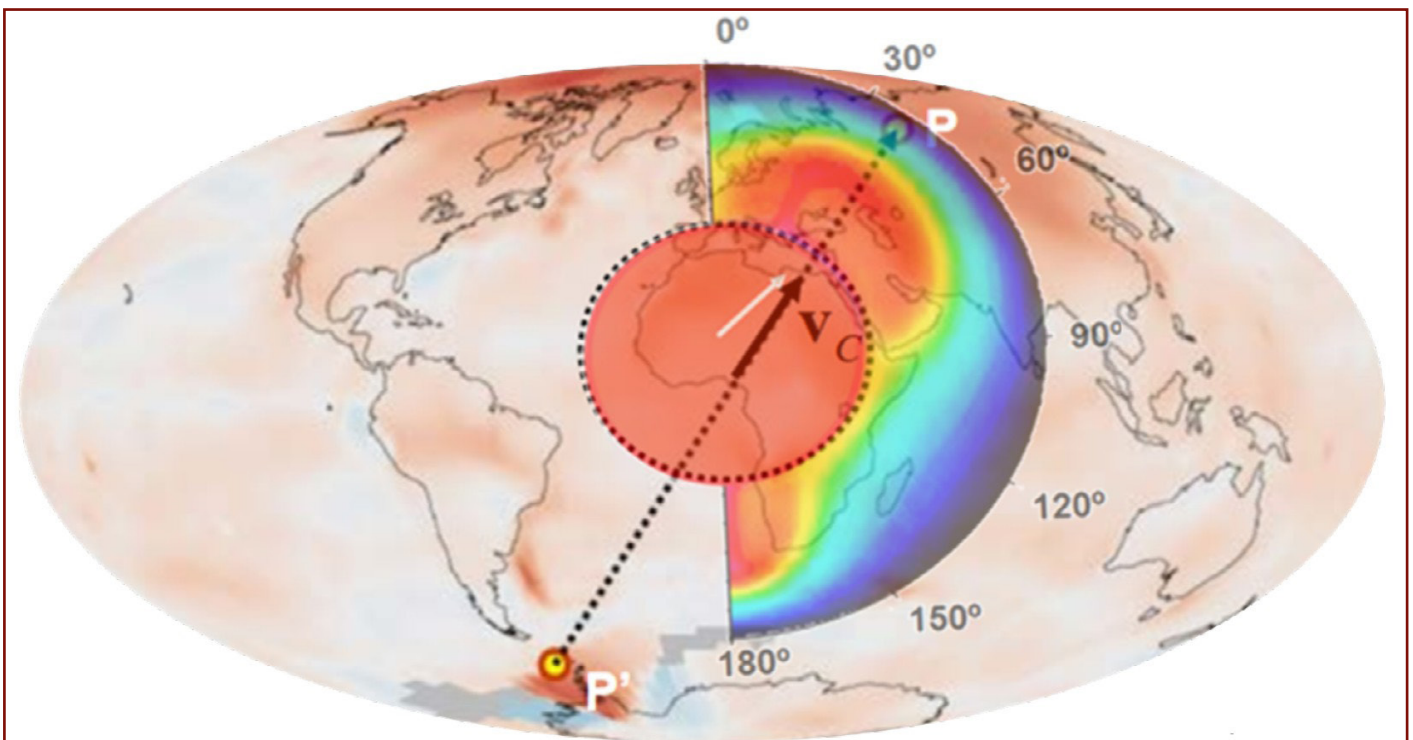


Fig. 12

Spostamento del nucleo nel 1997-1998 e onde termiche nel magma causate dallo spostamento del nucleo. (Barkin, Y. V.)

La mappa raffigura il vettore di spostamento del nucleo interno dall'Antartide occidentale alla Siberia orientale, verso la penisola di Taimyr. Lo schema è sovrapposto su una mappa di anomalie termiche atmosferiche.

Fonte: Implicazioni geofisiche degli spostamenti relativi e delle oscillazioni del nucleo e del mantello della Terra. Presentazione di Barkin, Y. V., Mosca, IFZ, OMTS. 16 Settembre 2014.

Barkin, Moscow, IFZ, OMTS. September 16, 2014.

¹² Barkin, Y. V. (2011). "Salti sincroni nell'attività dei processi planetari naturali nel 1997-1998 e il loro meccanismo unificato". In *Geologia dei mari e degli oceani: Atti della XIX Conferenza Scientifica Internazionale sulla Geologia Marina* (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>

Allo stesso tempo, quattro diverse squadre di ricerca hanno registrato in modo indipendente anormali cambiamenti nei vari parametri geofisici della Terra. Stando ai dati satellitari, un team di autori dell'Università Statale di Mosca e l'Istituto di Fisica della Terra dell'Accademia Russa di Scienze ha registrato uno spostamento del centro di massa della Terra nel 1998¹⁴ (Fig. 13).

Il Servizio Internazionale di Rotazione della Terra (IERS) ha registrato una forte accelerazione della rotazione del pianeta. Allo stesso tempo, alla stazione astronomica di Medicina in Italia, gli scienziati hanno registrato un improvviso cambiamento di gravità.¹⁵ Contemporaneamente, è stato osservato un brusco cambiamento nella

forma della Terra¹⁶, registrato utilizzando un sistema di telemetro laser dai satelliti statunitensi.

Secondo il dottore in Scienze fisiche e matematiche, il professor Yuri Barkin, Dottore in Scienze tecniche, il professor Gennadi Smolkov,¹⁷ Dottore in Scienze geografiche, il professor Mikhail Arushanov,¹⁸ Accademico dell'Accademia Russa delle Scienze e professore onorato dell'Università Statale Lomonosov di Mosca, Dottore in Scienze geologiche e mineralogiche Victor Khain,¹⁹ e molti altri ricercatori, lo spostamento del nucleo ha portato a cambiamenti in tutti i gusci della Terra.

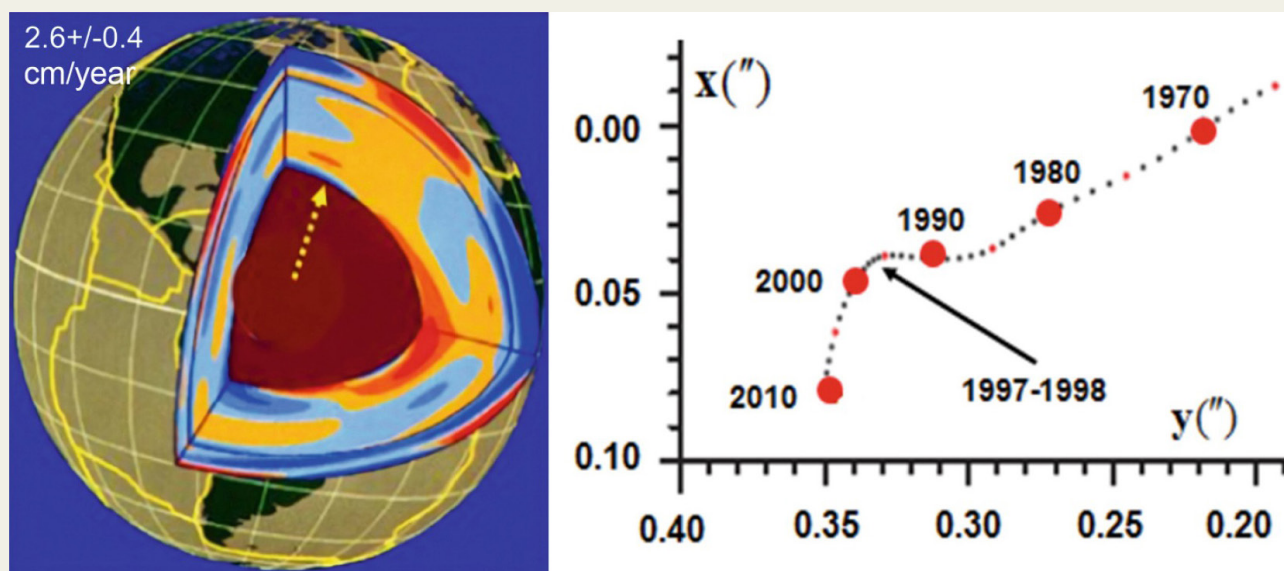


Fig 13

Struttura interna della Terra; la direzione della deriva secolare del centro di massa della Terra e la traiettoria del suo polo attraverso la superficie terrestre negli anni 1990-2010 con quasi 90 gradi di deviazione nel 1997-1998 verso il la penisola di Taimyr

Fonte: Smolkov, G. Y. (2020). Ricerca Eliogeofisica. Numero 25, 14-29.

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

Fonte del grafico: Barkin, Y. V., Klige, R. K. (2012)

¹⁴ Zotov, L. V., Barkin, Y. V., e Lyubushin, A. A. (2009). Il moto geocentrico e la sua geodinamica. Negli atti della conferenza "Geodinamica Spaziale e Modellazione dei Processi Geodinamici Globali" (pp. 98-101). Ramo siberiano di 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, Y. V., Smolkov, G. Y. (2013). Bruschi cambiamenti nelle tendenze dei fenomeni geodinamici e geofisici nel 1997-1998. Negli Atti della Conferenza russa sulla Fisica Solare-Terrestre (pp. 16-21). Irkutsk.

¹⁸ Arushanov, M. L. (2023). Cause dei cambiamenti climatici della terra come risultato dell'impatto cosmico, disperdendo il mito del riscaldamento globale antropogenico. *Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft*, 53, 4-14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979>

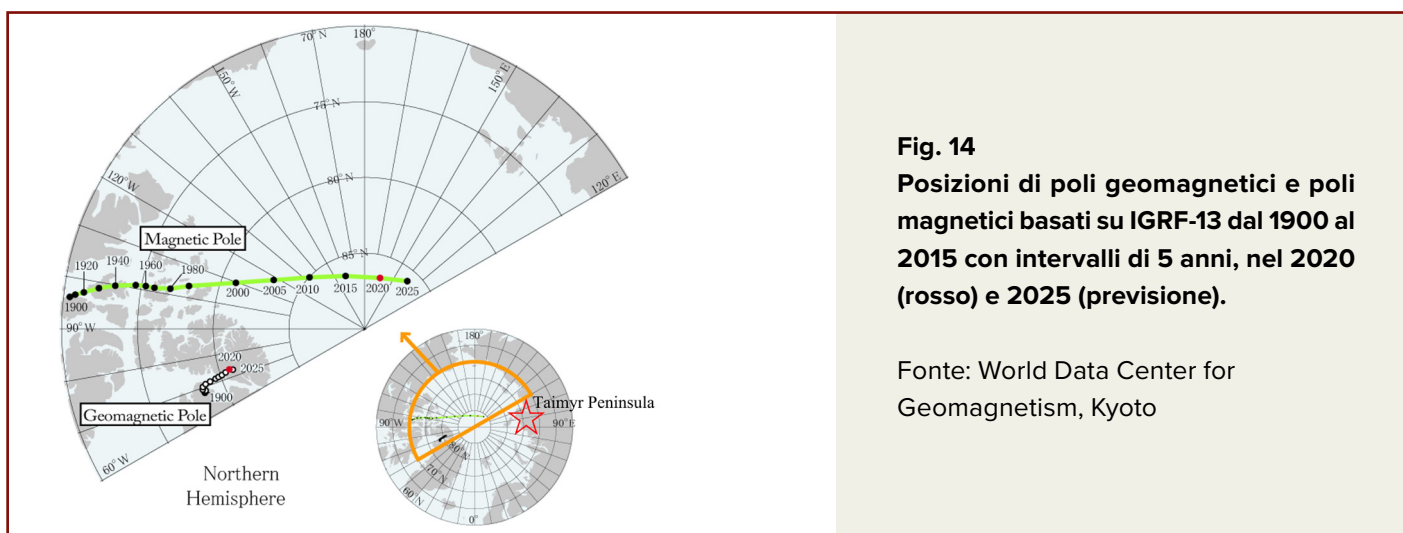
¹⁹ Comitato Internazionale GCGE GEOCHANGE. (2010). Cambiamenti ambientali globali: minaccia allo sviluppo della civiltà (Vol. 1). Londra: GCGE. ISSN 2218-5798

È importante notare che questa direzione si allinea con la brusca deriva del Polo Nord Magnetico iniziata nel 1995. Dall'inizio del secolo scorso, il polo si muoveva a una velocità media di 10 km/anno, ma poi improvvisamente aumentò la sua velocità fino a un massimo di 57 km/anno e ha cambiato la sua traiettoria, dirigendosi verso la Siberia e la penisola di Taimyr²⁰ (Fig. 3, 14).

Ciò indica che le condizioni per lo spostamento del nucleo verso la penisola di Taimyr hanno iniziato a formarsi già nel 1995, guidato dalla liquefazione del nucleo liquido esterno della Terra. Nel 2013, i ricercatori dell'Università di Leeds hanno stabilito che questi cambiamenti nel campo magnetico sono stati causati dal flusso accelerato di ferro liquido nel nucleo esterno della Terra²¹ (Fig. 15), che probabilmente è iniziata nel 1995.

Secondo i dati pubblicati, esiste una correlazione tra la frequenza delle inversioni del campo magnetico e l'intensità del magmatismo

del mantello.^{22,23,24} Allo stesso tempo, è noto che le inversioni di campo magnetico sono probabilmente correlate a processi che si verificano nel nucleo esterno vicino al confine nucleo-mantello.²⁵ La correlazione tra i cambiamenti nell'intensità del magmatismo del mantello e la frequenza delle inversioni del campo magnetico terrestre indica che disturbi nel campo magnetico terrestre si verificano nel nucleo esterno a causa di cambiamenti nell'intensità del trasferimento di calore alle basi dei pennacchi situati sul confine nucleo-mantello. La produzione di calore totale dei pennacchi è in crescita a causa sia dell'emergere di nuovi pennacchi che di un aumento della produzione di calore di pennacchi già attivi. Si può presumere che disturbi geodinamici nel nucleo esterno e nel mantello si verifichino durante i periodi di emersione di un pennacchio e di effusione in superficie.²⁶



²⁰Dyachenko, A. I., (2003). I poli magnetici della Terra. MCCME.

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

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

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

²⁴Zonenshain, L. P., Kuzmin, M. I. "Geodinamica profonda della Terra", "Geologia e Geofisica", 1993, Vol. 34 (4), pp. 3-13.

²⁵Dobretsov, N. L., Kirdyashkin, A. G., Kirdyashkin, A. A. "Geodinamica profonda". Novosibirsk, Casa editrice della Filiale Siberiana dell'Accademia Russa delle Scienze, GEO, 2001, 408 p.

²⁶Kirdyashkin, A. A., Kirdyashkin, A. G. "Interazione di un Pennacchio Termochimico con i flussi Convettivi del Mantello e la sua Influenza sulla Fusione del Mantello e sulla Ricristallizzazione", "Geologia e geofisica", 2013, Vol. 54, n. 5, pp. 707-721.

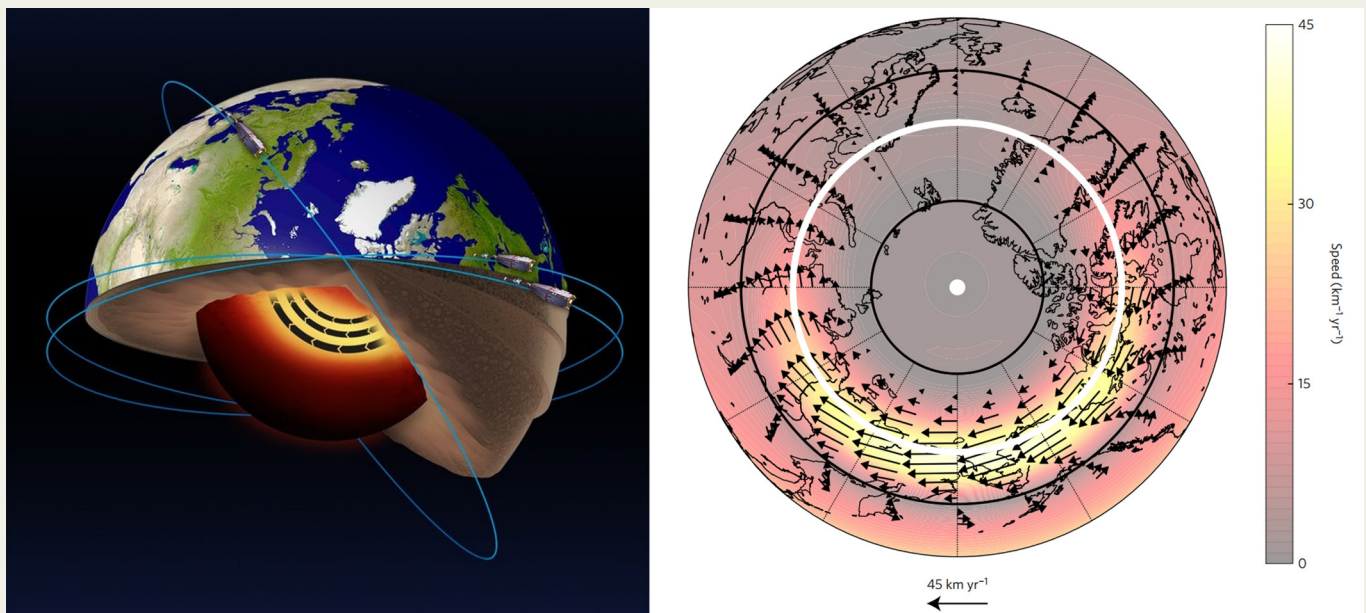


Fig. 15

L'analisi dei dati satellitari dell'ESA Swarm ha rivelato la presenza di una corrente a getto nella parte di ferro liquido del nucleo terrestre ad una profondità di 3000 km sotto la superficie, e anche che questa corrente a getto sta accelerando.

Fonte: ESA

Livmore, 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>

Pertanto, l'attuale deriva del Polo Nord magnetico verso la penisola di Taimyr può essere un'ulteriore prova di cambiamenti nel nucleo liquido esterno della Terra e di una rapida risalita del pennacchio dal confine nucleo-mantello sotto la Siberia.

Così, come risultato dell'influenza cosmica esterna sul nucleo della Terra nel 1995, il nucleo interno ha iniziato a riscaldarsi. Il nucleo esterno ha iniziato la fusione, che ha portato alla rapida accelerazione della deriva del Polo Nord magnetico. La liquefazione del nucleo esterno ha creato le condizioni per lo spostamento del nucleo verso la Siberia e la penisola di Taimyr nel 1997-1998. Secondo l'ipotesi proposta dal Dott.

Yuri V. Barkin, lo spostamento del nucleo ha causato un trasferimento di calore asimmetrico verso la Siberia (Fig. 16). È fondamentale notare che il trasferimento di calore all'interno del mantello avviene principalmente attraverso la miscelazione convettiva. Ciò suggerisce che lo spostamento del nucleo abbia innescato principalmente l'ascesa del magma verso la Siberia. Più tardi, in questa parte della Siberia si è cominciato a osservare un riscaldamento atmosferico anormale, e questo riscaldamento aumenta ogni anno.

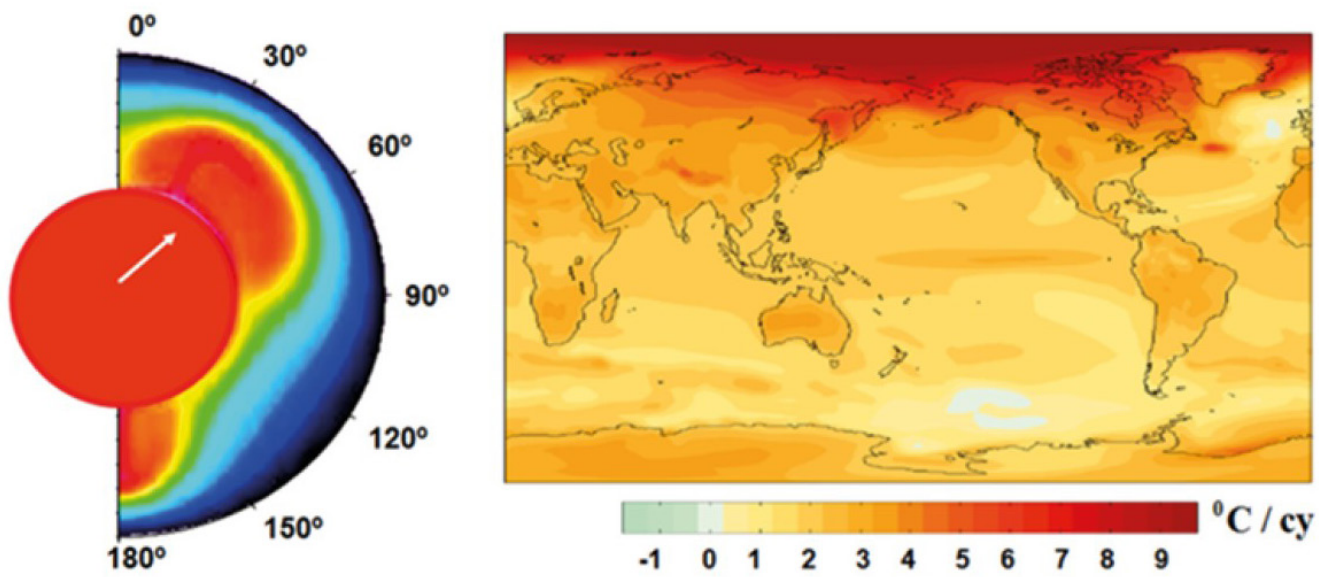


Fig. 16

Spostamento relativo forzato del nucleo e del mantello e lo schema di fornitura di calore asimmetrico agli strati superiori del mantello (a sinistra). Tendenze lineari del riscaldamento superficiale (in °C per secolo) secondo i dati NCAR CCSM3 mediati secondo uno scenario speciale http://www.realclimate.org/bitz_fig3.png) (a destra).

Fonte: Barkin, Y.V. (2009). Cambiamenti ciclici e inversivi del clima negli emisferi settentrionale e meridionale della Terra // Geologia dei mari e degli oceani: Atti della XVIII Conferenza Scientifica Internazionale (Scuola) di Geologia Marina. Vol. III. — Mosca: GEOS, 2009. pp. 4–8.

La Siberia e l'Artico Siberiano si stanno riscaldando 3-4 volte più velocemente del resto del mondo

Secondo varie organizzazioni, il territorio della Russia, in particolare la regione artica, sta vivendo un riscaldamento estremo.

Come risulta dai dati forniti dagli scienziati del gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC) per il 2021, la Russia si sta riscaldando tre volte più velocemente del resto del mondo e le sue regioni Artiche e Siberiane si stanno riscaldando quattro volte più velocemente della media globale.

Nel 2022, Igor Shumakov, capo di Roshydromet, ha citato i dati dell'Organizzazione meteorologica mondiale²⁷ che indicano che il territorio della Russia si sta riscaldando a 2,5 volte più velocemente rispetto al tasso globale, con la regione polare settentrionale del paese che ha registrato gli aumenti di temperatura

più rapidi, specialmente negli ultimi decenni. La Siberia è tra le regioni che subiscono il riscaldamento più intenso a livello globale (Fig. 17), una tendenza senza precedenti negli ultimi 7.000 anni, come ricostruito da studi dendroclimatici.²⁸

Il Woodwell Climate Research Center (WCRC)²⁹ degli Stati Uniti ha condotto uno studio su larga scala per valutare come il cambiamento climatico abbia influenzato le temperature, l'umidità del suolo, lo spessore della copertura nevosa, i livelli di precipitazioni e altri parametri climatici significativi in varie regioni dell'Artico. Per fare questo, gli scienziati hanno combinato e sistematizzato i dati raccolti tramite satelliti, aerei, droni e stazioni meteorologiche a terra negli ultimi 40 anni.

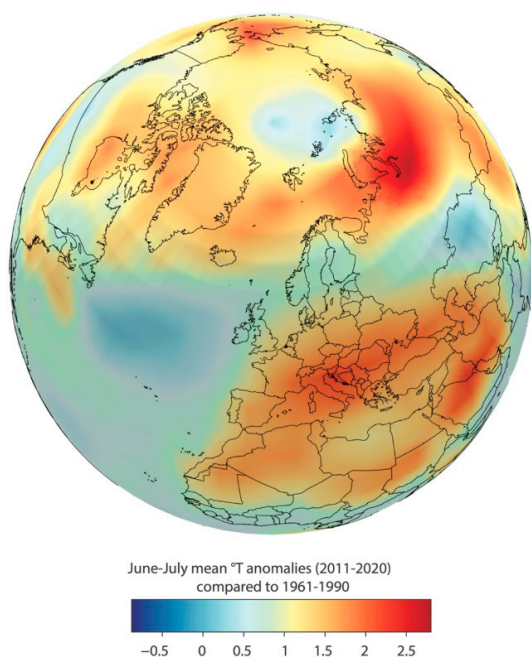


Fig. 17
Anomalie medie di temperatura in Giugno-Luglio per l'emisfero settentrionale (penisole di Yamal e Taimyr) durante l'ultimo decennio di osservazioni (2011-2020). Le temperature sono espresse come anomalie rispetto al clima di base del 1961-1990 usando il set di dati del HadCRUT.5.

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

²⁷TASS. (Gennaio, 2024). Il territorio della Russia si sta riscaldando 2,5 volte più velocemente del resto del pianeta. Agenzia di stampa TASS. <https://tass.ru/obschestvo/16009287>

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

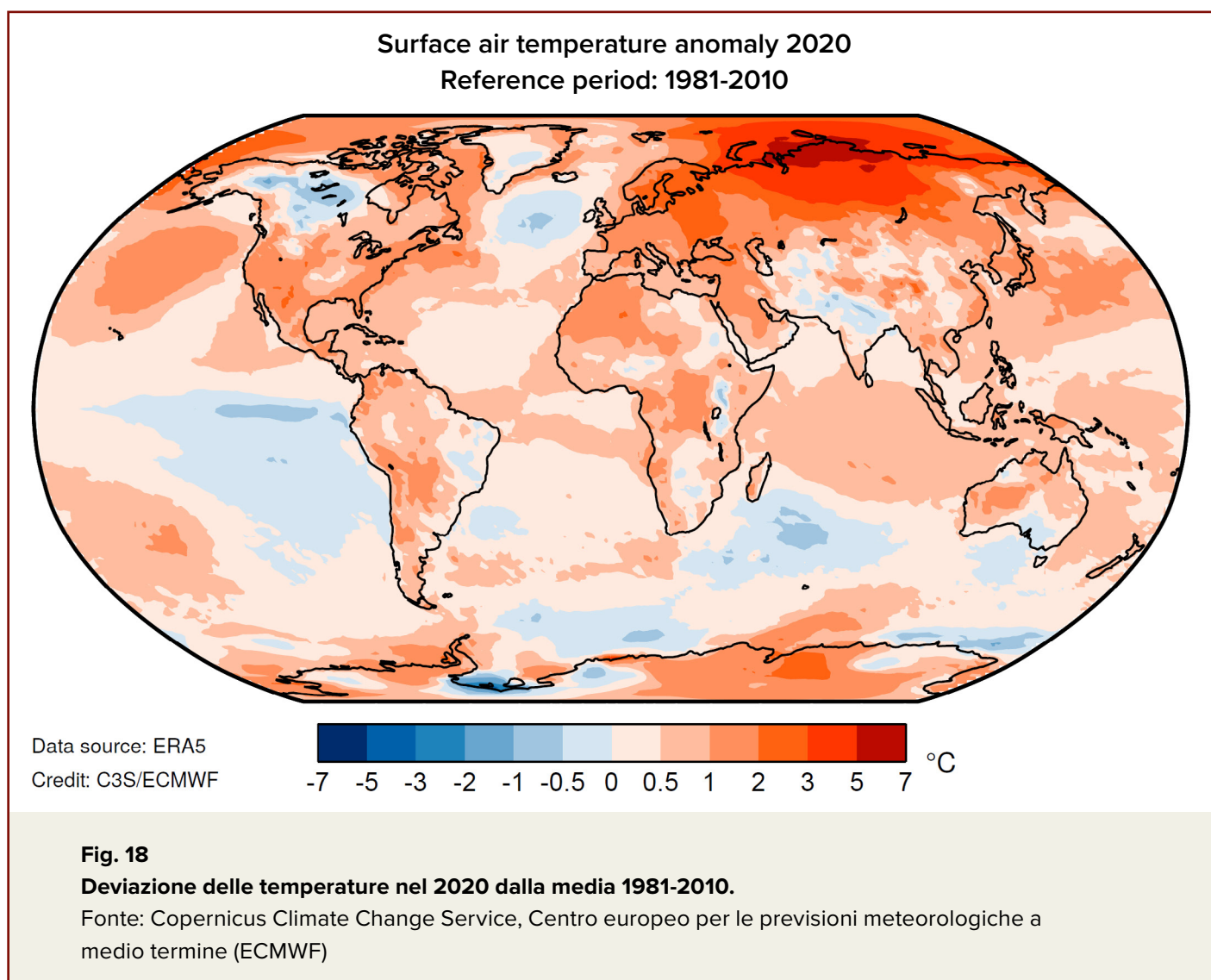
²⁹Watts, J. D., Potter, S., Rogers, B. M., Virkkala, A.-M., Fiske, G., Arndt, K. A., et al. (2025). Regional hotspots of change in northern high latitudes informed by observations from space. *Geophysical Research Letters*, 52, e2023GL108081. <https://doi.org/10.1029/2023GL108081>

L'analisi successiva di questi dati ha permesso ai ricercatori di identificare circa due dozzine di focolai climatici. Il riscaldamento più intenso ha colpito le regioni polari e centrali della Siberia Orientale, dove le temperature medie annuali sono aumentate di 1,1 gradi Celsius ogni decennio, che è diverse volte superiore al tasso di riscaldamento globale. Le temperature sono aumentate ancora più velocemente sulla penisola di Taimyr: 1,7 gradi Celsius per decennio. Allo stesso modo, le temperature nella taiga siberiana sono aumentate ad un tasso di 0,6 gradi Celsius per decennio dalla fine degli anni '80.

Le ondate di calore in Siberia hanno raggiunto nuovi livelli allarmanti negli ultimi anni, in particolare nel 2020, quando le temperature

sono aumentate bruscamente in tutta la regione (Fig. 18).

Le temperature in Siberia sono state più di 5°C sopra la media da Gennaio a Giugno, con anomalie che raggiungono fino a 10°C sopra la media a Giugno (rispetto alla linea di base 1981-2010). Questo periodo eccezionalmente caldo ha battuto i record di calore locali, anche alla stazione meteorologica di Verkhoyansk, che ha registrato un massimo storico di +38°C il 20 Giugno (Fig. 19). Il servizio meteorologico russo ha dichiarato che questa temperatura è stata la più alta mai registrata a nord del Circolo Polare Artico.



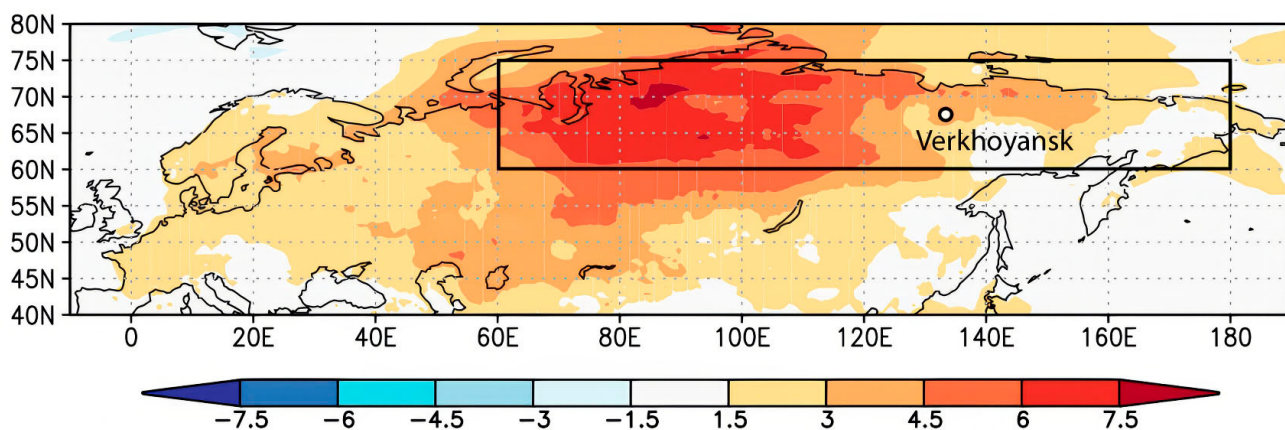


Fig. 19

Calore siberiano prolungato: temperature medie da Gennaio a Giugno 2020 rispetto alla norma (1981-2010) nella regione siberiana e la posizione della città di Verkhoyansk, dove è stata osservata la temperatura record oltre Circolo Polare Artico di +38°C a Giugno.

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

Queste ondate di calore non persistono continuamente in Siberia, ma si verificano in uno schema pulsante perché le inclusioni di magma che causano le ondate di calore hanno un carattere ondulatorio. Nell'atmosfera in cui le masse d'aria si muovono e si mescolano liberamente, le ondate di calore possono diminuire nel giro di pochi mesi come è accaduto nel 2020, a differenza delle ondate di calore negli ambienti acquatici.

Secondo la ricerca del 2022, l'Artico Siberiano si sta riscaldando quasi quattro volte più velocemente della media globale, un rapporto superiore a quello precedentemente previsto nei modelli climatici e che ha sorpreso gli scienziati³⁰ (Fig. 20).

In particolare, questo riscaldamento artico si sta verificando specificamente nella regione della penisola di Taimyr. Questa anomalia nella zona oceanica della Siberia può essere spiegata dalla crosta oceanica più sottile che conduce il calore in modo più efficiente e dalla maggiore capacità termica dell'acqua rispetto all'atmosfera. L'acqua dell'oceano, quindi, assorbe e trattiene intensamente il calore dal pennacchio di magma ascendente, anche se il pennacchio sta salendo sotto la crosta continentale a una distanza relativa dalla costa.

³⁰Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

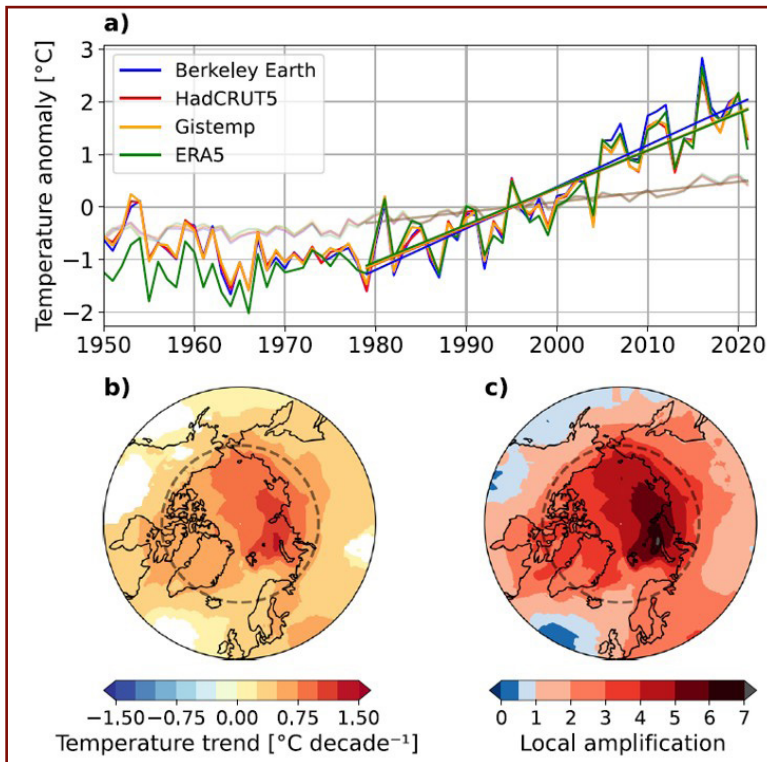


Fig. 20

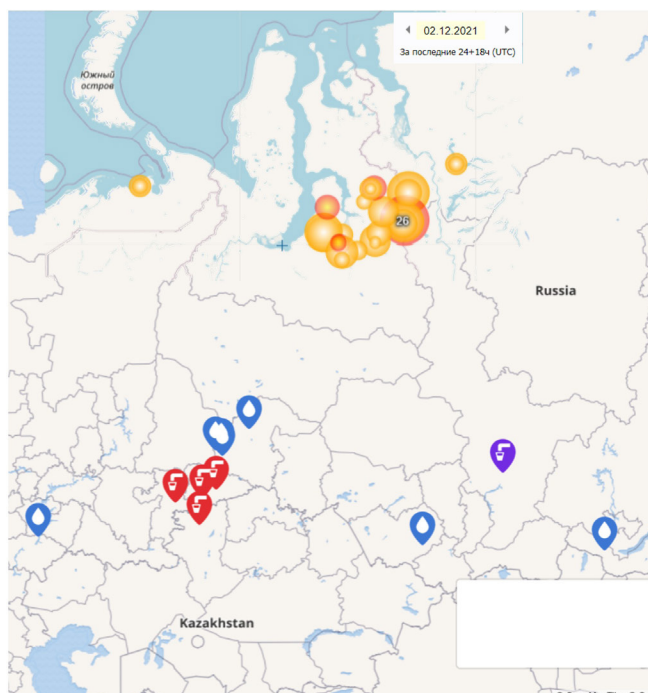
Evoluzione media annuale della temperatura nell'Artico. a) Anomalie medie annue della temperatura nell'Artico (66,5°–90°N) (colori scuri) e globalmente (colori chiari) durante il periodo 1950-2021 derivate dai vari set di dati osservativi. Le anomalie di temperatura sono state calcolate rispetto al periodo standard di 30 anni del 1981-2010. La linea tratteggiata in (b) e (c) rappresenta il Circolo Polare Artico (66,5°N di latitudine).

Fonte: 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>

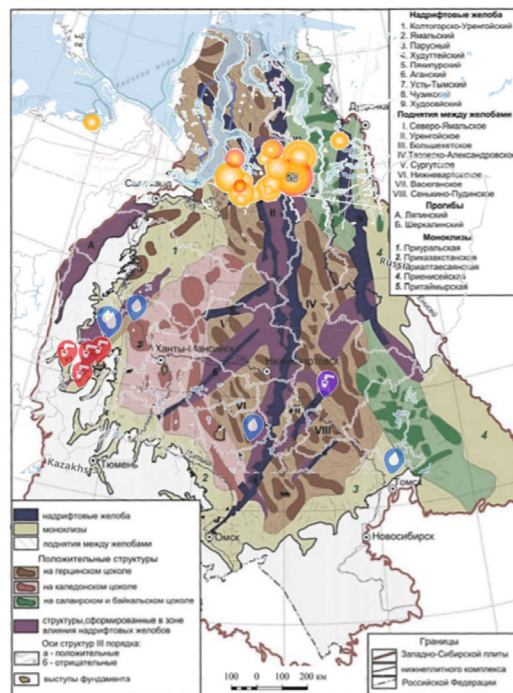
Segni indiretti della risalita del Pennacchio Siberiano

L'intrusione del pennacchio di magma nella crosta terrestre sotto la Siberia sta causando non solo il riscaldamento atmosferico, ma anche una serie di altre anomalie: il permafrost si sta sciogliendo dal basso verso l'alto; l'attività sismica nella regione è in aumento; l'acqua calda sta salendo in superficie, causando l'ebollizione dei pozzi, e incendi senza precedenti sono scoppiati in tutta la Siberia, anche sotto la neve.

La massima localizzazione degli incendi sotto la neve ha iniziato a manifestarsi negli ultimi anni nel sud delle penisole di Taimyr, Yamal e Gyda nella regione polare. Un fattore importante è che gli "incendi zombie" — incendi sotto la neve — e l'acqua bollente nei pozzi si verificano sopra le aree di faglie profonde (Fig. 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]"

Fig. 21

Мappa che mostra la localizzazione degli incendi invernali sotto la neve oltre il Circolo polare Artico nel 2021



Con fotografie di incendi sotto la neve nella regione di Sverdlovsk

Alle latitudini settentrionali, le emissioni di metano e idrogeno dal sottosuolo stanno aumentando, il numero di crateri da esplosioni di gas naturale sta crescendo e il vulcanismo del fango si sta intensificando sulla piattaforma artica. Il riscaldamento dal basso provoca la degradazione del permafrost e la distruzione degli idrati di gas, che porta a un rilascio di gas, esplosioni di crateri e un aumento

del vulcanismo del fango. Il gas rilasciato dall'interno del pianeta influenza lo stato dell'atmosfera, causando ulteriori anomalie termiche, geochimiche ed elettromagnetiche. Consideriamo questi processi in modo più dettagliato.

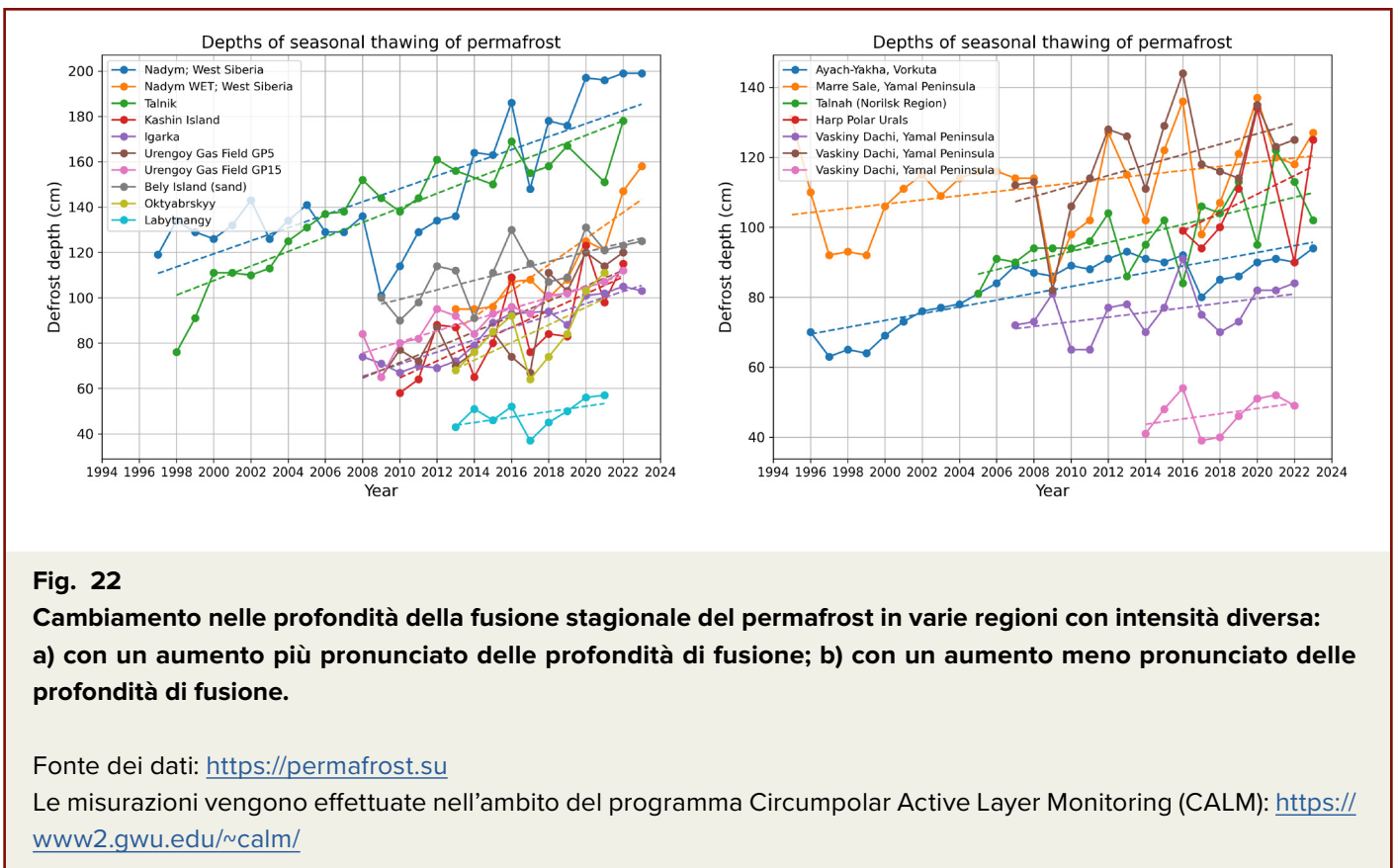
Fusione del Permafrost

Un altro indicatore di calore geotermico aggiuntivo proveniente dal pennacchio del mantello è la condizione del permafrost. Gli autori del rapporto hanno analizzato i dati sulla profondità dello scioglimento stagionale del permafrost in Russia dal 1994 al 2023. Il database è stato compilato sulla base di misurazioni effettuate nell'ambito del programma *Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM)* osservando la risposta dello strato attivo e del permafrost vicino alla superficie. Il database è disponibile sul sito permafrost.su.

Attualmente, ci sono 58 siti in Russia che monitorano il permafrost tramite una metodologia

standardizzata, e 46 di questi siti eseguono misurazioni da più di 10 anni, rendendo possibile l'identificazione delle tendenze a lungo termine. L'analisi del set di dati ha permesso ai ricercatori di individuare i siti in cui c'è una tendenza costante all'aumento della profondità di fusione, il che indica un ulteriore riscaldamento in quest'area.

Sono stati identificati due gruppi di dati: siti con una tendenza più pronunciata di aumento della fusione a profondità da 40 cm a 200 cm (Fig. 22, a) e siti con un tasso meno intenso di permafrost che si scioglie a profondità da 40 cm a 140 cm (Fig. 22, b).



Per chiarezza, tutti i punti monitorati sono stati mappati e contrassegnati rispettivamente in arancione e giallo (Fig. 23). È interessante notare che questi punti sono concentrati principalmente in una certa regione: nel nord della Siberia occidentale, nella penisola di Yamal e a sud delle penisole di Gyda e Taimyr.

Tale localizzazione delle aree di massima fusione del permafrost corrisponde all'area di ridotte velocità delle onde sismiche nel mantello, nella presunta zona di diffusione della testa del pennacchio di magma. Questo, a sua volta, è la causa dell'aumento delle temperature del suolo, anche all'interno dello strato congelato.

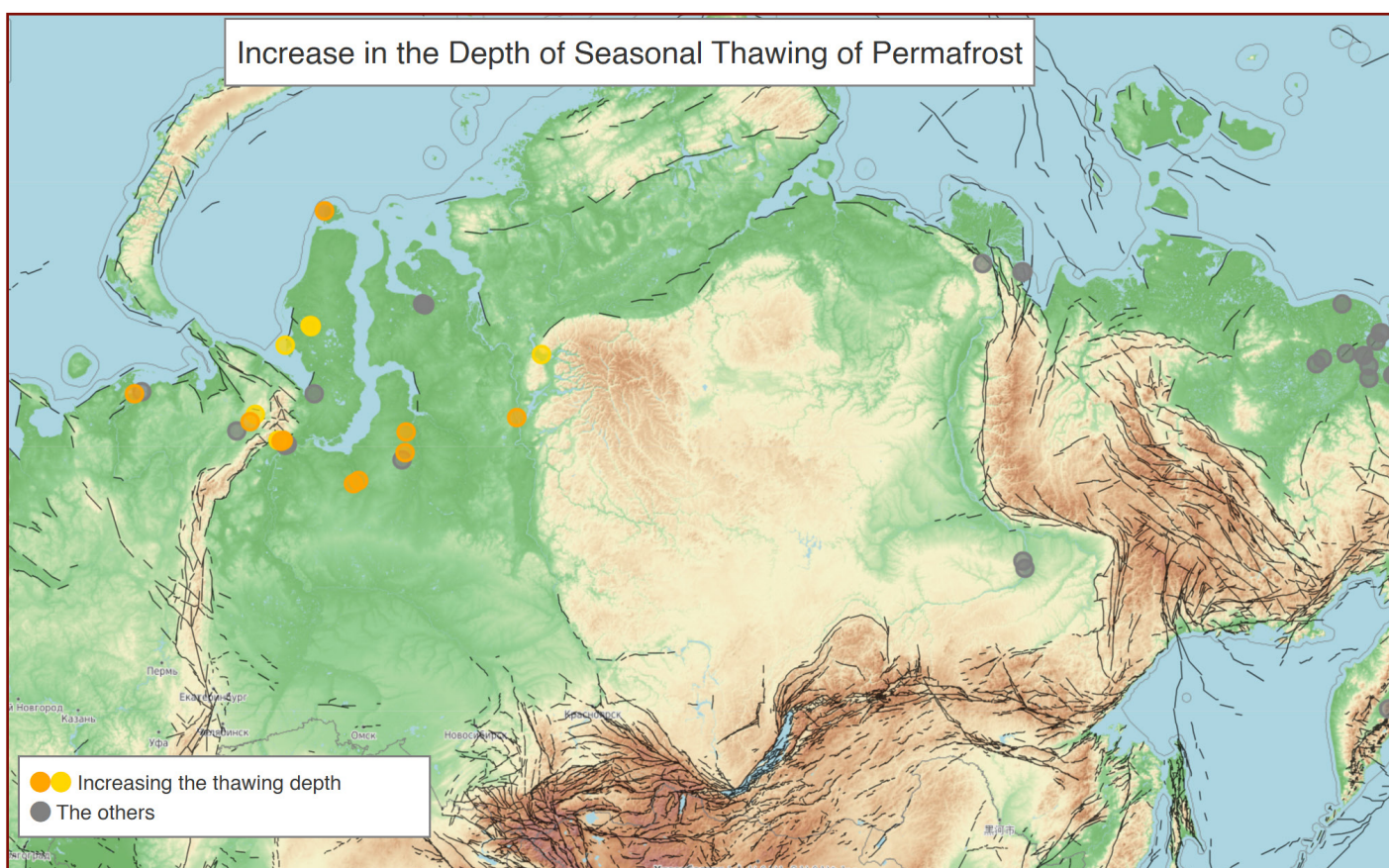


Fig. 23

Luoghi con maggiori profondità di fusione stagionale del permafrost. I siti di misurazione sono contrassegnati da punti: in grigio — luoghi senza un notevole aumento della fusione stagionale, in giallo — luoghi in cui le profondità di fusione stanno aumentando.

Fonte dei dati: <https://permafrost.su>

Le misurazioni vengono effettuate nell'ambito del programma Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM): <https://www2.gwu.edu/~calm>

Manifestazioni di vulcanismo di fango

Il riscaldamento aggiuntivo dovuto all'innalzamento del magma provoca la degradazione del permafrost e influisce sugli idrati di gas conservati nei terreni, liberando grandi volumi di gas contenuti al loro interno. Inoltre, il gas migra dai depositi di gas e dalle acque di riserva altamente sature di gas, riducendo le proprietà elastiche e di resistenza dei suoli, promuovendo la liquefazione delle argille e portando a possibili processi di vulcanismo del fango. Il vulcanismo del fango è un processo geologico di eruzione di una miscela di gas, acqua e materiale clastico

attraverso fessure nella crosta terrestre sotto l'influenza della pressione geostatica interna.

Questi processi sono stati scoperti dai ricercatori dell'Accademia Russa delle Scienze (RAS) nella penisola artica di Yamal³¹. A seguito di un complesso di studi geologici e geofisici che hanno utilizzato i dati del telerilevamento della Terra tra il 2014 e il 2022, sono state identificate oltre 3.000 aree di potenti emissioni di gas con formazione di crateri sul fondo dei laghi, dei fiumi e della parte costiera del Mare di Kara (Fig. 24).

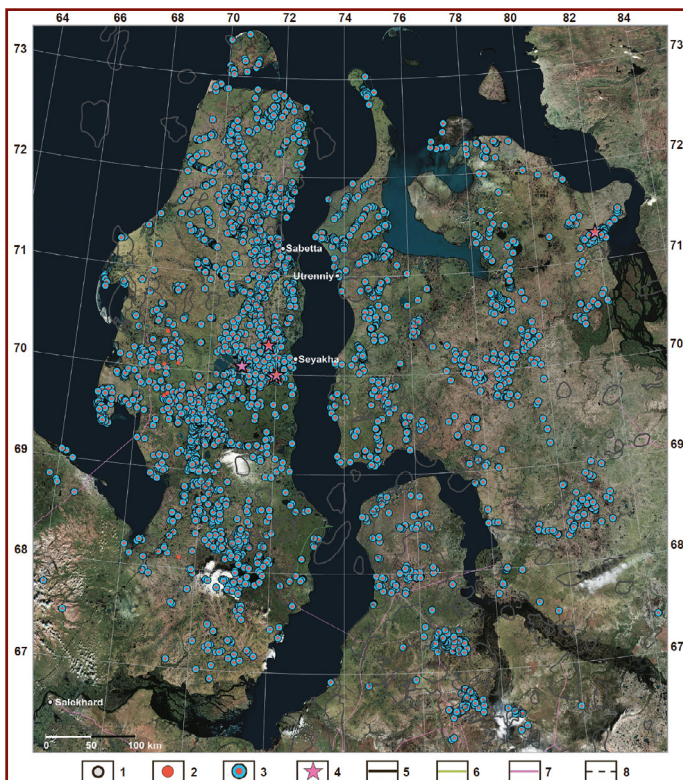


Fig. 24

Distribuzione di potenti zone di esplosione di gas nel nord della Siberia Occidentale. Segni: 1 — insediamenti, 2 — crateri isolati di esplosioni di gas, 3 — crateri di esplosioni di gas sul fondo dell'acqua, 4 — manifestazioni vulcaniche di fango, 5 — contorni di giacimenti di petrolio e gas, 6 — oleodotti, 7 — gasdotti, 8 — ferrovia. La base di mappa è un mosaico di immagini satellitari di ESRI

Fonte: Bogoyavlensky, V. I., Nikonov, R. A. e Bogoyavlensky, I. V. Nuovi dati sul degassamento intensivo della Terra nell'Artico nel nord della Siberia Occidentale: laghi termokarst con crateri di esplosione di gas e vulcani di fango. AEE 13, 353-368 (2023). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

³¹ Bogoyavlensky, V. I., Nikonov, R. A. e Bogoyavlensky, I. V. Nuovi dati sul degassamento intensivo della Terra nell'Artico nel nord della Siberia Occidentale: laghi termokarst con crateri di esplosione di gas e vulcani di fango. AEE 13, 353-368 (2023). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

Nel 2022-2023, i dati di telerilevamento hanno rivelato per la prima volta grandi strutture vulcaniche di fango sui fondali dei laghi termokarst Labvarto e Yambuto, esibendo occasionalmente un vulcanismo attivo di fango³² (Fig. 25). Un lago termokarst è uno specchio d'acqua formato dallo scongelamento del permafrost. Quindi, non solo lo scongelamento del lago, ma anche la liquefazione

dell'argilla in profondità sotto di esso indica una fonte di calore profonda.

Secondo gli autori dello studio, tali distinte strutture vulcaniche di fango sui fondali dei laghi termokarst non erano state precedentemente documentate in tutta la regione Circumartica.

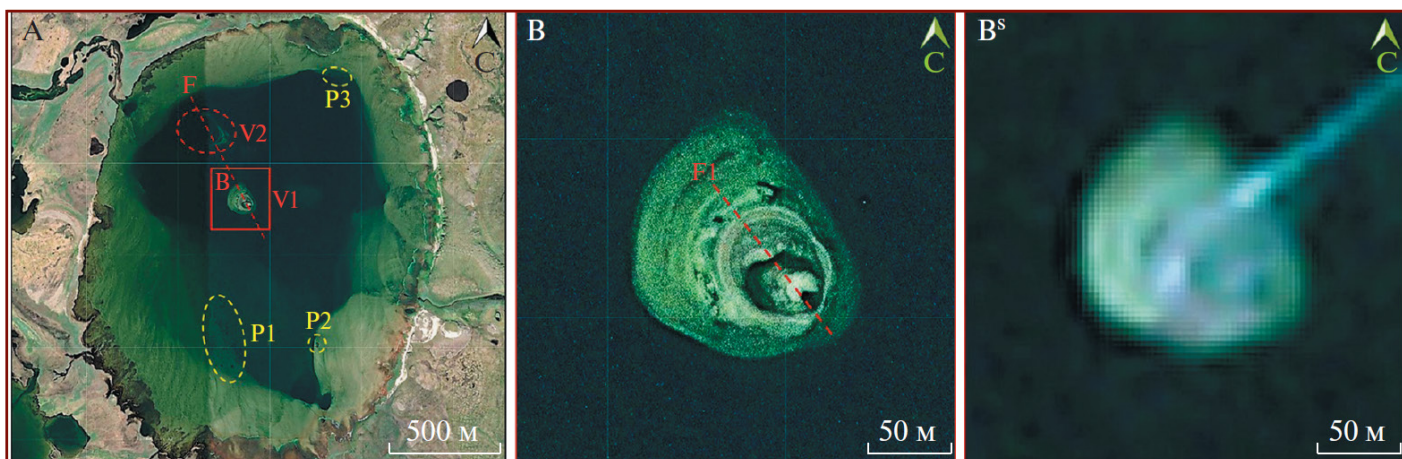


Fig. 25

Immagine satellitare WorldView-2 del lago termokarst Labvarto (A) e il suo frammento ingrandito (B), integrato con un frammento dell'immagine satellitare Sentinel-2 (BS). Segni: P1, P2 e P3 — depressioni; V1 e V2 — vulcani di fango; F e F1 — faglie previste.

Fonte: Bogoyavlensky, V. I. Nuovi dati sul vulcanismo del fango nell'Artico sulla penisola di Yamal. Accademia Russa delle Scienze. Scienze della Terra 512, 92-99 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

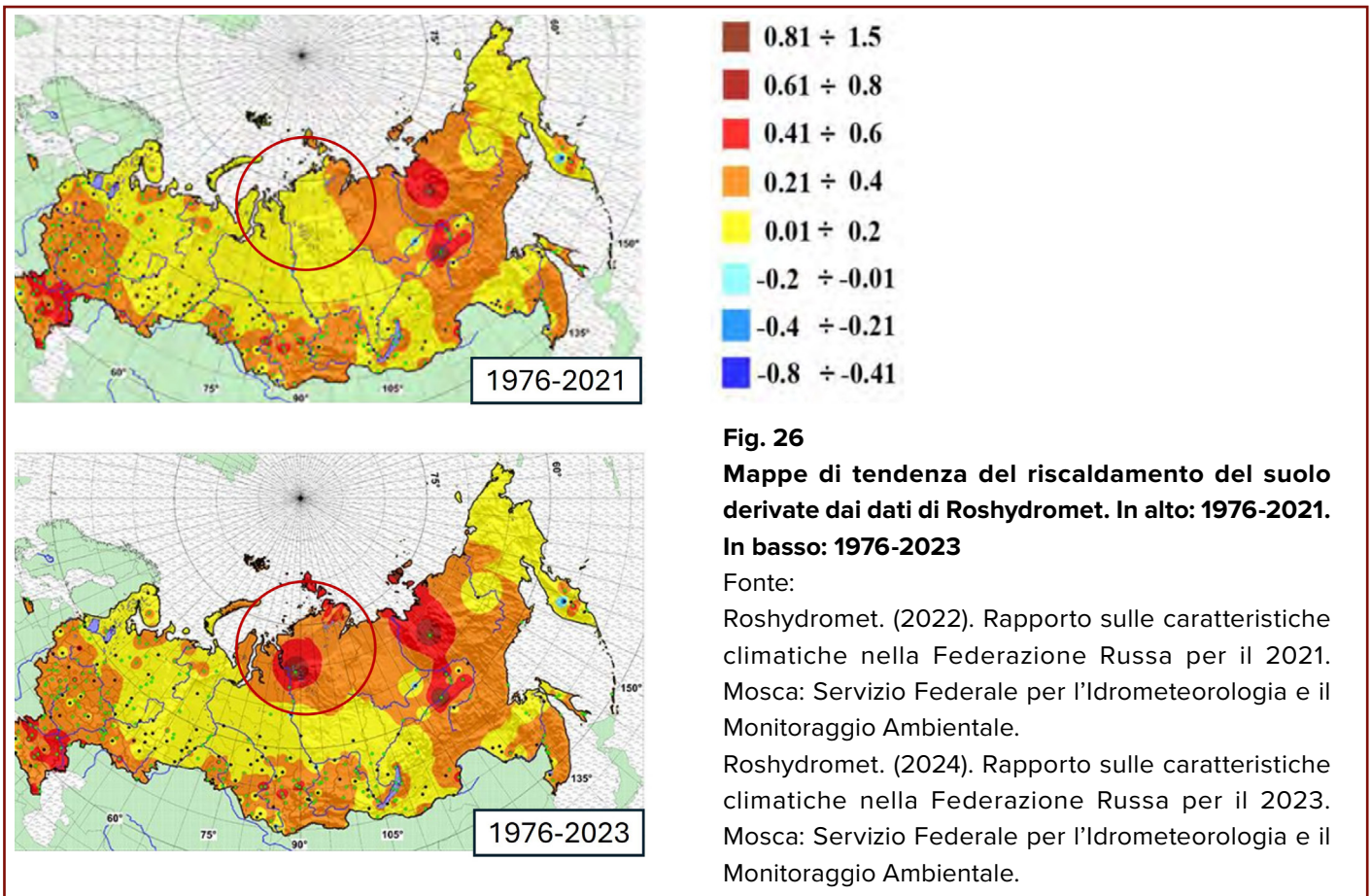
³² Bogoyavlensky, V. I. Nuovi dati sul vulcanismo del fango nell'Artico sulla penisola di Yamal. Accademia Russa delle Scienze. Scienze della Terra 512, 92-99 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

Riscaldamento del suolo

Sulla base dei dati di Roshydromet del 2021-2023, sono state analizzate mappe della temperatura del suolo a profondità di 80 cm, 160 cm e 320 cm. Il confronto più informativo è stato l'andamento delle temperature nei periodi 1976-2021 e 1976-2023 (Fig. 26). Tra il 2021 e il 2023, una distinta anomalia è emersa sulla mappa delle tendenze nell'area a sud delle penisole di Gyda e Taimyr. Questa anomalia coincide geograficamente con la regione di basse velocità

nel mantello identificata dalla tomografia sismica sotto la litosfera della regione Siberiana.

Data la profondità significativa delle misurazioni (320 cm) e l'ampia copertura delle osservazioni (466 stazioni meteorologiche in tutta la Russia), si può dedurre che l'anomalia di temperatura rilevata è associata ad un aumento del calore geotermico dovuto all'innalzamento del pennacchio di magma.



Temperatura dell'aria vicino alla superficie

Le osservazioni di temperatura durante l'inverno del 2023-2024 rivelano anche un modello anomalo nelle temperature dell'aria vicino alla superficie (Fig. 27). La mappa delle anomalie della temperatura media da Dicembre 2023 a Febbraio 2024 mostra un aumento di 2,0–4,5°C sopra la norma nell'area delle penisole di Gyda e Taimyr.

Data la posizione settentrionale di questa regione, un aumento della temperatura invernale così significativo può essere attribuito all'influenza termica del pennacchio del mantello.

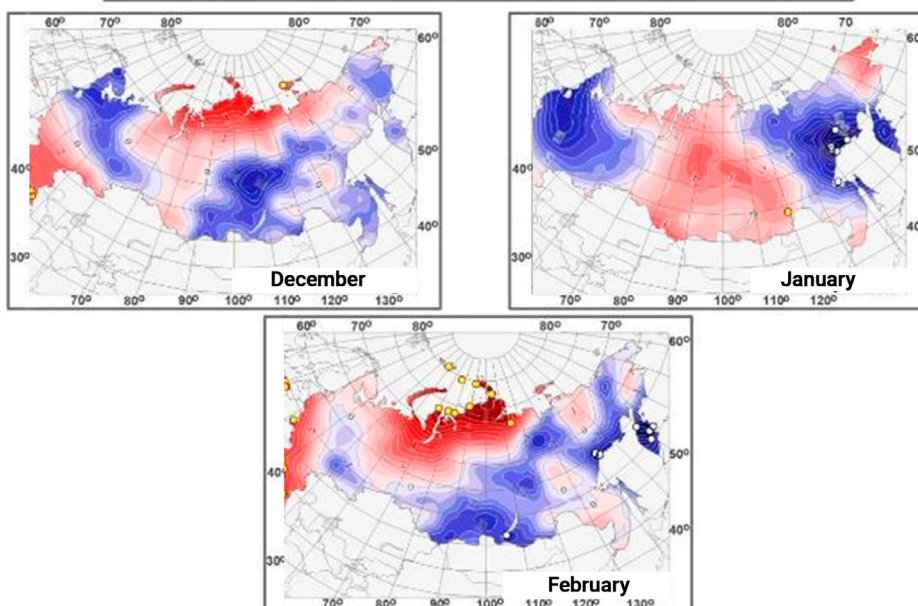
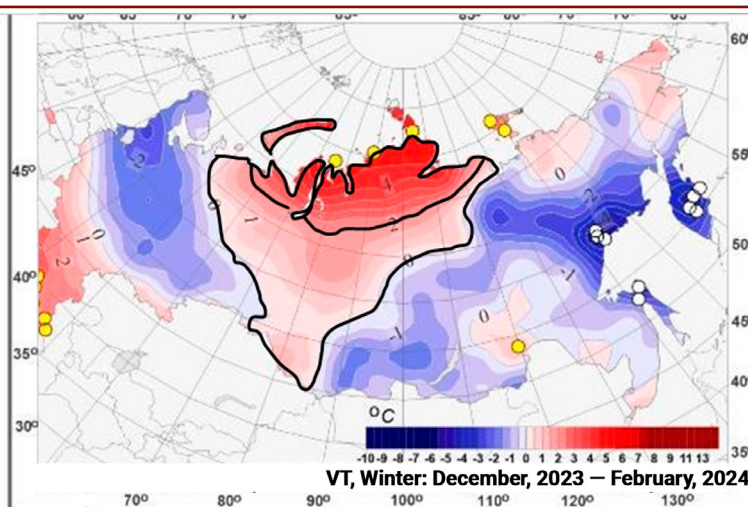


Fig. 27

Campi delle anomalie di temperatura dell'aria vicino alla superficie (°C) stagionali e mensili medie in tutta la Russia durante l'inverno 2023/24.

Fonte: Roshydromet. (2024). Rapporto sulle caratteristiche climatiche nella Federazione Russa per il 2023. Mosca: Servizio Federale per l'Idrometeorologia e il Monitoraggio Ambientale.

Un'analisi delle mappe di temperatura media mensile³³ per Gennaio e Luglio nel periodo 2001-2022 mostra un'anomalia di temperatura costante nella regione studiata (Figg. 28, 29). Ciò indica che l'anomalia non solo è stata osservata negli ultimi due anni, ma è persistita

per tutto il periodo di osservazione di 23 anni, sostenendo ulteriormente la conclusione che l'intrusione del pennacchio sta influenzando le temperature vicino alla superficie.

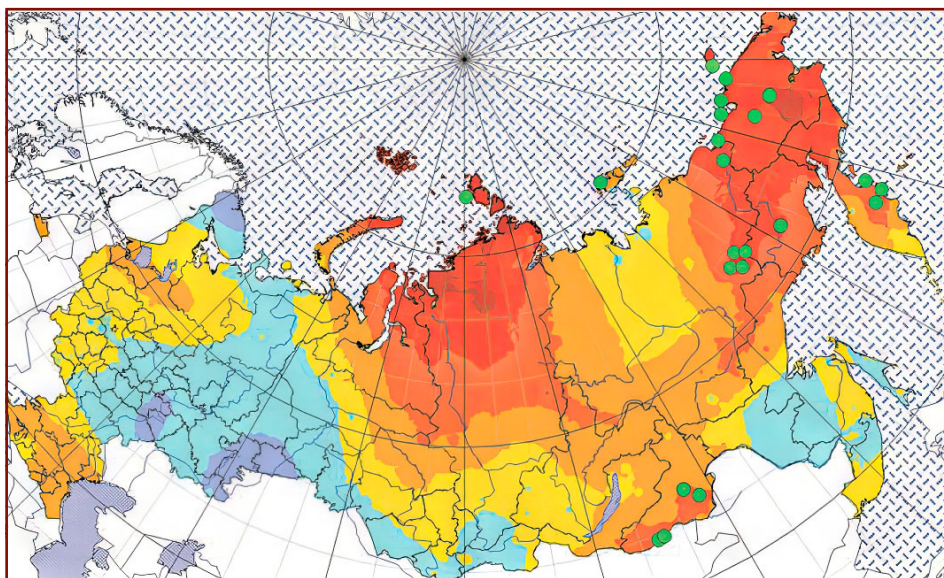


Fig. 28
Coefficients di tendenza lineare (°C / 10 anni) per le temperature medie mensili dell'aria dal 2001-2022 (entro i confini della Russia a partire da Febbraio 2022) — Gennaio.

Fonte: Sherstyukov B. G. Il riscaldamento globale e le sue possibili cause. Rivista di Idrometeorologia ed Ecologia. 2023;(70):7—37. (In russo).
<https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

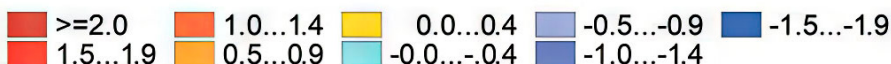
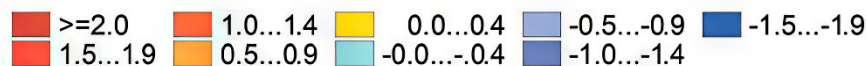
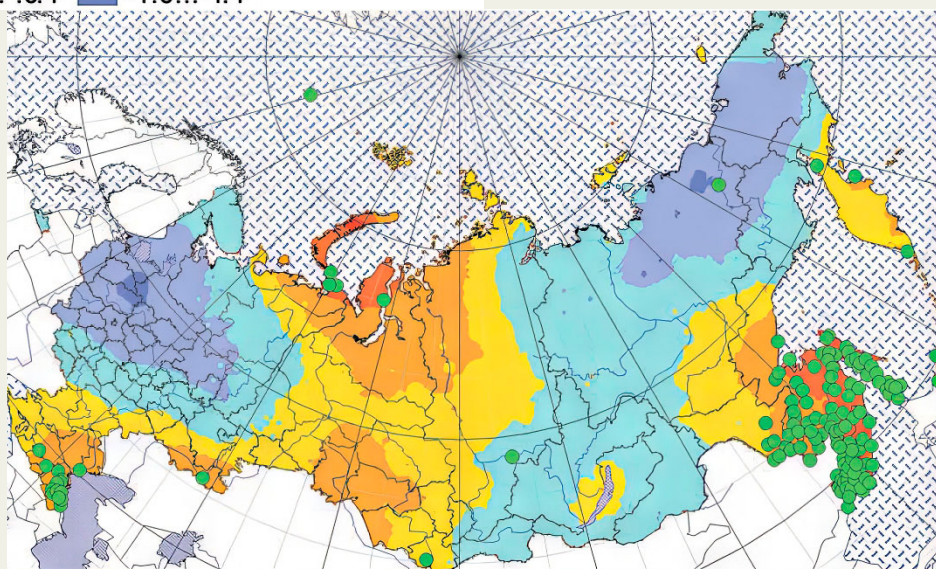


Fig. 29
Coefficients di tendenza lineare (°C/10 anni) per le temperature medie mensili dell'aria a Mosca dal 2001-2022 (entro i confini della Russia a partire da Febbraio 2022) — Luglio.

Fonte: Sherstyukov B. G. Il riscaldamento globale e le sue possibili cause. Rivista di Idrometeorologia ed Ecologia. 2023;(70):7—37. (In russo).
<https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>



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

Aumento dell'attività dei fulmini

La comunità scientifica è sempre più preoccupata per l'aumento di temporali e fulmini nell'Artico. Il numero di fulmini a nord di 65°N di latitudine è triplicato tra il 2010 e il 2020³⁴ (Fig. 30). In particolare, la maggior parte di queste scariche sono concentrate nel nord della Siberia, mentre sono quasi assenti nel nord del Canada e in Groenlandia (Figg. 31, 32).

L'attività dei fulmini sta avanzando verso il Polo Nord. Nell'Agosto 2019, sono stati segnalati più fulmini a poche centinaia di chilometri dal Polo.³⁵ La maggior parte degli eventi di fulmini nell'alto Artico (a nord di 80°N) si verificano durante alcuni intensi giorni di temporale ogni estate. Tuttavia, queste tempeste rappresentano un fenomeno nuovo per la regione, poiché i temporali erano rari negli anni precedenti.

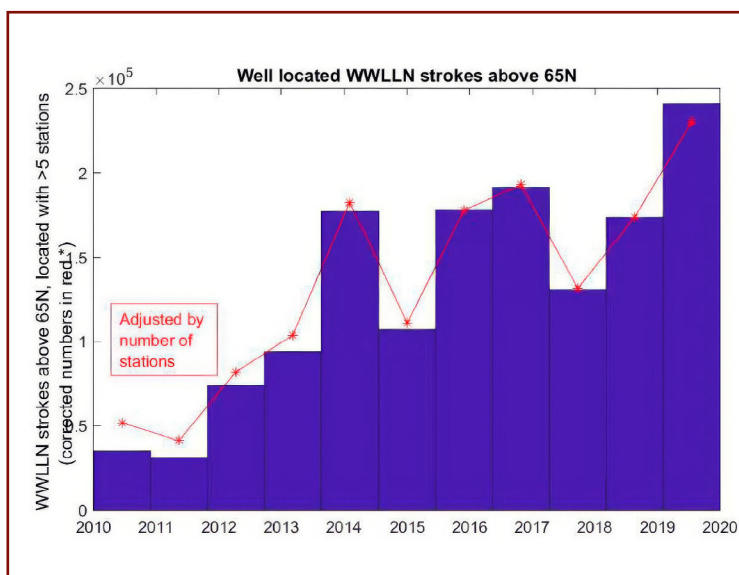


Fig. 30
Fulmini WWLLN ben posizionati sopra 65° N (blu) e la trama rossa mostra la regolazione in base al numero totale di stazioni WWLLN. WWLLN, World Wide Lightning Location Network.

Fonte: 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>

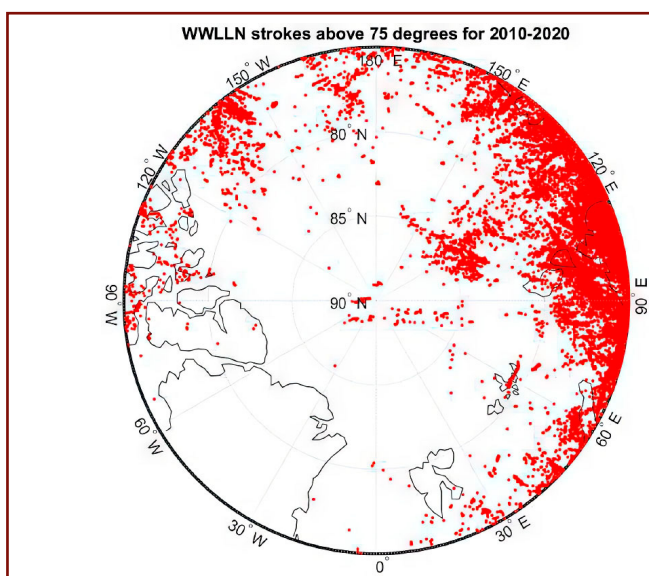


Fig. 31
Distribuzione globale di fulmini WWLLN in Giugno, Luglio e Agosto per 2010-2020 sopra 75°N. WWLLN, World Wide Lightning Location Network.

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

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

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

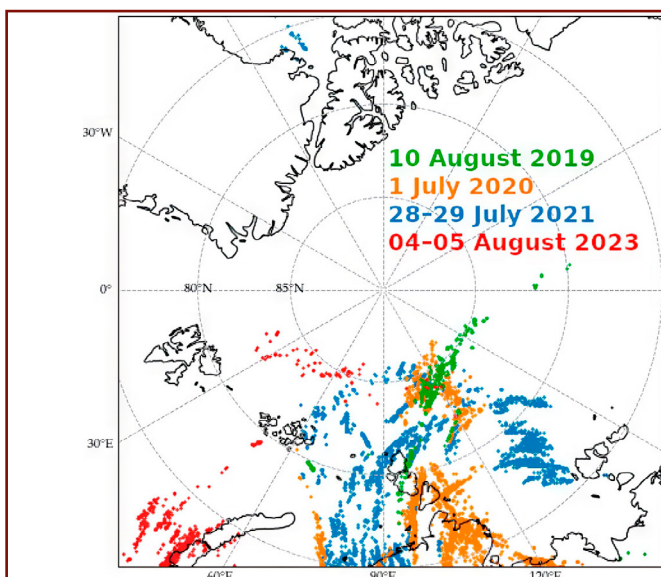


Fig. 32
Punti di fulmine rilevati da WWLLN durante i temporali nel 2019–2023. Verde—2019, arancione—2020, blu — 2021, rosso — 2023.

Fonte: 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>

La posizione persistente di queste tempeste negli ultimi anni è attribuita all'estremo caldo estivo osservato nella Siberia Settentrionale, con temperature che arrivano fino a 35°C durante i mesi estivi. Inoltre, si ipotizza che un aumento complessivo della ionizzazione atmosferica in questa regione, a causa dell'intrusione del pennacchio magmatico, sia anche un fattore significativo che contribuisce all'aumento dell'attività dei fulmini. Questo processo comporta la conversione dell'energia termica in energia elettrica attraverso l'effetto Yutkin, che si verifica durante le interazioni esplosive del mantello profondo quando i flussi di magma di diverse temperature entrano in contatto. Di conseguenza, grandi quantità di energia vengono rilasciate dall'interno della Terra, portando ad un aumento della carica statica superficiale, alterazioni del potenziale superficiale, una maggiore ionizzazione

atmosferica e, di conseguenza, un aumento dell'attività dei fulmini.

Inoltre, volumi significativi di gas vengono rilasciati attraverso le fratture nella crosta terrestre. Questo processo può influenzare la formazione di nuvole e le condizioni meteorologiche locali. L'intrusione di magma è un fattore chiave nel riscaldamento della superficie, nell'aumento dell'umidità atmosferica e nello sviluppo di anomalie termiche, che contribuiscono alla formazione di nuvole temporalesche e fulmini.

Poiché la formazione di temporali e fulmini richiede una combinazione di aria fredda, aria calda e instabilità convettiva, la posizione del Pennacchio del mantello Siberiano fornisce condizioni ottimali per il loro sviluppo.

Riduzione dello strato di ozono

L'attività magmatica all'interno della Terra è accompagnata dal rilascio di quantità significative di gas vulcanici, tra cui idrogeno, metano e anidride carbonica. Secondo la ricerca di V. L. Syvorotkin³⁶, le emissioni di idrogeno contribuiscono alla degradazione dello strato di ozono. Poiché l'ascesa del magma avviene in modo pulsante, anche il degassamento e la successiva distruzione dello strato di ozono si manifesteranno sporadicamente, cioè come eventi occasionali.

Anomalie dello strato di ozono sono state osservate sulla Siberia Settentrionale dal 1997 al 1998, in coincidenza con lo spostamento del nucleo terrestre verso la penisola di Taimyr.

Episodi di deplezione dell'ozono sono stati registrati nel 2011, 2016 e 2020³⁷, con il deficit di ozono più grave che si è verificato nel 2016³⁸. Alla fine di Gennaio 2016, per la prima volta dall'inizio del monitoraggio nel 1973, è stata rilevata un'anomalia dell'ozono negli Urali Settentrionali e in Siberia, con un contenuto totale di ozono di 190-200 DU — 40–45% inferiore alla media a lungo termine. Questa anomalia persisteva per una settimana (Fig. 33).

Una significativa riduzione del contenuto totale di ozono è stata registrata anche utilizzando lo strumento di monitoraggio dell'ozono (OMI) a bordo del satellite Aura della NASA (Fig. 34).

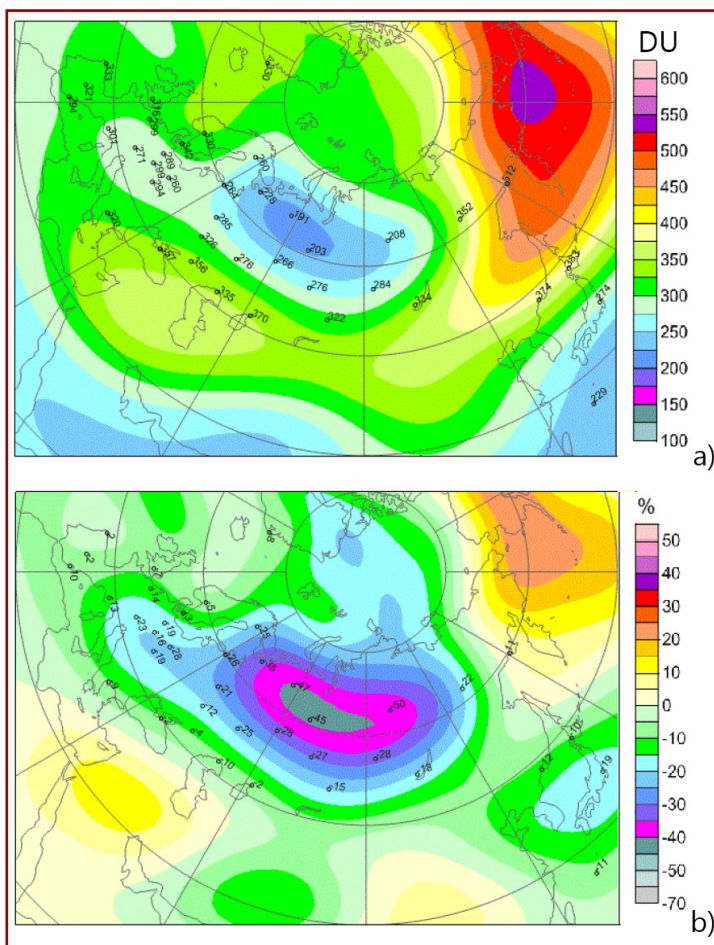


Fig. 33
Contenuto totale di ozono (a) e sue deviazioni dalla norma (b) il 28 Gennaio 2016, sulla base dei dati satellitari WOUDC [<http://woudc.org/>]. I numeri sulla mappa rappresentano le misurazioni del contenuto totale di ozono presso le stazioni della rete di monitoraggio dell'ozono.

Fonte: Nikiforova, M. P., Vargin, P. N., Zvyagintsev, A. M., Ivanova, N. S., Kuznetsova, I. N. e Luk'yanov, A. N. (2016). Mini-buco di ozono sopra gli Urali Settentrionali e la Siberia. Atti del Centro di Ricerca Idrometeorologica della Federazione Russa, 360, 168-180. Nei materiali della Conferenza di Idrometeorologia, 9–10 febbraio, Volume 4, pp. 91–96. Voronezh: Pubblicazioni di ricerca scientifica.

³⁶Syvorotkin, V. L. Degassamento profondo nelle regioni polari del pianeta e cambiamenti climatici. Agosto (2018) doi:10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.articolo 48

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. Valori estremamente bassi di ozono totale sopra gli Urali Settentrionali e la Siberia alla fine di Gennaio 2016. AOO (2017) doi: 10.15372/AOO20170102

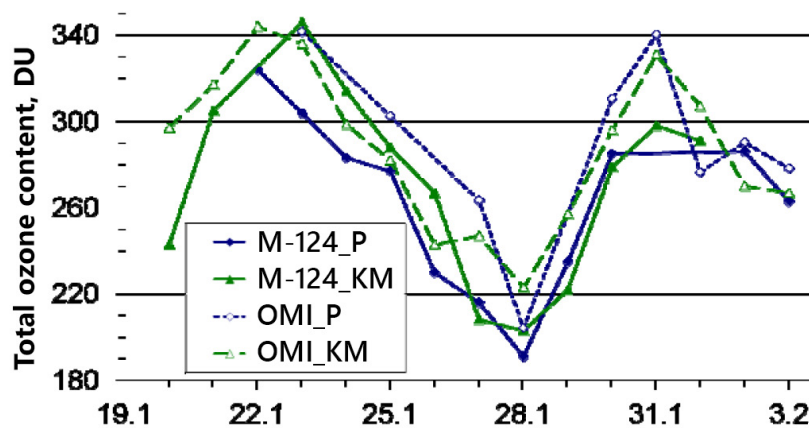


Fig. 34

Contenuto totale di ozono misurato utilizzando l'ozonometro M-124 a terra e lo strumento OMI sul satellite Aura (USA) presso le stazioni Pechora (P) e Khanty-Mansiysk (KM) dal 20 Gennaio al 3 Febbraio 2016.

Fonte: Nikiforova, M. P., Vargin, P. N., Zvyagintsev, A. M., Ivanova, N. S., Kuznetsova, I. N. e Luk'yanov, A. N. (2016). Mini-buco di ozono sopra gli Urali Settentrionali e la Siberia. Atti del Centro di ricerca Idrometeorologica della Federazione Russa, 360, 168-180. Nei materiali della Conferenza di Idrometeorologia, 9-10 febbraio, Volume 4, pp. 91-96. Voronezh: Pubblicazioni di ricerca scientifica.

È importante notare che il ciclo stagionale a lungo termine del contenuto totale di ozono nelle latitudini extratropicali dell'emisfero settentrionale raggiunge tipicamente il suo minimo a Settembre e il suo massimo a Marzo-Aprile. Tuttavia, nel 2016, la degradazione dell'ozono si è verificata insolitamente presto, a Gennaio, raggiungendo i livelli più bassi registrati nella storia delle osservazioni strumentali.

Pertanto, l'esaurimento dello strato di ozono nella regione Siberiana può servire come ulteriore indicatore delle emissioni di gas attraverso le fratture crostali, derivanti dal movimento verso l'alto del pennacchio magmatico verso la superficie.

Struttura, possibili dimensioni e localizzazione del pennacchio magmatico, sulla base di dati pubblicati e osservativi

La struttura del pennacchio può essere approssimativamente visualizzata come un fungo. Ha una coda (gambo) che trasporta materiale riscaldato dal confine nucleo-mantello verso l'alto. La parte superiore di un pennacchio, che si espande man mano che sale, forma la testa del

pennacchio. Quando un pennacchio raggiunge la base della litosfera, incontra uno strato refrattario di rocce solidificate, facendo sì che la testa si diffonda orizzontalmente sotto la litosfera, come un cappello di fungo (Fig. 35).

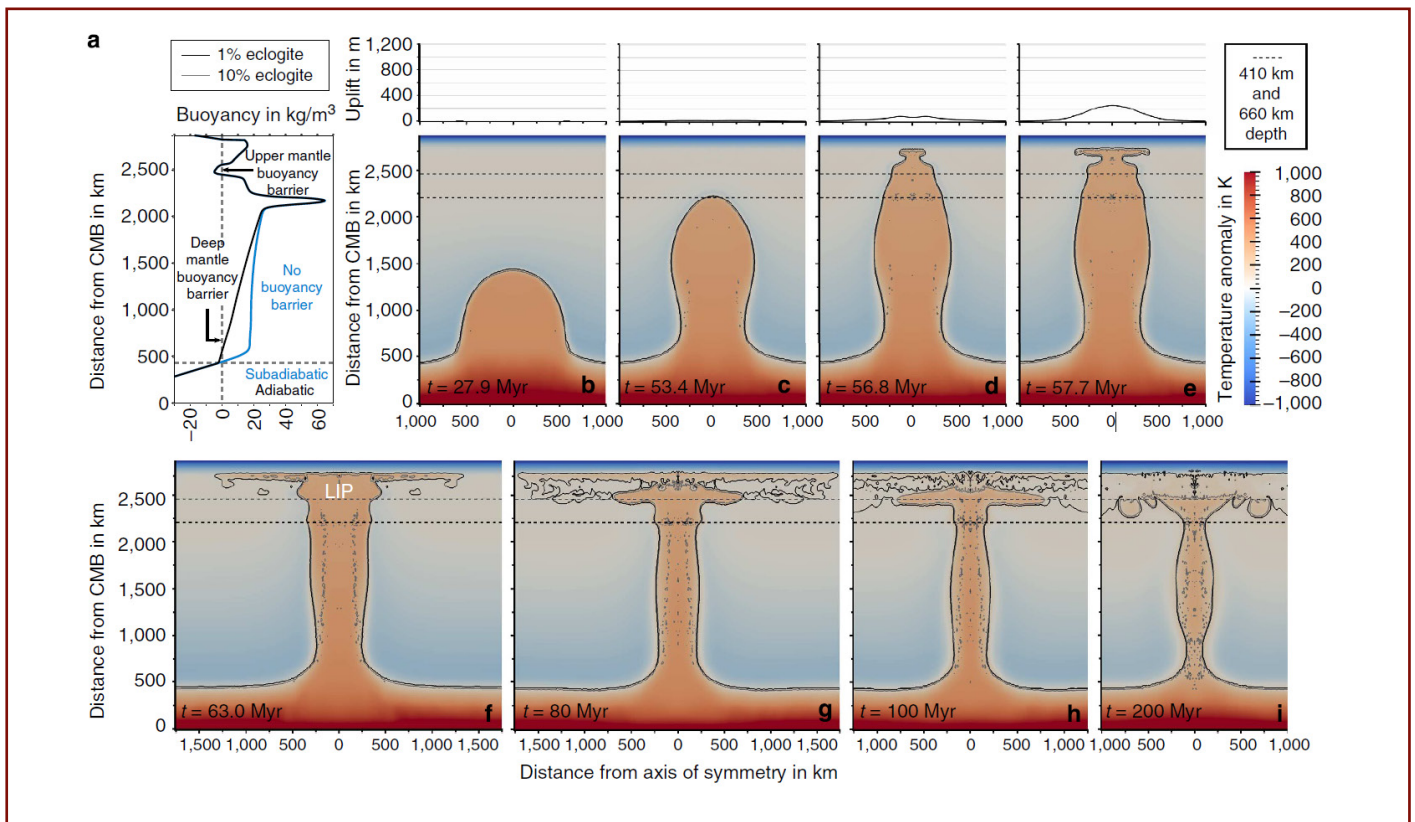


Fig. 35

L'illustrazione presenta un modello di evoluzione del pennacchio magmatico, simile a quello che formò i Trappi Siberiani 250 milioni di anni fa.

Il grafico a sinistra (a) mostra come il magma sale attraverso diversi strati del mantello terrestre. La sezione principale dell'immagine (b-i) funge da "linea temporale", mostrando le fasi dello sviluppo del pennacchio: Inizialmente, una "colonna" di magma caldo sale dalla base del mantello. Gradualmente, questa colonna raggiunge il mantello

superiore, dove si espande in una testa "a fungo". Nel tempo, il pennacchio diventa più sottile e inizia a frammentarsi in strutture separate.

I colori nel diagramma rappresentano la temperatura: le aree rosse e arancioni indicano le regioni più calde. Le aree blu rappresentano le regioni più fredde.

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

Secondo i dati della ricerca, quando il pennacchio si avvicina alla litosfera, il suo raggio raddoppia mentre scorre e la sua velocità di ascesa diminuisce significativamente³⁹. Il materiale caldo che sale dalla “coda” del pennacchio esercita una pressione e brucia attraverso la litosfera, formando delle crepe. Nelle aree deboli, si formano pennacchi secondari — camere magmatiche superiori all’interno della crosta terrestre. Tali camere esistono, ad esempio, sotto Yellowstone, Campi Flegrei e altri supervulcani. Quelle camere sono i siti in cui possono verificarsi fratture della crosta e massicce eruzioni di magma.

È importante notare che, secondo i modelli esistenti, l’ascesa di un pennacchio in superficie può richiedere decine di milioni di anni. Tuttavia, questi calcoli si basano su ipotesi teoriche, mentre le osservazioni pratiche dell’escalation in corso dei processi geodinamici suggeriscono il contrario. Le osservazioni in Siberia indicano che l’ascesa del pennacchio potrebbe avvenire entro diversi decenni.

Sulla base della letteratura⁴⁰, è noto che un super pennacchio magmatico simile, che ha causato numerose eruzioni di basalto in Eurasia (in Siberia) al confine tra il Permiano e il Triassico (250 milioni di anni fa), aveva le seguenti dimensioni: 4000 km da ovest a est e 3000 km da nord a sud. Si presume che la testa del pennacchio avesse un diametro compreso tra 1000 e 2000 km.

È noto che la placca Siberiana Occidentale è più giovane e più sottile, con uno spessore di 35-40 km. Al contrario, la placca Siberiana Orientale (o piattaforma), nota come Cratone Siberiano, è più antica, più spessa e più fredda, con uno spessore di 40-45 km. Secondo i dati della tomografia sismica⁴¹, scienziati presumono che piccoli focolai magmatici siano attualmente osservati sotto la piattaforma della Siberia Orientale. Questi focolai si diffondono lateralmente sotto il Cratone Siberiano (Fig. 36) a causa della natura più fredda della placca.

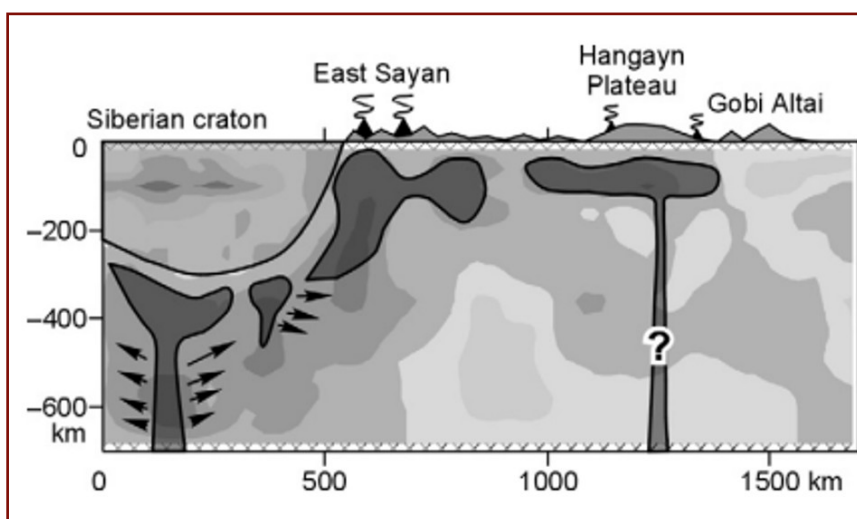


Fig. 36
Diagramma dall’articolo, che illustra come piccoli focolai magmatici (mostrati con le frecce a sinistra) scorrono intorno al Cratone Siberiano

Fonte: Koulakov, I. Y. (2008). Struttura del mantello superiore sotto la Siberia Meridionale e la Mongolia dalla tomografia sismica regionale. *Geologia e geofisica*, 49(3), 187-196.

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

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

⁴⁰Lvova, E. V. (2010). Tettonica dei pennacchi del mantello: evoluzione dei concetti di base. *Bollettino geologico dell’Università di Mosca*, 5, 21-29.

⁴¹Koulakov, I. Y. (2008). Struttura del mantello superiore sotto la Siberia Meridionale e la Mongolia dalla tomografia sismica regionale. *Geologia e geofisica*, 49(3), 187-196.

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

Secondo l'ipotesi, il moderno Pennacchio Siberiano si sta attualmente diffondendo sotto la base della placca Siberiana Orientale e parzialmente sotto la placca Siberiana Occidentale. Si pensa che questa diffusione avvenga a profondità di 50-60 km, con la "coda" del pennacchio osservata più chiaramente a profondità di circa 100 km. Intrusioni di pennacchi secondari sono probabilmente già presenti a profondità di circa 40 km.

Alcuni modelli sismo-tomografici rivelano anomalie a bassa velocità⁴² (indicative di un ambiente più fuso) a profondità di 110-150 km,

coerenti con una regione del mantello liquido sotto le aree a sud delle penisole di Gyda e Taimyr (Fig. 37). Queste anomalie, come si vede nelle mappe di velocità da uno studio di Agosto 2024, si presume corrispondano a due afflussi di materiale magmatico, indicato come "code" del pennacchio (Fig. 38).

Se questo modello è accurato, il diametro di ogni coda di pennacchio che sale sotto il Cratone della Siberia Orientale è di circa 600-700 km.

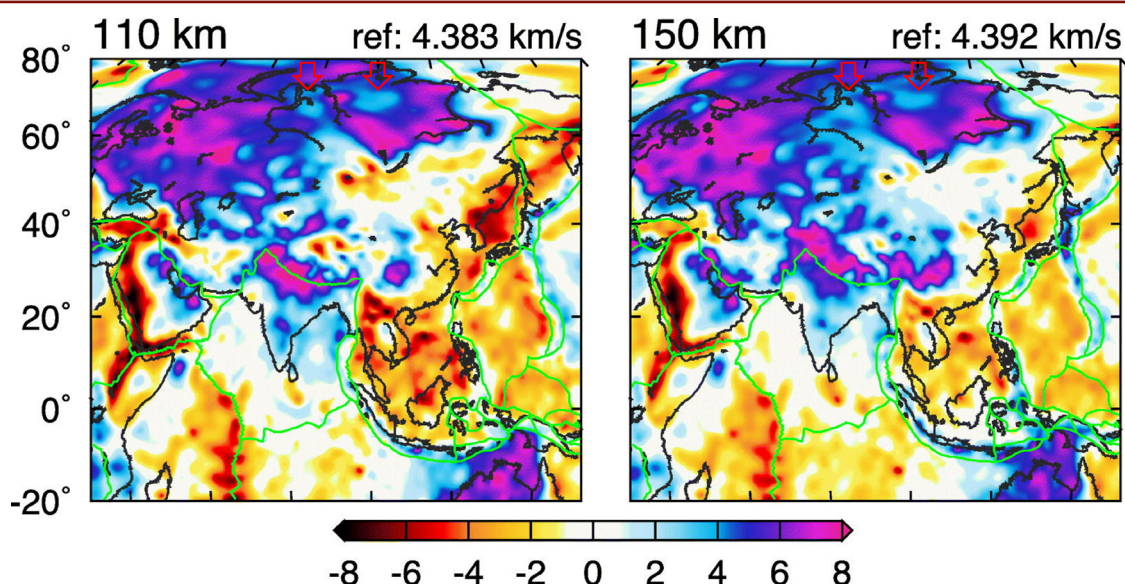


Fig. 37

La mappa mostra le regioni ad alta velocità di propagazione delle onde sismiche, rappresentate in viola, che corrispondono a rocce più dure e dense, mentre le aree blu indicano zone a velocità ridotta, suggerendo la presenza di materiale più duttile o fuso. Le anomalie delle onde sismiche a bassa velocità corrispondenti alle zone con più contenuto di mantello liquido sono evidenziate con due frecce rosse.

Fonte: Dou 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. 104841. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104841>

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

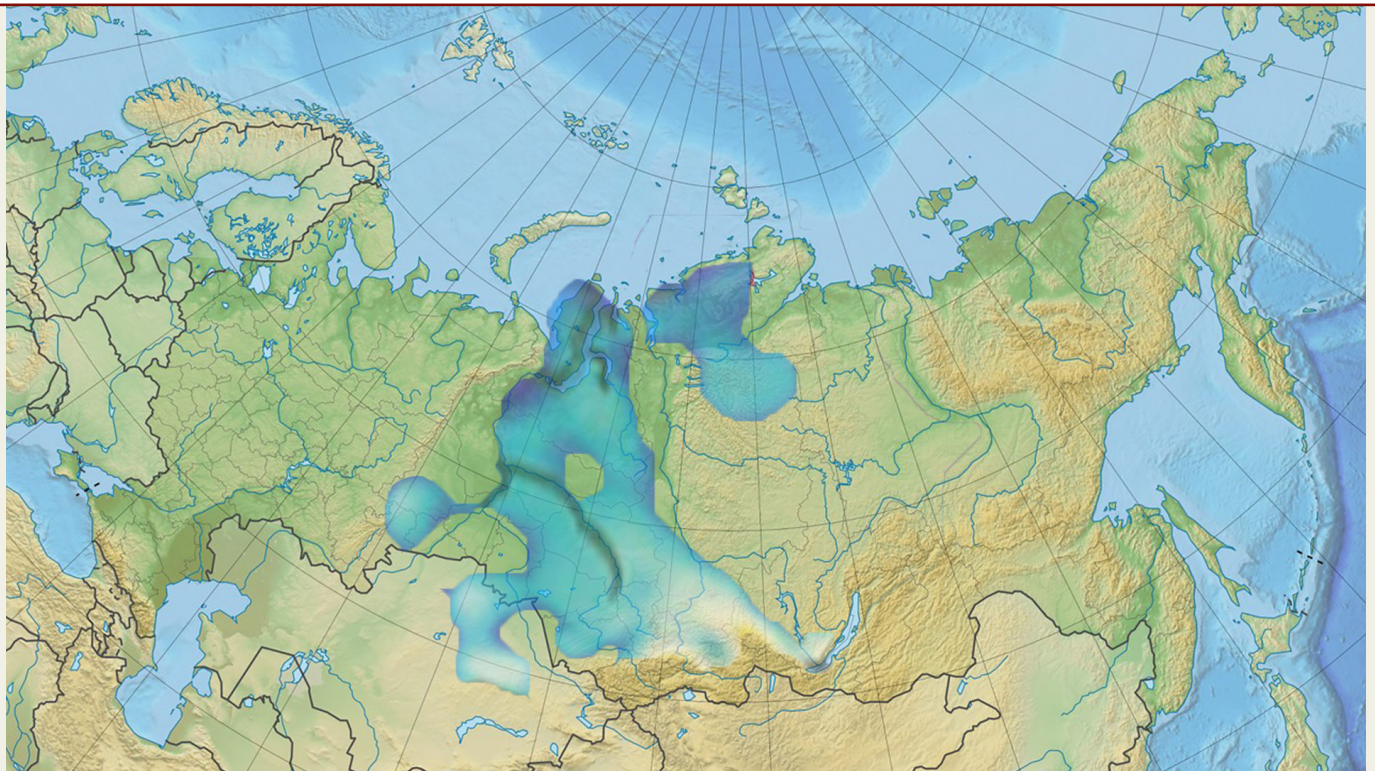


Fig. 38
Mappa fisica della Russia che mostra e adatta le anomalie delle onde sismiche a bassa velocità sulla base dei dati di Dou et al., 2024

È importante notare che l'analisi sismo-tomografica presentata nel Dou et al. (2024) lo studio per la Siberia si è basato su dati provenienti da meno di 10 sensori sismici (Fig. 39), che sono tutti posizionati lungo i confini delle placche con praticamente nessuna copertura all'interno della Siberia Occidentale e Orientale.

L'analisi ha utilizzato i dati di tutte le registrazioni di terremoti ad ampio raggio disponibili pubblicamente dal 1994 al 4 Settembre 2023. Per confronto, i triangoli rossi sulla mappa indicano i sensori utilizzati nell'analisi per l'Asia, che sono migliaia.

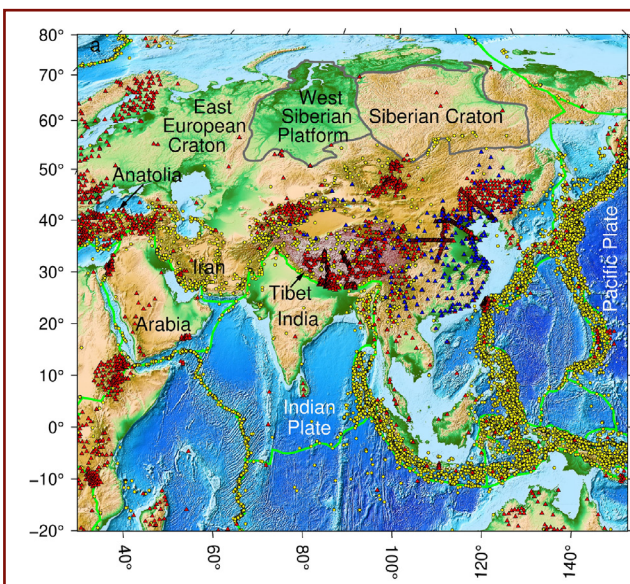


Fig. 39
Posizione dei sensori (triangoli rossi) utilizzati nell'analisi tomografica sismica

Fonte: Dou 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. 247. P. 104595.

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

Uno studio del 2023 condotto da ricercatori cinesi conferma che l'attività del magma sta attualmente sciogliendo e assottigliando la crosta sotto la Siberia⁴³ (Fig. 40). Questo processo continuo riduce la solidità della placca litosferica. Gli autori presentano il modello di conduttività elettrica del mantello per l'Asia Settentrionale, derivato da dati geomagnetici, che evidenzia una grave anomalia di conduttività all'interno della zona di transizione del mantello sotto i Trappi Siberiani durante la loro eruzione. Questa anomalia viene interpretata come un'irregolarità termica con tracce di fusione, legata all'anomalia Permiana nella regione (Fig. 41).

Nel complesso, i modelli sismo-tomografici che indagano profondità da 40 a 110 km nel Cratone della Siberia Orientale mostrano

risultati diversi. C'è una chiara mancanza di dati sismologici per la Siberia, che limita l'accuratezza di questi modelli.

I moderni modelli tomografici si basano su dati sismici raccolti per un lungo periodo di circa 30 anni. Dal punto di vista dei concetti classici dell'evoluzione del pennacchio del mantello, che si estende su milioni di anni, un lasso di tempo di 30 anni è considerato estremamente breve. Tuttavia, i dati esistenti indicano che durante questo periodo si sono verificati significativi cambiamenti strutturali nel Pennacchio Siberiano.

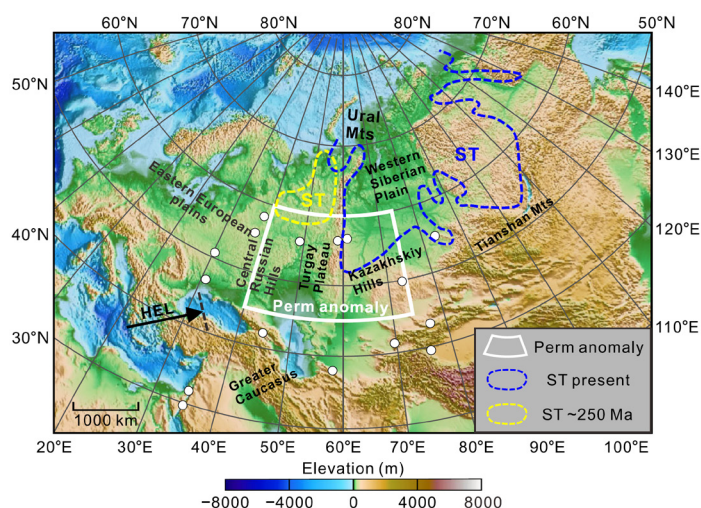
Queste osservazioni evidenziano la necessità di rivedere le attuali conoscenze sui tassi di sviluppo dei pennacchi del mantello e le metodologie utilizzate per studiarli.

Fig. 40

I punti bianchi indicano le stazioni le cui C-risposte sono state utilizzate in questo studio. L'intervallo di anomalia Permiana è mostrato come una zona contrassegnata da linee bianche. La posizione attuale dei Trappi Siberiani è contrassegnata in blu, mentre le posizioni precedenti sono contrassegnate in giallo, con linee tratteggiate.

Fonte: 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>

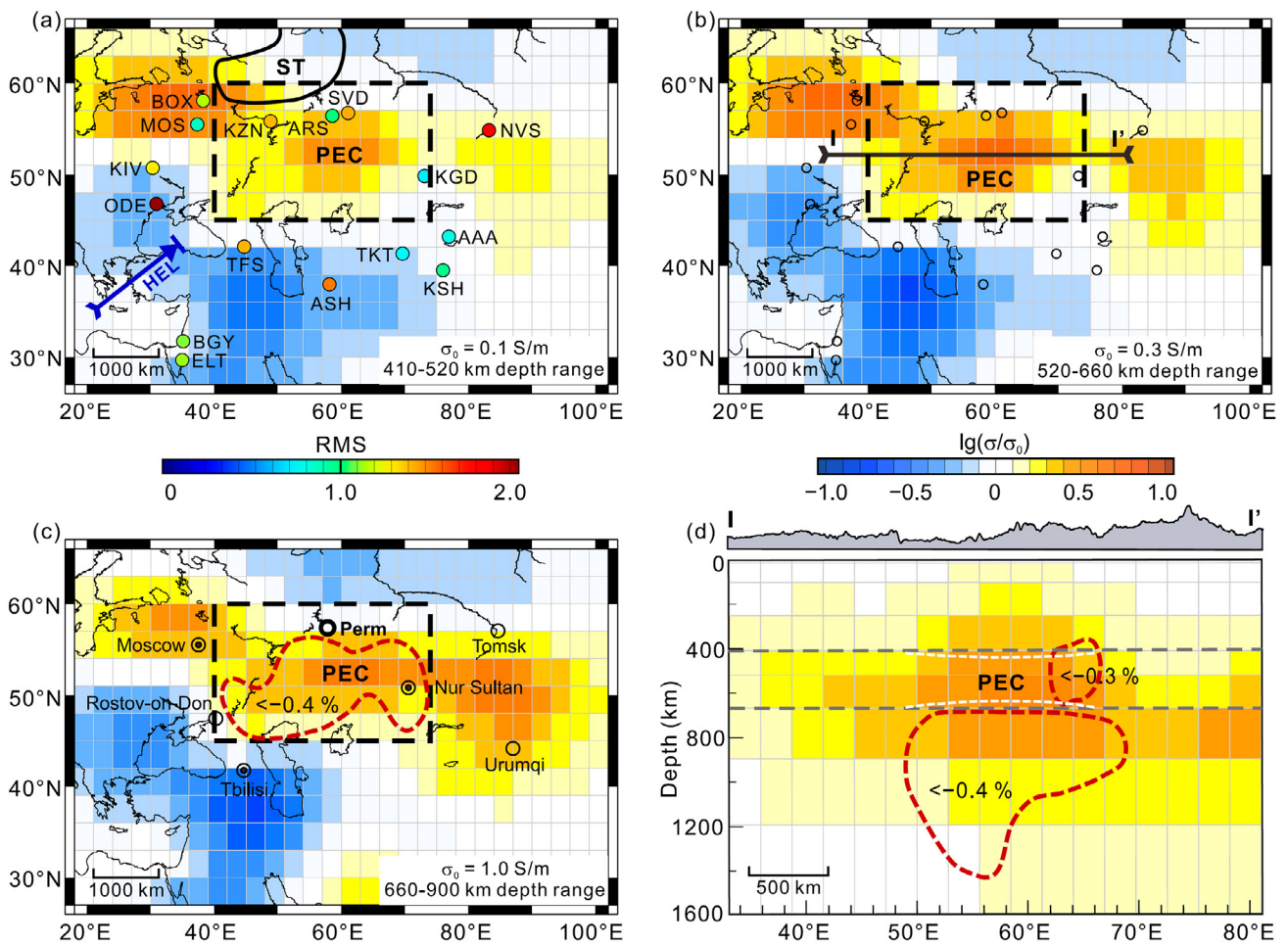


Fig. 41

Gli scienziati della Jilin University e della Shijiazhuang Tiedao University hanno utilizzato i dati del campo geomagnetico di 16 stazioni nell'Asia Settentrionale per calcolare la conduttività elettrica del mantello a varie profondità. Hanno scoperto un notevole aumento della conduttività rispetto alla conduttività media mondiale nella regione sotto i Trappi Siberiani (aree gialle e marroni sui diagrammi). I ricercatori hanno accertato che queste aree a profondità da 400 a 900 km sono in media 250 gradi più calde del mantello circostante. In queste aree, c'è una frazione del mantello fuso.

Fonte: 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>

Vale la pena notare che precedenti eruzioni 250 milioni di anni fa, al confine tra il Permiano e il Triassico, si sono verificate anche in questa regione. L'epicentro è stato localizzato sotto

il Cratone della Siberia Orientale (sotto l'altopiano di Putorana), con effusioni che coprono sia la Siberia Occidentale che quella Orientale (Fig. 42).

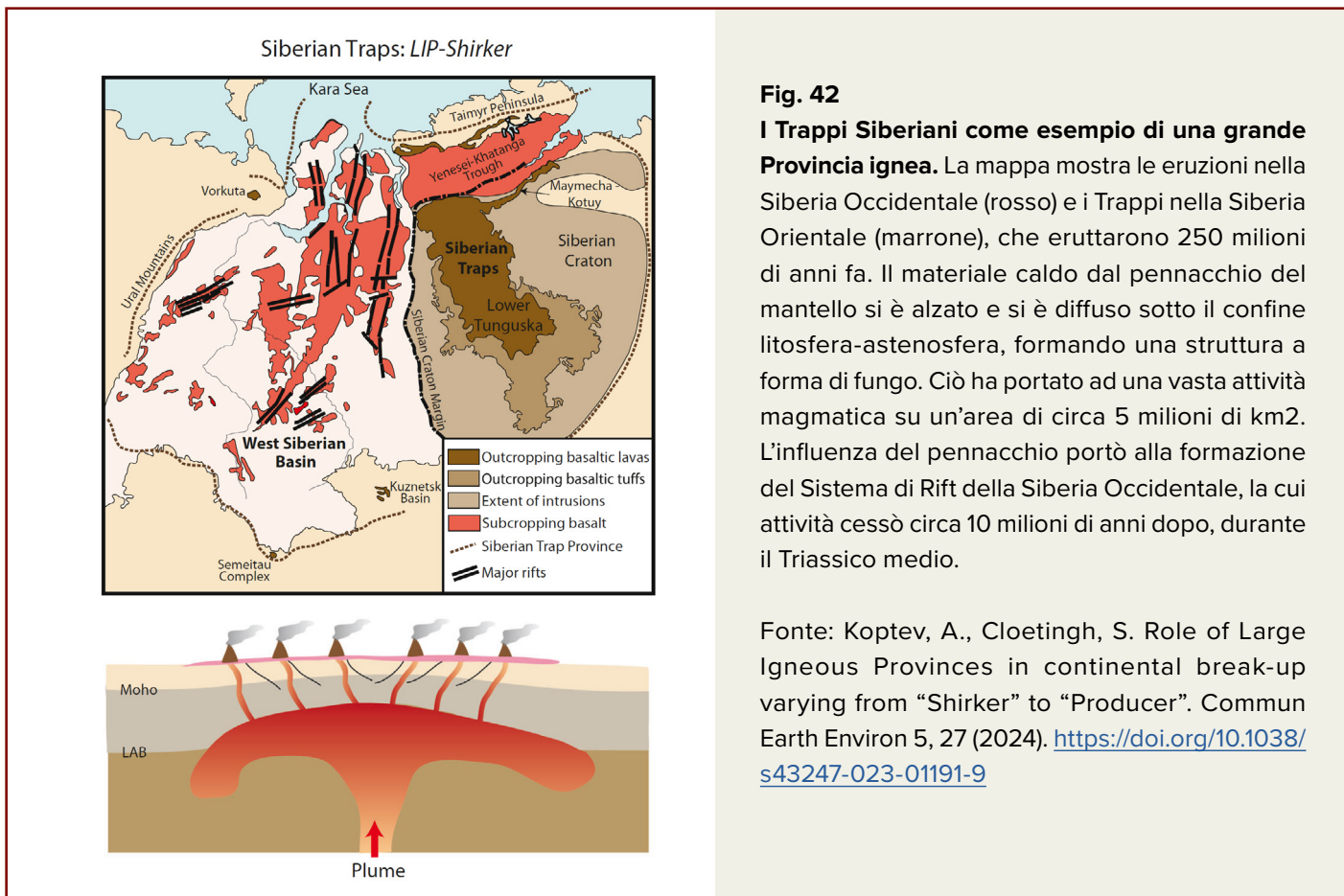


Fig. 42
I Trappi Siberiani come esempio di una grande Provincia ignea. La mappa mostra le eruzioni nella Siberia Occidentale (rosso) e i Trappi nella Siberia Orientale (marrone), che eruttarono 250 milioni di anni fa. Il materiale caldo dal pennacchio del mantello si è alzato e si è diffuso sotto il confine litosfera-astenosfera, formando una struttura a forma di fungo. Ciò ha portato ad una vasta attività magmatica su un'area di circa 5 milioni di km². L'influenza del pennacchio portò alla formazione del Sistema di Rift della Siberia Occidentale, la cui attività cessò circa 10 milioni di anni dopo, durante il Triassico medio.

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

Localizzazione del pennacchio magmatico

Sintetizzando l'analisi delle anomalie della temperatura del suolo, della profondità del disgelo del permafrost, delle anomalie della temperatura vicino alla superficie, delle anomalie delle onde sismiche a bassa velocità nel mantello

e dell'anomalia magnetica, è possibile identificare la posizione e le dimensioni attuali del Pennacchio Siberiano. (Fig. 43)

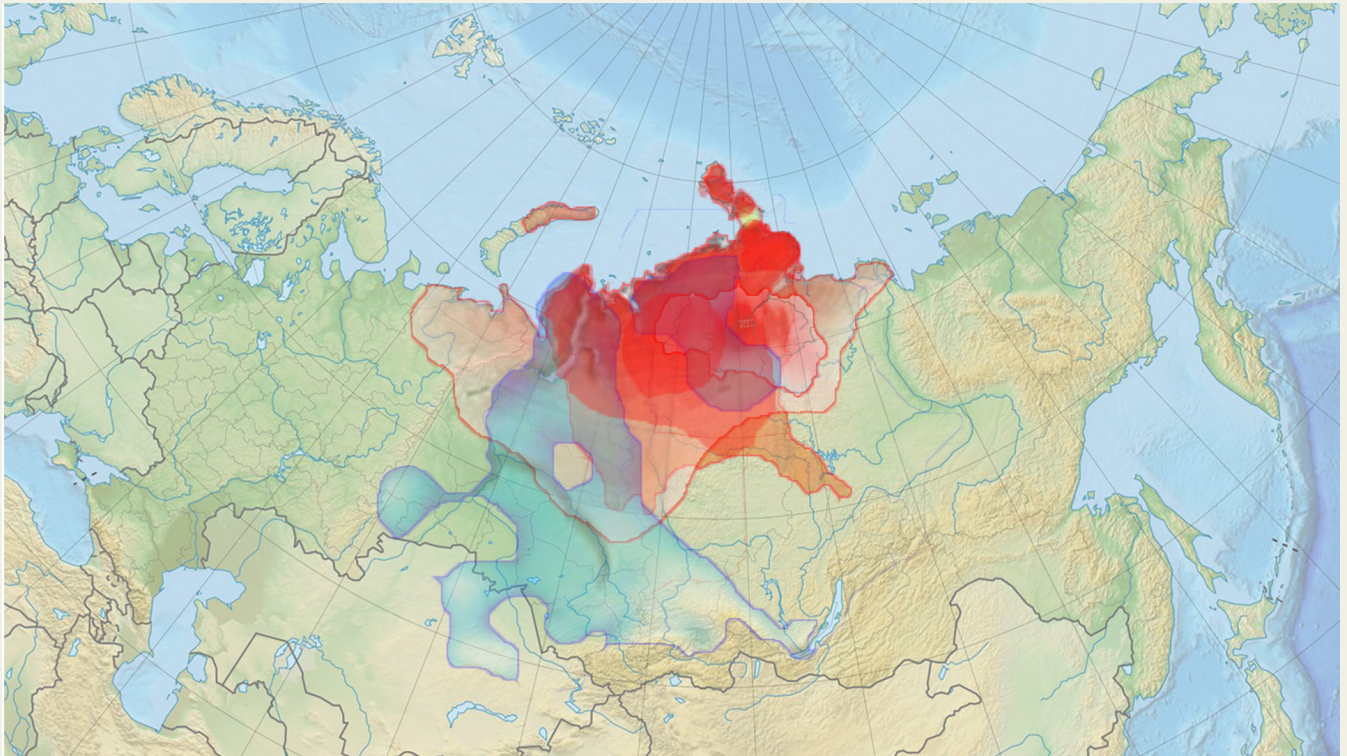
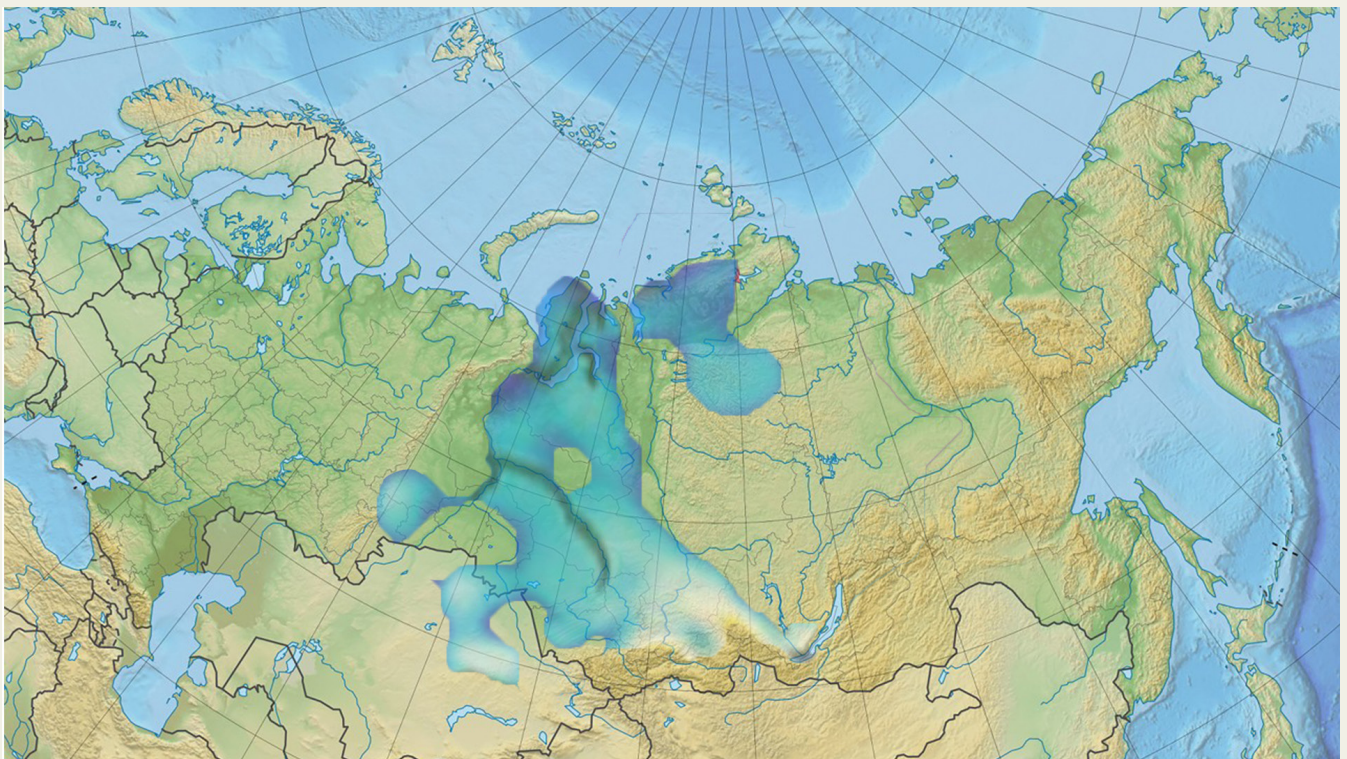


Fig. 43

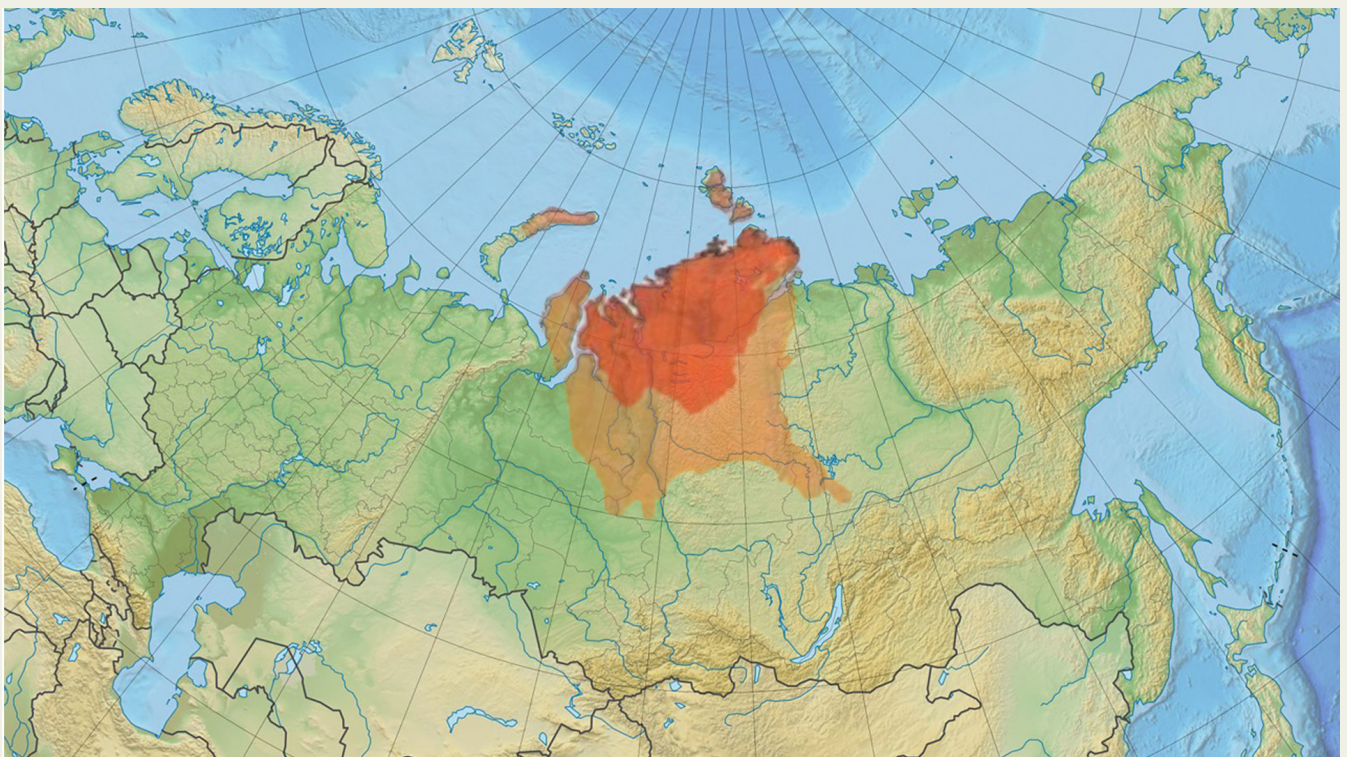
A. Mappa composita che sovrappone anomalie chiave su più parametri, dettagliate di seguito:



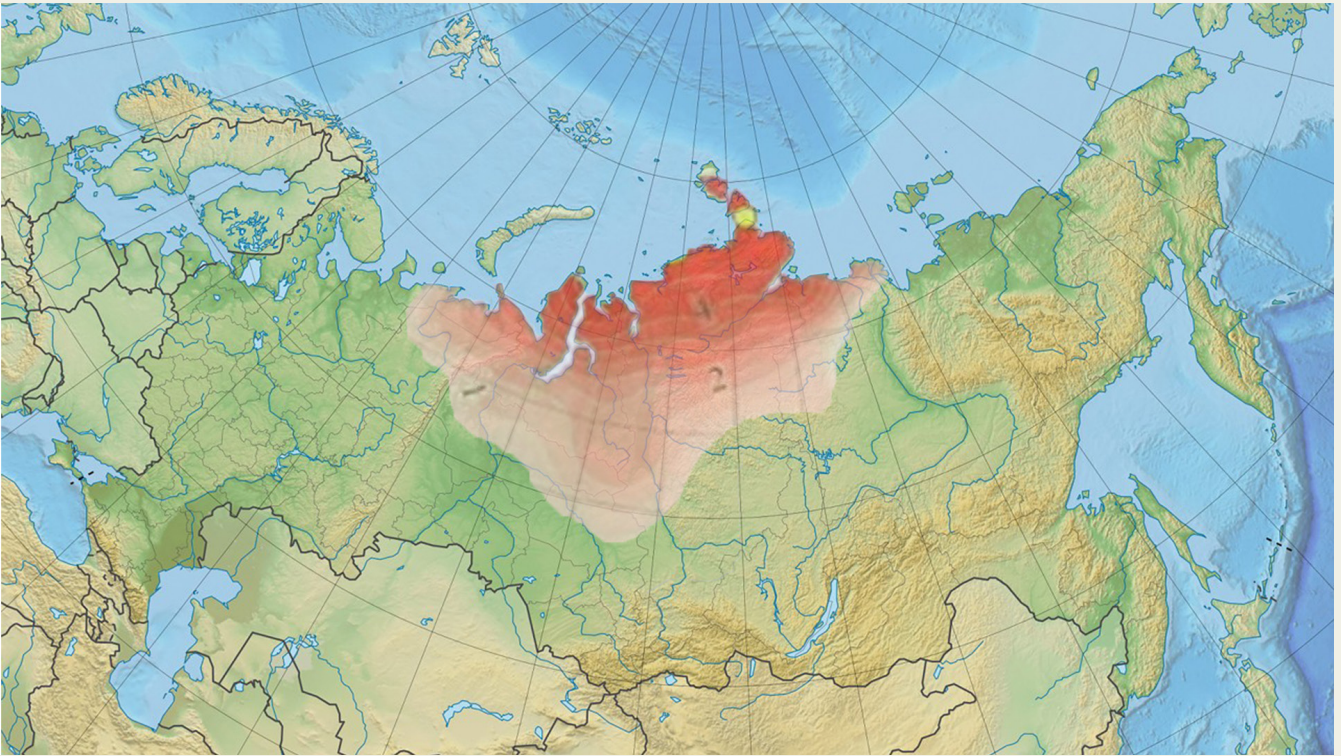
B. Mappa delle anomalie a bassa velocità (indicative di materiale più fuso) a una profondità di 110 km, basata sulla sismo-tomografia di Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023)



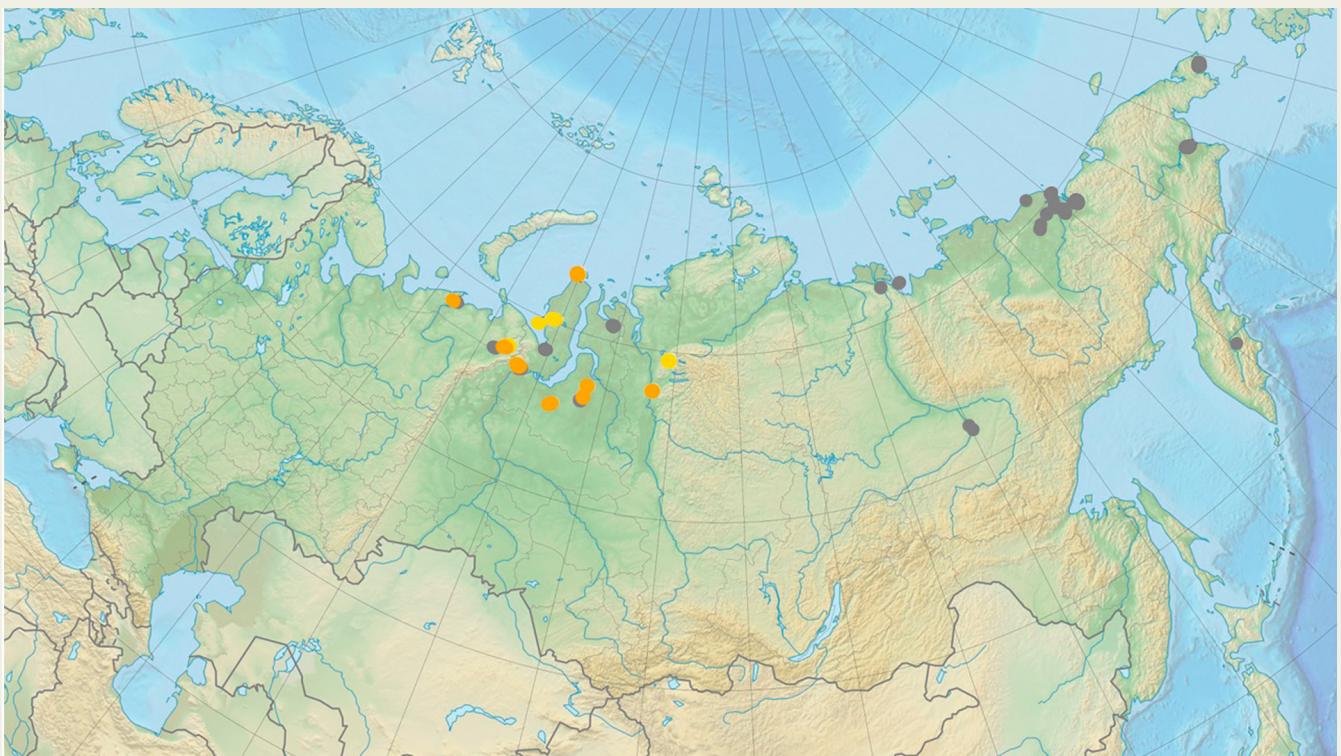
C. Nuove tendenze anomale di riscaldamento del suolo confrontando i periodi 1976-2021 e 1976-2023, come riportato da Roshydromet (2021, 2023).



D. Tendenza lineare delle temperature medie mensili dell'aria per Gennaio 2001-2021, secondo Sherstyukov (2023)



E. Temperature medie stagionali dell'aria da Dicembre 2023 a Febbraio 2024, in base ai dati Roshydromet (2024)



F. Aree di crescente profondità di scongelamento stagionale nello strato di permafrost.

Fonte dei dati: <https://permafrost.su/>

Secondo l'ipotesi, la sezione ascendente del pennacchio si trova a sud delle penisole Gyda e Taimyr e presenta più rami. Il diametro della testa del pennacchio è stimato essere di 1.200–1.500 km, mentre la zona di dispersione del flusso magmatico può raggiungere i 2.500–3.000 km. Questa regione comprende le strutture della Placca Siberiana Occidentale e del Cratone Siberiano Orientale.

Attualmente, la testa del pennacchio sta esercitando un'influenza sulla base del Cratone della Siberia Orientale, diffondendo flussi magmatici sotto il suo territorio. Questo processo sta probabilmente contribuendo ad

aumentare l'attività sismica lungo i margini delle placche, comprese aree come il Baikal e persino gli Urali. La causa di tali anomalie in particolare nelle parti marginali delle placche è la destabilizzazione delle placche dovuta all'ammorbidimento dell'astenosfera sottostante e un leggero sollevamento della parte centrale del blocco Siberiano della crosta terrestre, cioè le strutture tettoniche della Placca Siberiana Occidentale e del Cratone Siberiano Orientale, insieme alla struttura tettonica del sistema piegato Verkhojansk-Chukotka.

Aumento dell'attività sismica come indicatore della destabilizzazione della placca tettonica a causa dell'attività del Pennacchio Magmatico Siberiano

La metodologia di analisi dell'attività sismica ha incluso il download e l'elaborazione speciale dei dati ottenuti dal sito Web del Centro Sismologico Internazionale (ISC). Poiché i dati contengono diverse fonti provenienti da diversi paesi e istituti di ricerca, oltre a diversi tipi di magnitudo (M_w, M_s, M_b, M_L, M_D, ecc.), è stato eseguito un determinato algoritmo di elaborazione dei dati per selezionare il tipo di magnitudo appropriato dalle diverse fonti (vedi Appendice 1). L'idea principale dell'algoritmo di elaborazione era quella di selezionare il valore mediano tra i tipi di magnitudo più comuni per ciascuno degli eventi, poiché per ogni evento diverse fonti fornivano diversi tipi di magnitudo e valori al database ISC. In media, questa elaborazione porta ad una piccola diminuzione di grandezza rispetto al valore massimo presentato, ma come l'esperienza ha dimostrato l'algoritmo basato sulla mediana produce risultati che si

allineano bene con la legge di Gutenberg-Richter e altri modelli, e concorda abbastanza bene con i dati di altre risorse sismologiche come IRIS e USGS.

I dati ottenuti tramite l'algoritmo sono stati filtrati in base ai tipi di evento presenti nel database ISC (vedi Appendice 1) per escludere gli eventi causati da attività umane durante le operazioni minerarie, come esplosioni, sospette esplosioni, crolli di roccia, ecc. Inoltre, poiché ci sono molte imprese minerarie in tutta la Russia, il database ISC è stato incrociato con i dati del Servizio geofisico unificato dell'Accademia Russa delle Scienze⁴⁴ a partire da Gennaio 2025, che elenca tutte le esplosioni note in Russia. Questi eventi sono stati anche esclusi per garantire che il set di dati risultante non contenesse eventi attribuibili a esplosioni.

⁴⁴ Centro Federale di Ricerca, Servizio Geofisico Unificato dell'Accademia Russa delle Scienze <http://www.ceme.gsras.ru/zr/contents.html>

Consideriamo ora i risultati dell'analisi dei dati nella regione del pennacchio magmatico in aumento e nelle aree periferiche dei principali blocchi tettonici che colpisce direttamente. Poiché il Cratone Siberiano è considerato una piattaforma asismica relativamente stabile, anche un piccolo numero di terremoti all'interno dei suoi confini sarebbe considerato un'anomalia.

Fig. 44 illustra la distribuzione della densità sismica in tutta la Russia. Nella regione siberiana, la maggiore concentrazione di terremoti si osserva,

come previsto, nelle aree corrugate: la Catena dei Monti Verchojansk a est, la Dorsale di Gakkel, gli Urali a ovest e la regione dell'Altai-Sayan a sud. Eventi isolati sono presenti anche all'interno della Siberia stessa: diversi terremoti con una magnitudo di circa 4.0 sono stati registrati a sud della Penisola del Tajmyr. Diamo un'occhiata più da vicino alla dinamica dei terremoti in aree localizzate all'interno della Siberia e nelle regioni adiacenti.

M3+ Earthquakes Density on the Territory of Siberia

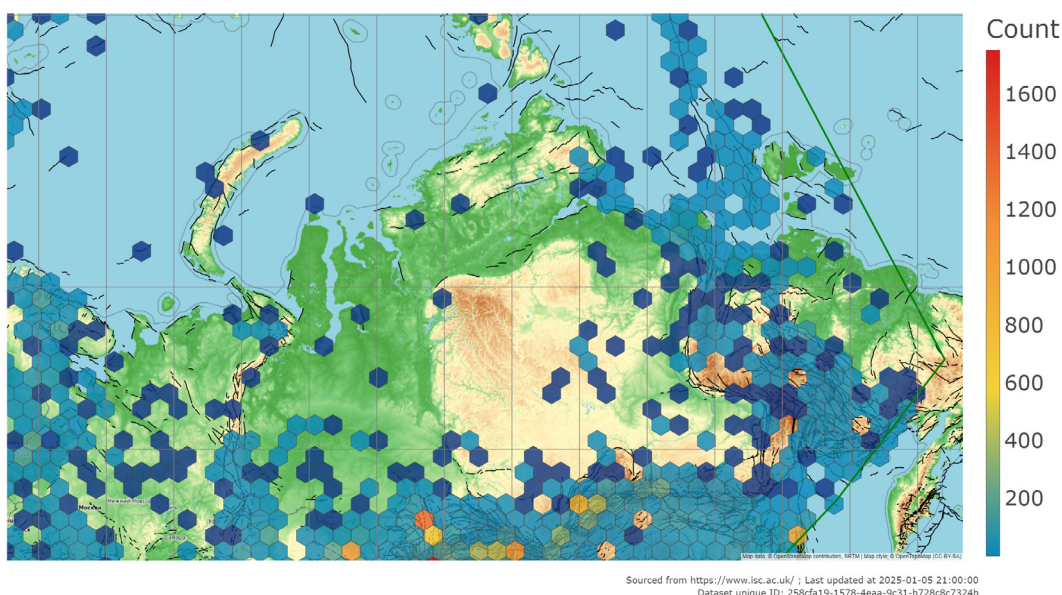


Fig. 44
Densità sismica di magnitudo 3.0 e superiore in Siberia dal 1990 al 2024.

Fonte: Database ISC

Sulla base di strutture geologiche, sono state identificate aree in cui il pennacchio del mantello può esercitare influenze diverse (Fig. 45). È stata selezionata l'area del pennacchio stesso, dove l'impatto può essere associato all'intrusione e alla pressione del magma e della fase fluida (gas magmatici). Nelle parti marginali della

Piattaforma Siberiana Orientale e della Placca Siberiana Occidentale, l'influenza del pennacchio sulla sismicità è probabilmente causata dalla posizione destabilizzata di densi blocchi della crosta terrestre.

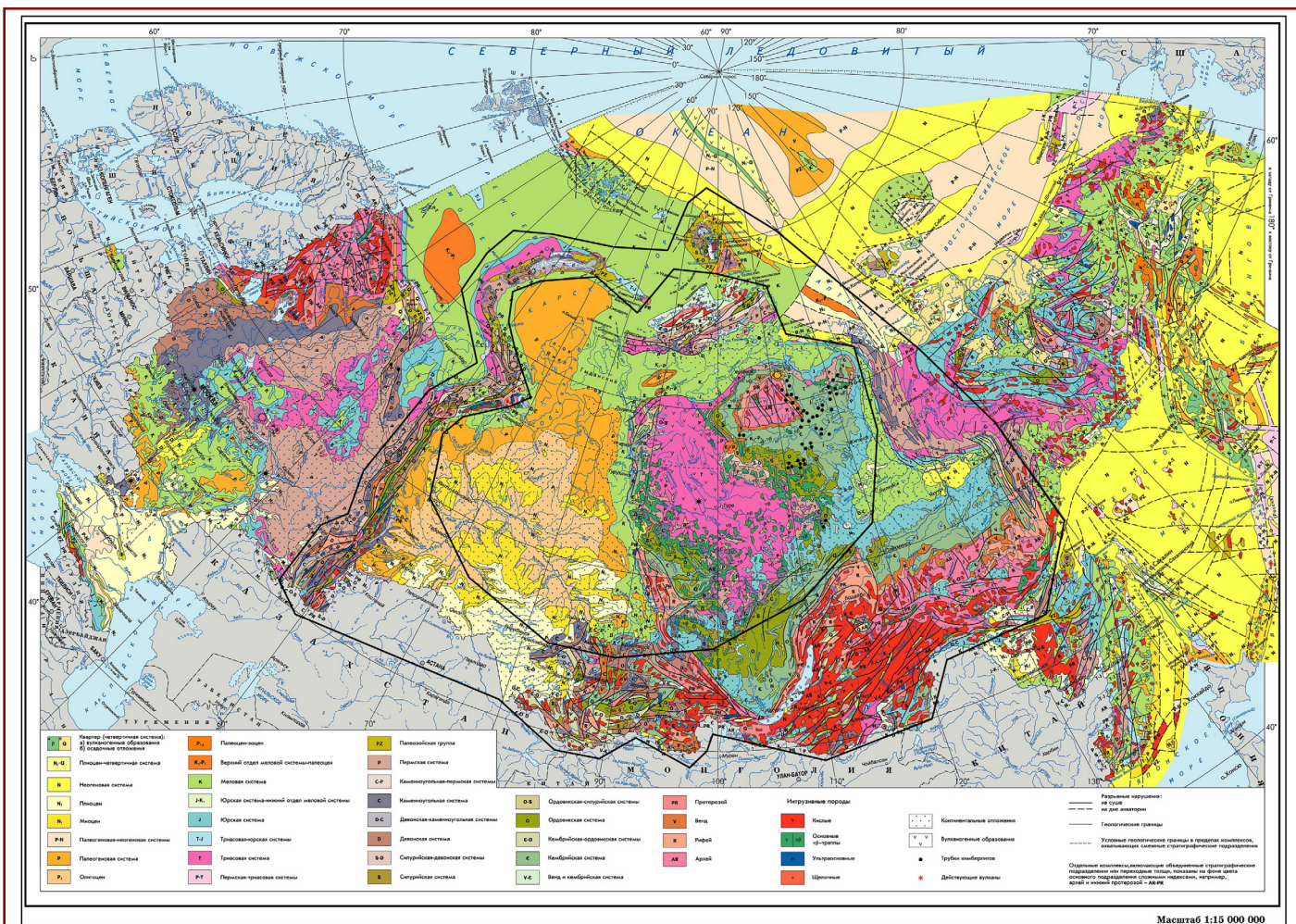


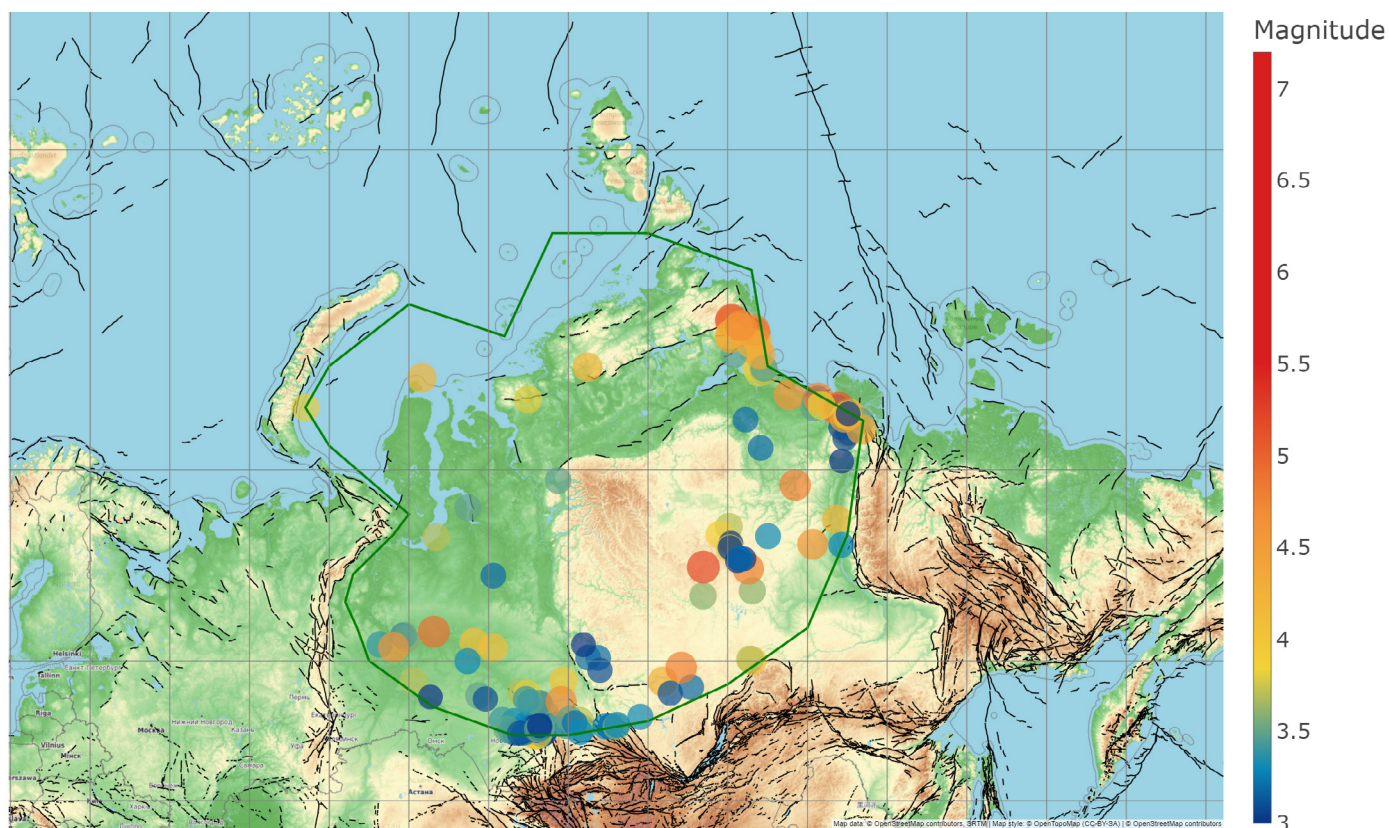
Fig. 45

L'area delimitata dalle strutture geologiche nella zona di intrusione e diffusione laterale del Pennacchio Siberiano (sito nero interno) è stata utilizzata per l'analisi della sismicità. Il sito nero esterno corrisponde all'area degli effetti marginali dalla pressione del Pennacchio Siberiano sulle placche.

Esaminiamo i terremoti nella regione centrale del Pennacchio Siberiano in modo più dettagliato. La fig. 46 presenta una mappa che mostra la distribuzione dei terremoti con magnitudo 3.0 e superiori. I terremoti sono registrati nella zona meridionale della penisola di Taimyr. Particolarmente preoccupanti sono due recenti terremoti che si sono verificati in questa regione in Agosto e Settembre 2024, con magnitudo rispettivamente di 3.5 e 3.8. Terremoti simili sono stati registrati nella parte

meridionale della penisola di Gyda (M3.5) e nella penisola di Yamal (M3.7 e M4.2) a una profondità di 10 km. Questi eventi sono stati registrati nella zona corrispondente alla localizzazione della testa del Pennacchio Siberiano, una tendenza preoccupante che sarà spiegata più dettagliatamente in seguito.

M3+ Earthquakes, Siberian Plume Region



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

Fig. 46

Mappa dei terremoti con una magnitudo 3.0 e superiore nella regione del Pennacchio Siberiano dal 1990 al 2024.

Fonte: Database ISC.

Nella regione del Pennacchio Siberiano evidenziata, un totale di 205 terremoti con una magnitudo 3.0 e superiore sono stati registrati tra il 1990 e il 2024. Un aumento del numero di terremoti è stato osservato nel 1995 (Fig. 47), allineandosi con la tendenza globale di aumento dell'attività sismica nel 1995 associata alla crescente attività magmatica. Dal 2007, c'è stato un significativo aumento del numero di terremoti, seguito da un graduale

declino dell'attività sismica. A partire dal 2021, il numero di terremoti è nuovamente aumentato bruscamente, superando i livelli annuali precedenti. Pertanto, si osserva una crescita ondulatoria dell'attività sismica nella regione del Pennacchio Siberiano. Negli ultimi anni, sono stati registrati significativamente più eventi rispetto a quelli tipici per questa zona in passato.

M3+ Earthquakes, Siberian Plume Region

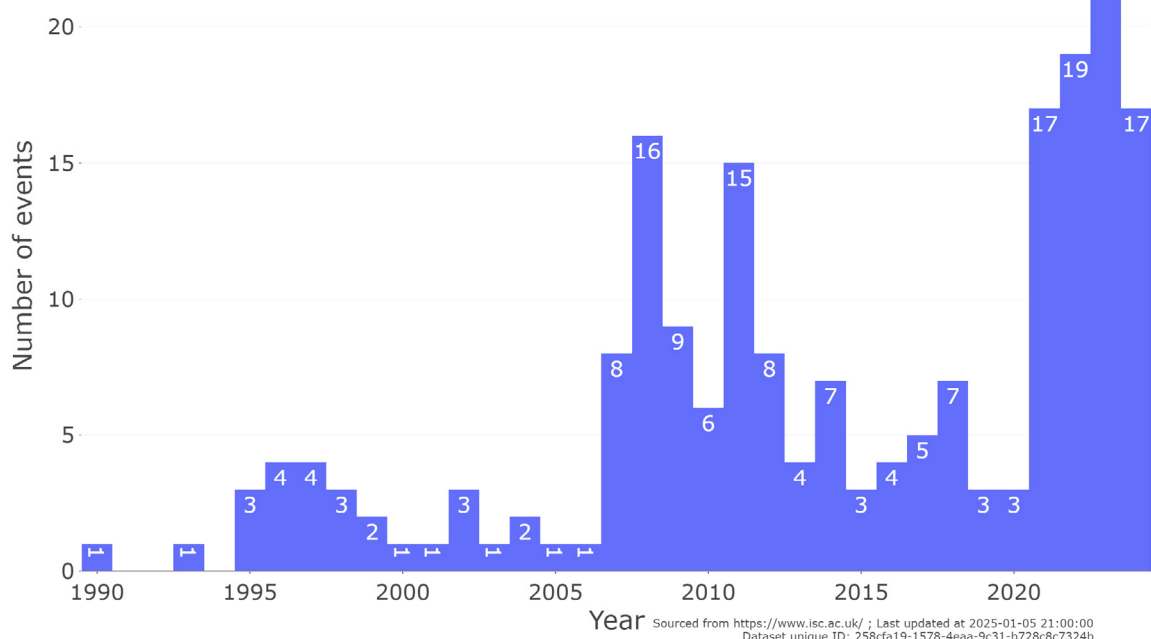


Fig. 47

Numero di terremoti di magnitudo 3.0 e superiore nella regione del Pennacchio Siberiano dal 1990 al 2024.

Fonte: Database ISC.

Dopo un terremoto di M5.0 nel 1990, è stata osservata una graduale diminuzione delle magnitudo e il numero di terremoti (Fig. 48). Dal 1990 al 2007 sono stati registrati solo tre terremoti di magnitudo superiore a 4.5. Dal 2007, c'è stato un graduale aumento delle grandezze sismiche. Per la prima volta nella

storia registrata, terremoti con magnitudo di 5.1 e 5.2 si sono verificati a partire dal 2019. Tutti i terremoti di M4.5 e superiori si trovano alla periferia del pennacchio (Fig. 49), con alcuni che si verificano in aree stabili dove non esistono problemi noti.

M3+ Earthquakes, Siberian Plume Region

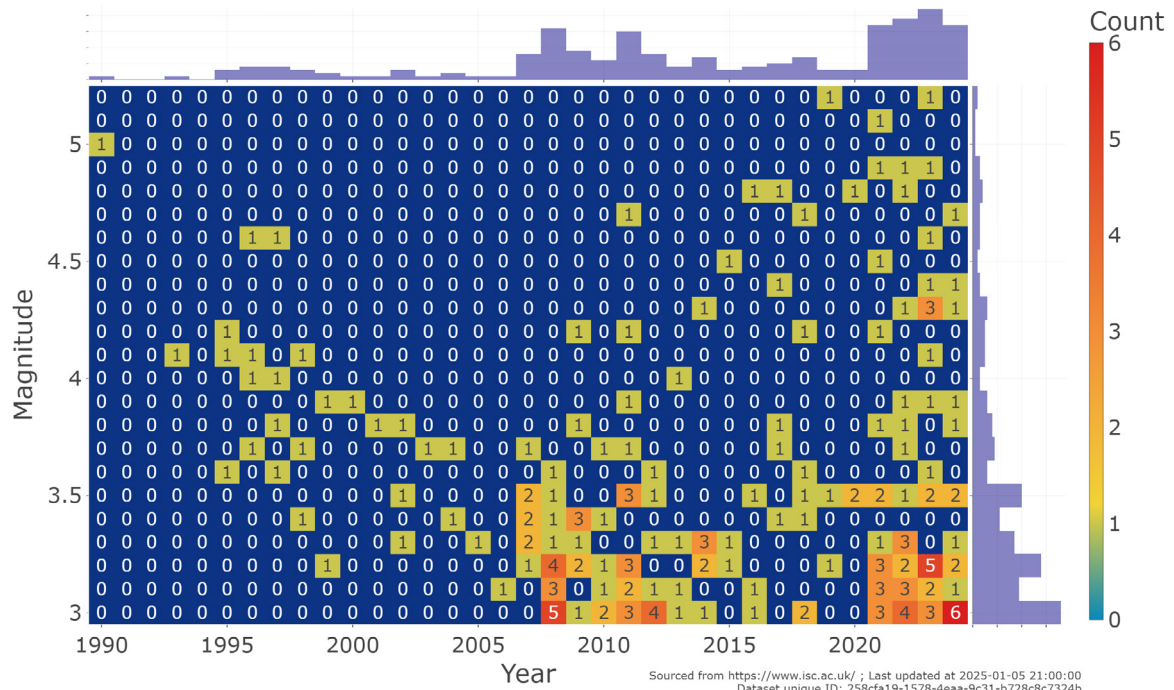


Fig. 48

Distribuzione dei terremoti verificatisi nella regione del Pennacchio Siberiano dal 1990 al 2024 in base alla magnitudo.

Fonte dei dati: ISC.

M4.5+ Earthquakes, Siberian Plume Region

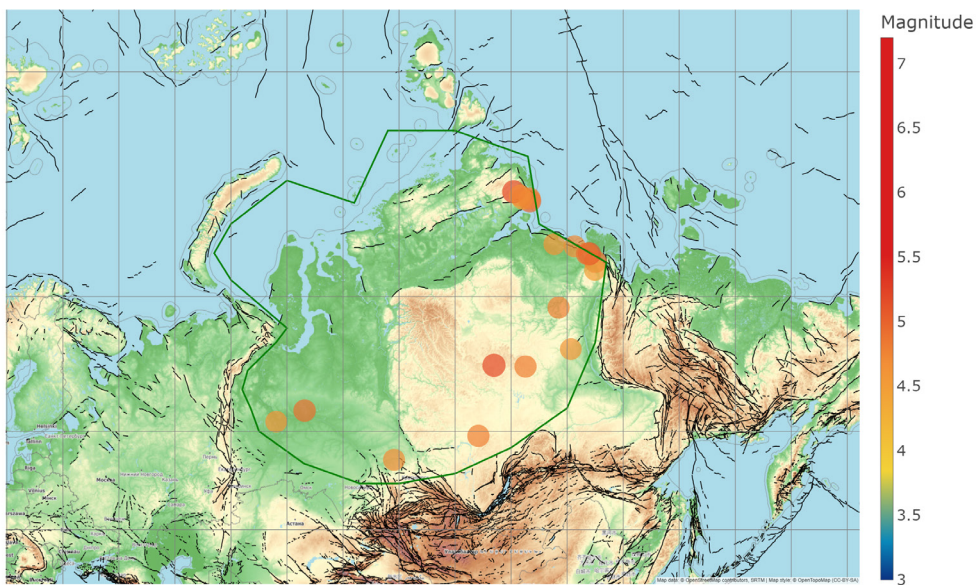


Fig. 49

Mapa dei terremoti di M4.5 e superiori nell'area del Pennacchio Siberiano dal 1990 al 2024.

Fonte dati: ISC.

Nello stesso anno del 2007, un terremoto di M3,7 è stato registrato per la prima volta a una profondità di 33 km vicino al confine di Moho (Fig. 50). Dopo il 2014, i terremoti alla base della crosta, a profondità di 30-35 km, hanno iniziato a verificarsi con una frequenza

significativamente maggiore, con magnitudo che si avvicinavano a 5.0. Tutti questi eventi si trovano lungo la periferia della zona presunta del pennacchio.

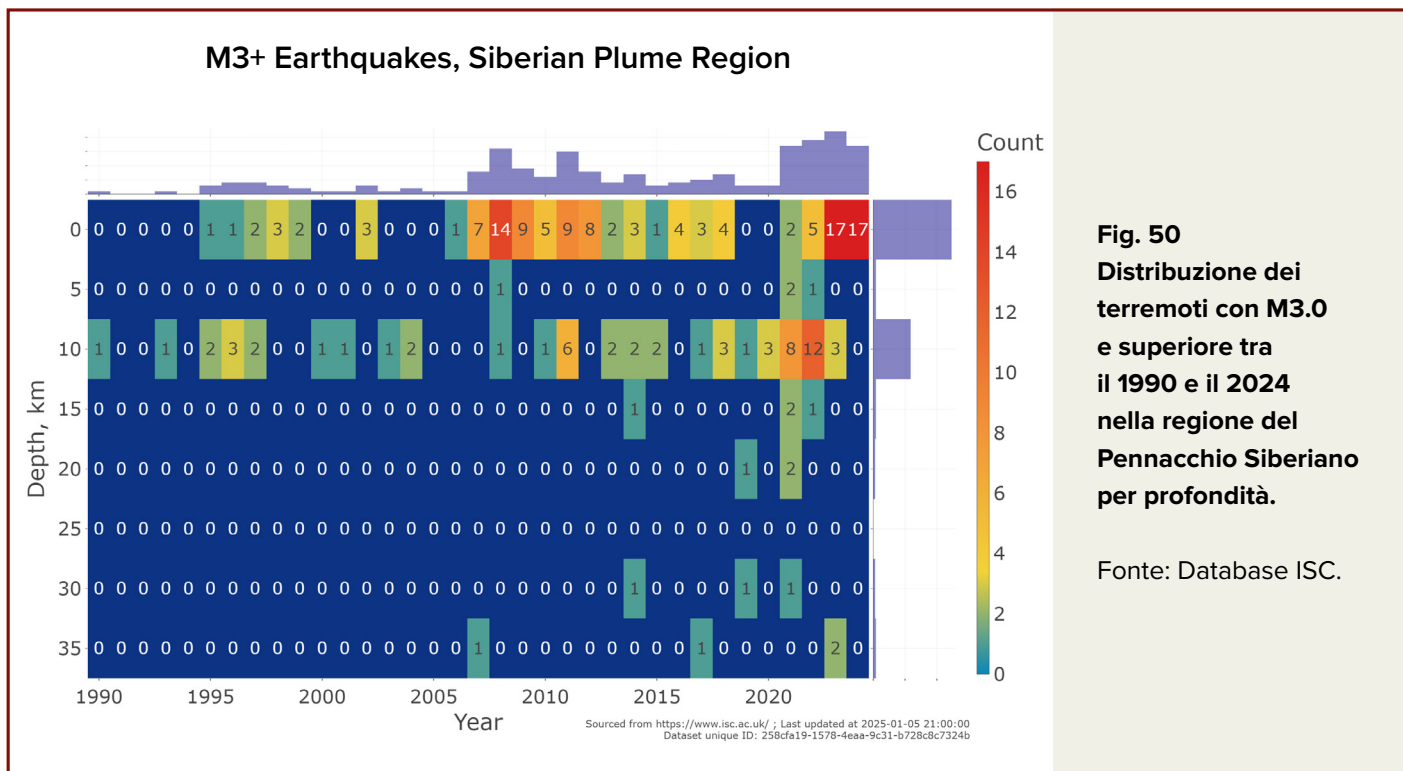


Fig. 50
Distribuzione dei terremoti con M3.0 e superiore tra il 1990 e il 2024 nella regione del Pennacchio Siberiano per profondità.

Fonte: Database ISC.

L'analisi dei terremoti nella presunta area del Pennacchio Siberiano dimostra aumenti ondulatori della sismicità: il numero di terremoti è in aumento, le loro magnitudo sono in aumento e si verificano a livelli più profondi. Ciò indica processi deformativi della piastra sotto l'immensa pressione del magma dal basso. La progressione di questi processi porterà inevitabilmente a un'eruzione del Pennacchio Siberiano nel prossimo futuro a causa dei seguenti motivi.

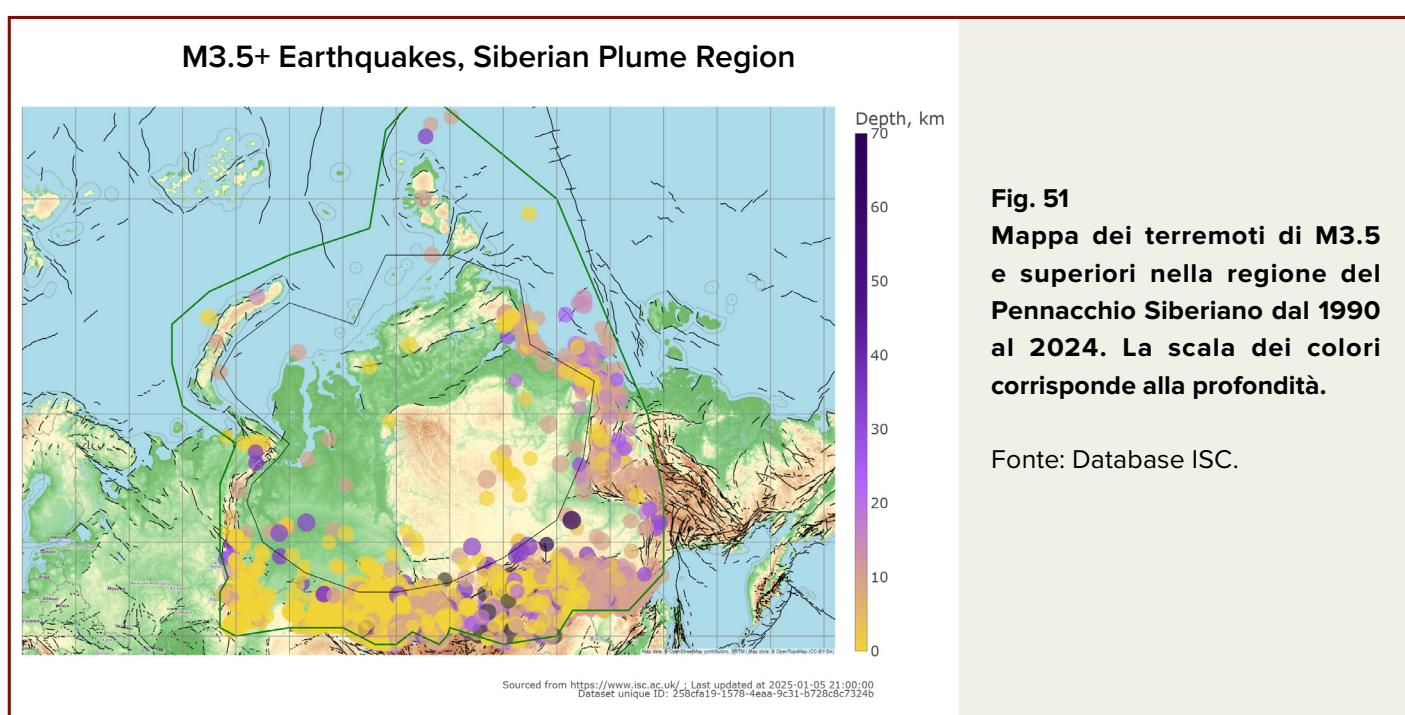
La base del Cratone della Siberia Orientale è cementata con rocce magmatiche e metamorfiche, formando una densa crosta monolitica modellata da eruzioni avvenute 250

milioni di anni fa. L'emergere di forti terremoti con magnitudo a partire da 7.0 in questa regione indicherebbe che le strutture della piattaforma del Cratone Siberiano stanno subendo deformazioni che superano i limiti di resistenza delle rocce. Per illustrare come il Cratone monolitico Siberiano potrebbe fratturarsi sotto la pressione del pennacchio, immaginate come una lastra di vetro inizia a incrinarsi poco prima che si frantumi completamente. Così, la comparsa di forti terremoti in questa regione potrebbe segnalare l'inizio di una breccia del pennacchio in superficie entro letteralmente un giorno.

Attualmente, per comprendere la situazione attuale con l'avanzamento del pennacchio e la solidità della crosta terrestre nell'area del Pennacchio magmatico Siberiano, è di fondamentale importanza installare sensori sismici aggiuntivi, preferibilmente in pozzi profondi diversi chilometri. Ciò consentirà un'analisi tomografica sismica dettagliata della crosta e del mantello terrestre e consentirà un monitoraggio continuo della posizione e dell'attività del pennacchio

(vedere la sezione "Scenario 3: Degassamento pianificato e controllato").

Si dovrebbe prestare attenzione alla distribuzione dei terremoti per profondità nell'area del Pennacchio Siberiano e nelle sue zone periferiche (Fig. 51). I terremoti a profondità vicino al confine di Moho (maggiore di 30 km) e nel mantello si verificano principalmente in regioni piegate, e apparentemente delineano la presunta posizione del Pennacchio Siberiano.



Esaminiamo l'attività sismica in particolare nelle parti periferiche del Pennacchio Siberiano. Geologicamente, queste aree appartengono a fasce piegate e regioni sismicamente attive, dove la sismicità può essere causata sia dai movimenti tettonici che dall'influenza del pennacchio magmatico. Il grafico del numero di terremoti mostra un quadro misto di fattori di sismicità sovrapposti (Fig. 52). Picchi significativi di attività sismica sono visibili in alcuni anni. Per una migliore comprensione della natura di questi processi, ogni regione deve essere considerata individualmente.

Un'analisi delle strutture piegate di Verkhojansk e delle zone di faglia sul fondo del mare di Laptev (Fig. 53) rivela picchi notevoli nei terremoti di M3.0 e superiori, durante gli anni 2013 e 2021-2022 (Fig. 54). Tali picchi sono caratteristici delle fasi di intrusione del magma, che causano interruzioni significative nell'integrità della crosta terrestre e il rilascio di contenuto di fluido attraverso fratture di roccia e faglie vicine. Questi fenomeni sono spesso accompagnati da un aumento dei terremoti di bassa magnitudo, il verificarsi di sciami sismici e talvolta anche serie di sciami.

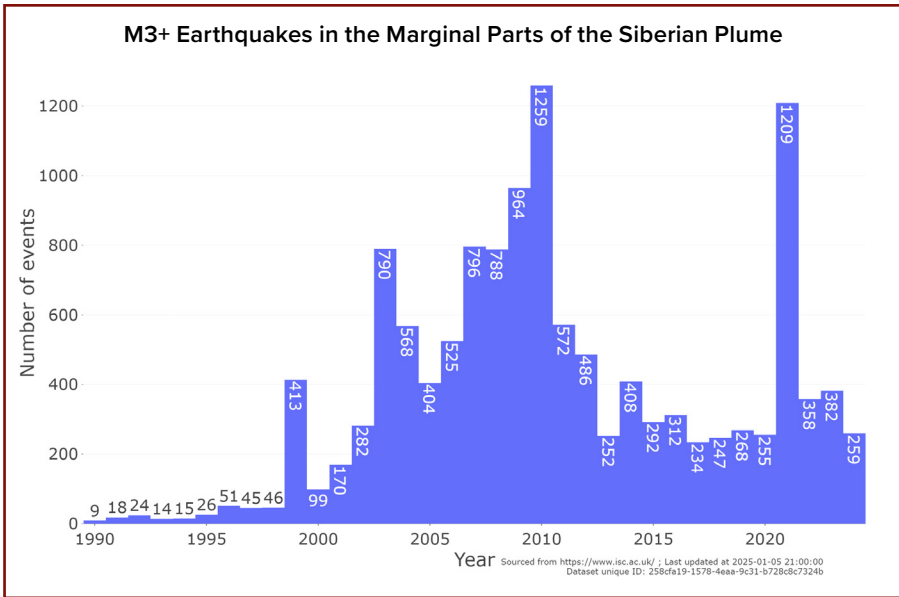


Fig. 52
Numero di terremoti di M3.0 e superiori nelle aree periferiche del Pennacchio Siberiano dal 1990 al 2024. I terremoti all'interno del Pennacchio sono stati esclusi (Fig. 47).

Fonte: Database ISC.

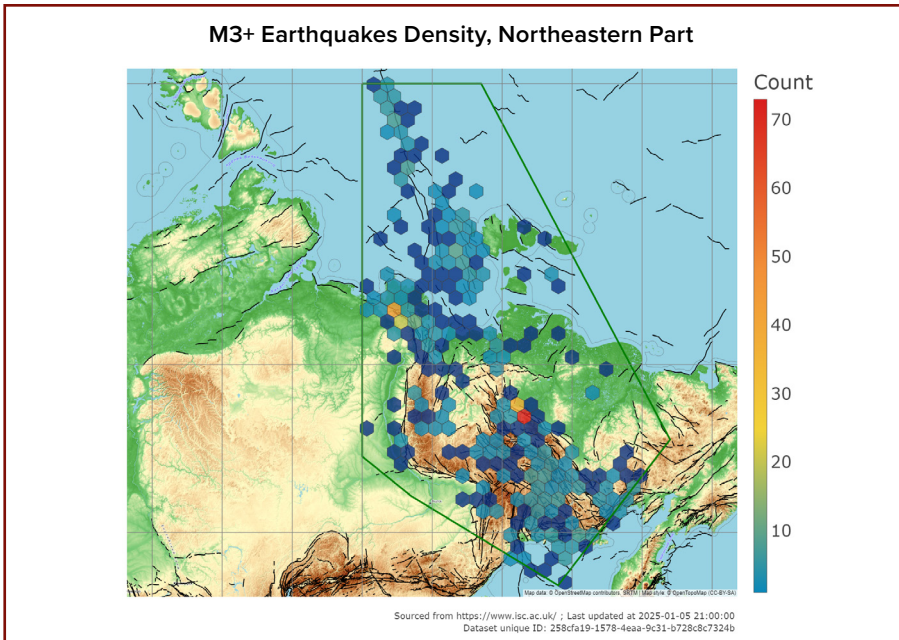


Fig. 53
Densità sismica dei terremoti di M3.0 e superiori in una sezione selezionata sul bordo nord-orientale del Blocco Crostale Siberiano dal 1990 al 2024. Le linee di faglia sono contrassegnate in nero.

Fonte: Database ISC.

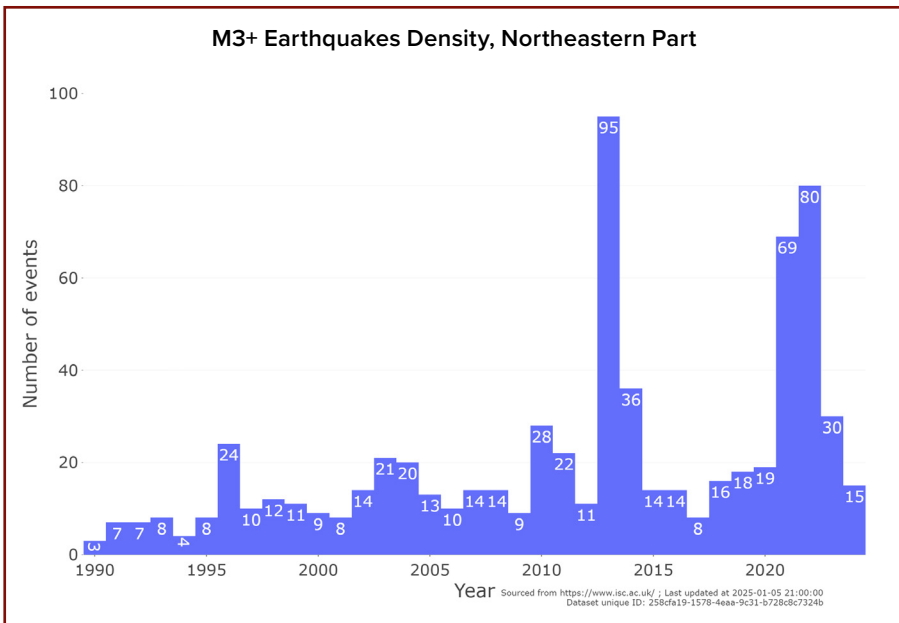


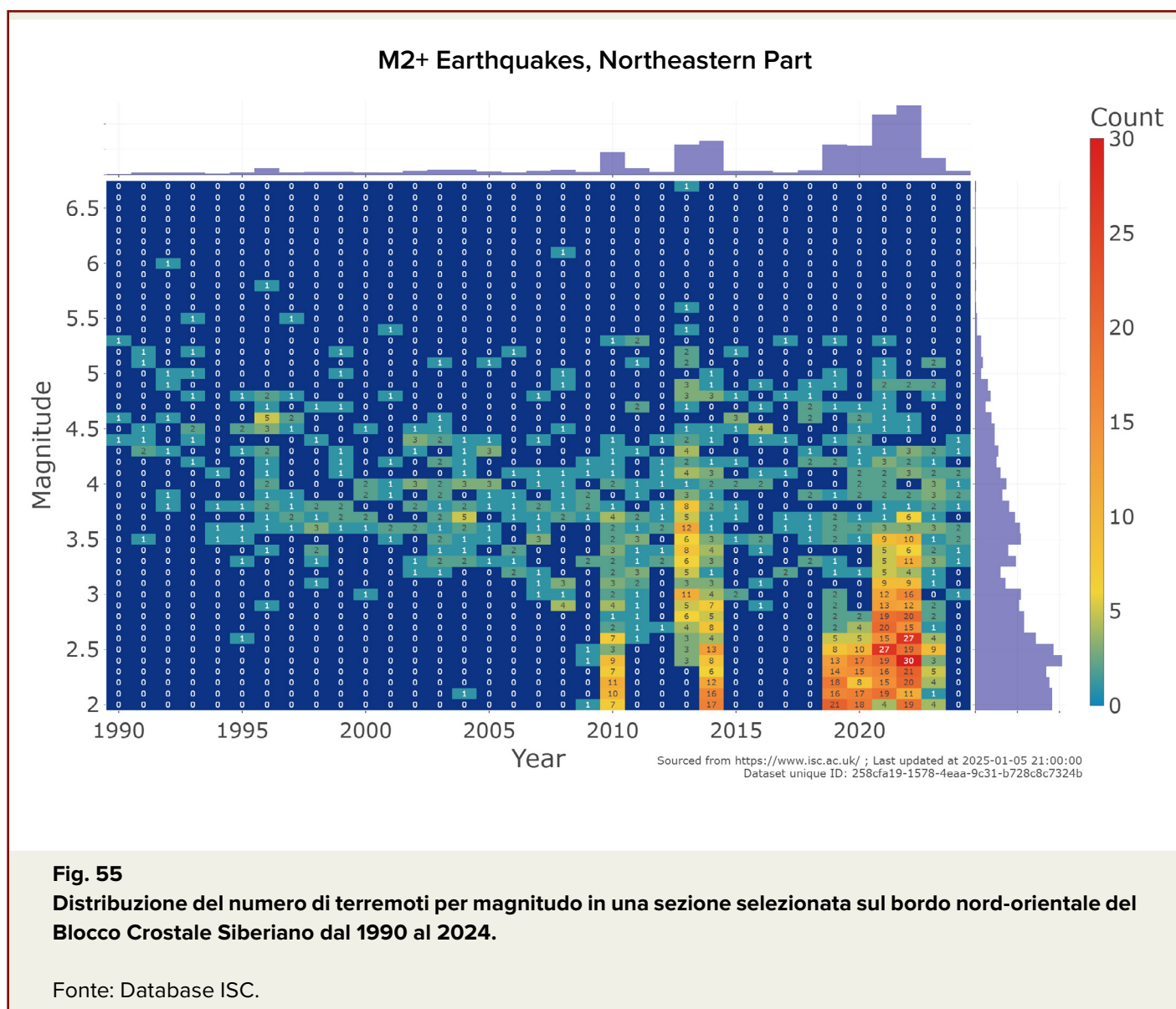
Fig. 54
Grafico del numero di terremoti di magnitudo 3 e superiore in una sezione selezionata sul bordo nord-orientale del blocco crostale siberiano dal 1990 al 2024.

Fonte: Database ISC.

Un'analisi delle grandezze sismiche in questa zona rivela un picco nel numero di terremoti con magnitudo da 2 a 3,5 nel 2010, 2013-2014 e un aumento significativo dal 2019 in poi (Fig. 55). Dal 2019, c'è stato anche un notevole aumento del numero di terremoti che hanno colpito la crosta terrestre quasi alla sua base, a profondità che raggiungono i 35 km (Fig. 56). Nel 2013, la

regione ha vissuto il suo primo terremoto con una magnitudo di 6,7, indicando chiaramente una fase prolungata di accumulo di pressione o il rilascio di fluidi magmatici accumulati.

Il gruppo di terremoti in direzione sud-est dalla penisola di Taimyr (Fig. 57) dovrebbe essere esaminato separatamente.



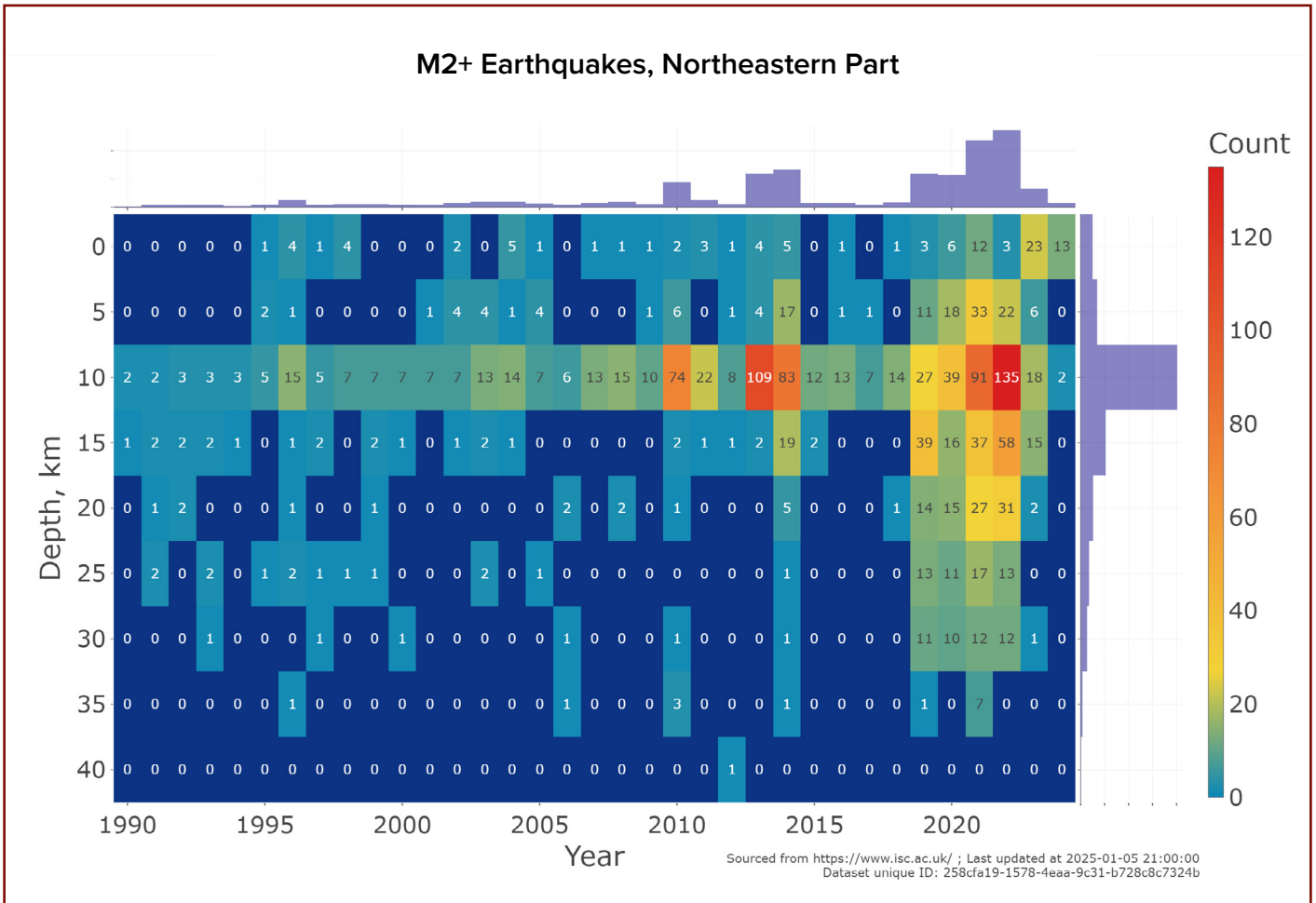


Fig. 56

Distribuzione dei terremoti di M2.0 e superiori per profondità in una sezione selezionata sul bordo nord-orientale del Blocco Crostale Siberiano dal 1990 al 2024.

Fonte: Database ISC.

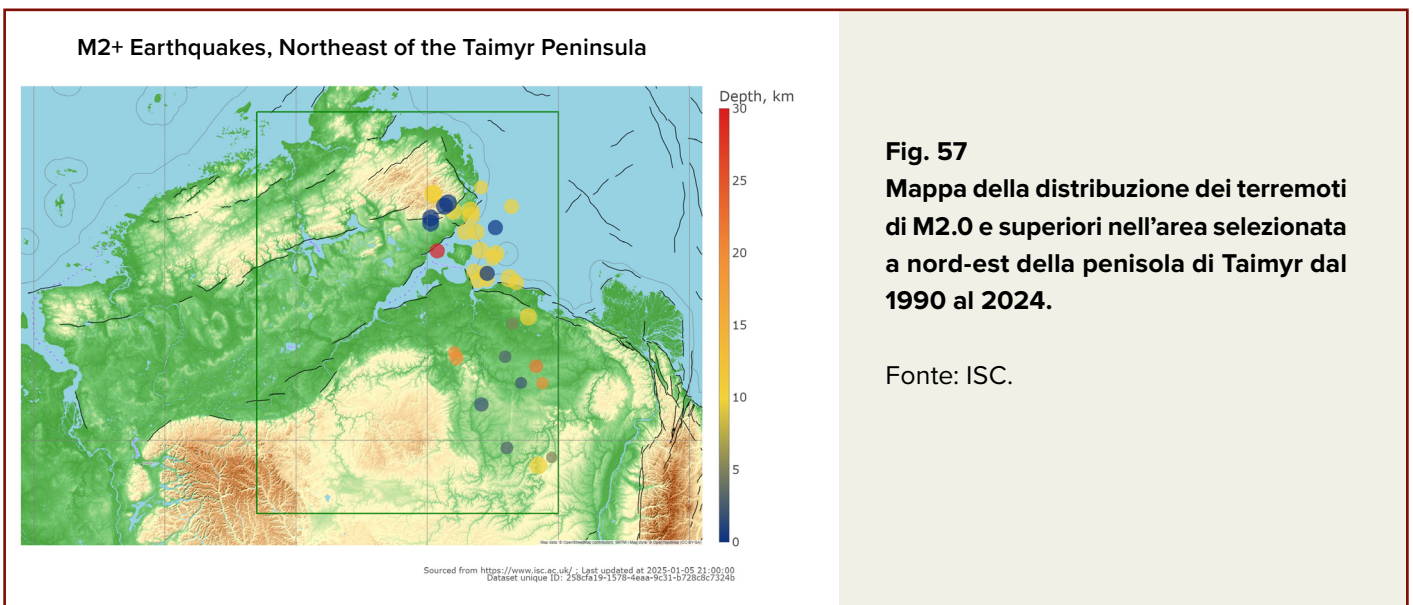


Fig. 57

Mappa della distribuzione dei terremoti di M2.0 e superiori nell'area selezionata a nord-est della penisola di Taimyr dal 1990 al 2024.

Fonte: ISC.

Nel 2019-2020, quest'area ha anche registrato un picco di attività sismica di magnitudo da bassa a moderata (Fig. 58, 59).

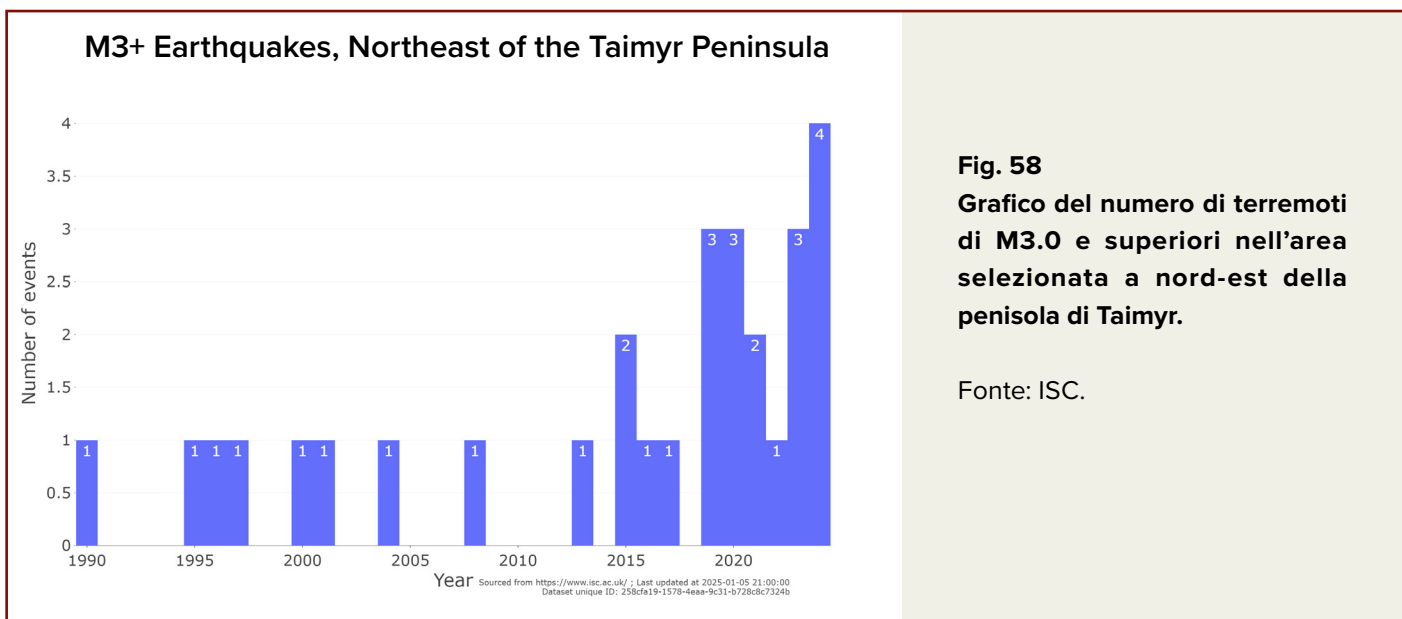


Fig. 58
Grafico del numero di terremoti di M3.0 e superiori nell'area selezionata a nord-est della penisola di Taimyr.

Fonte: ISC.

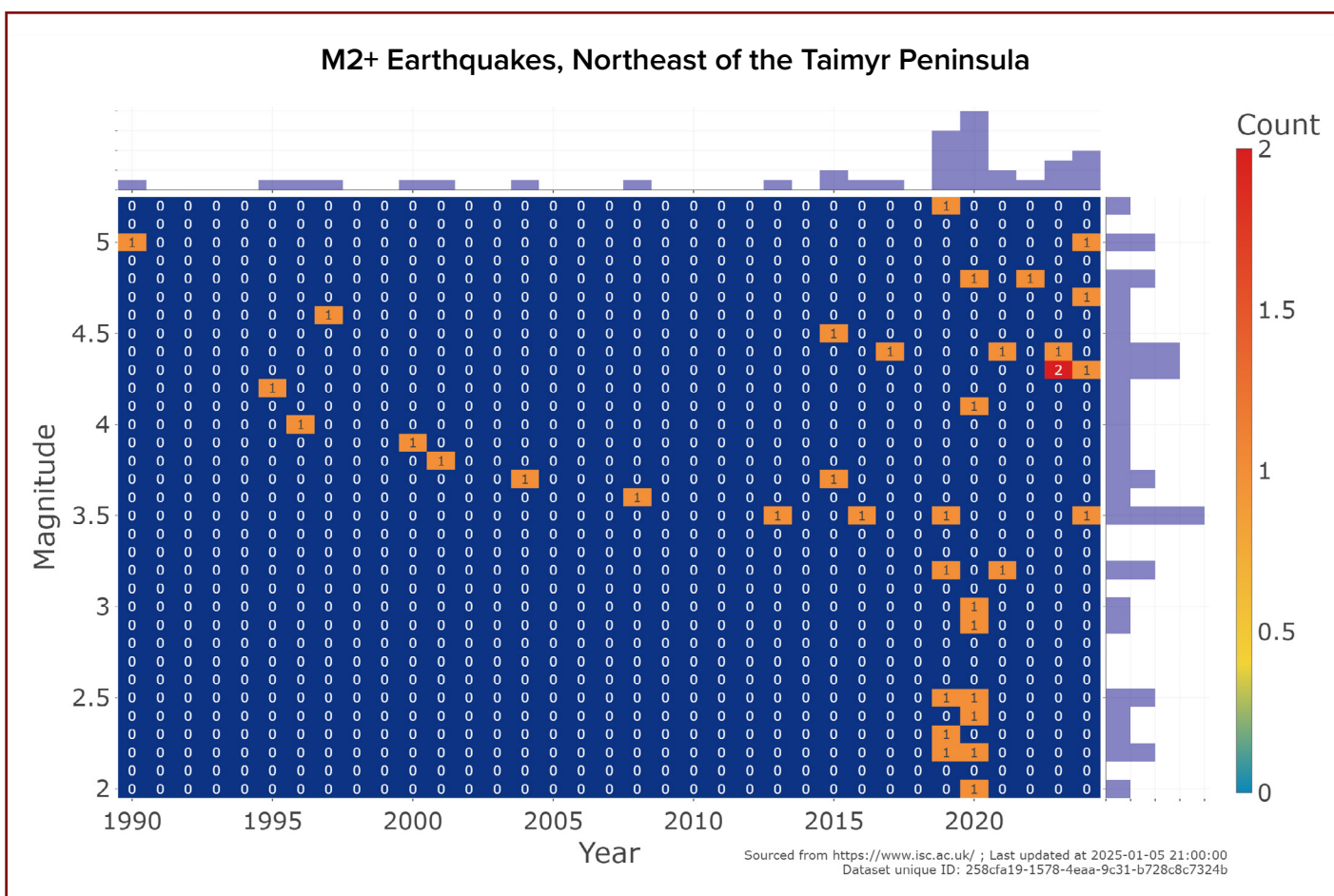


Fig. 59
Distribuzione del numero di terremoti per magnitudo nell'area selezionata a nord-est della penisola di Taimyr dal 1990 al 2024.

Fonte: ISC.

Tra il 2019 e il 2020, c'è un notevole aumento in termini di profondità dei terremoti che raggiungono la base della crosta (Fig. 60) durante gli stessi periodi di quelli osservati nell'area della struttura piegata di Verkhoyansk.

Va sottolineato che questa zona è sotto l'influenza della testa del Pennacchio Siberiano. Nonostante il numero relativamente basso di terremoti, l'area presenta una tendenza simile all'aumento della profondità e della frequenza

dei terremoti come nelle strutture piegate di Verkhoyansk, ma a partire dal 2019.

La parte meridionale del territorio esaminato comprende la regione di Altai-Sayan e l'area di Baikal (Fig. 61). Questa è una regione tettonicamente mobile e sismicamente attiva. Picchi di sismicità sono stati osservati nel 1999 e nel 2021 (Fig. 62). Le grandezze sismiche hanno iniziato a crescere nel 2007, raggiungendo M6.8 nel 2021 (Fig. 63).

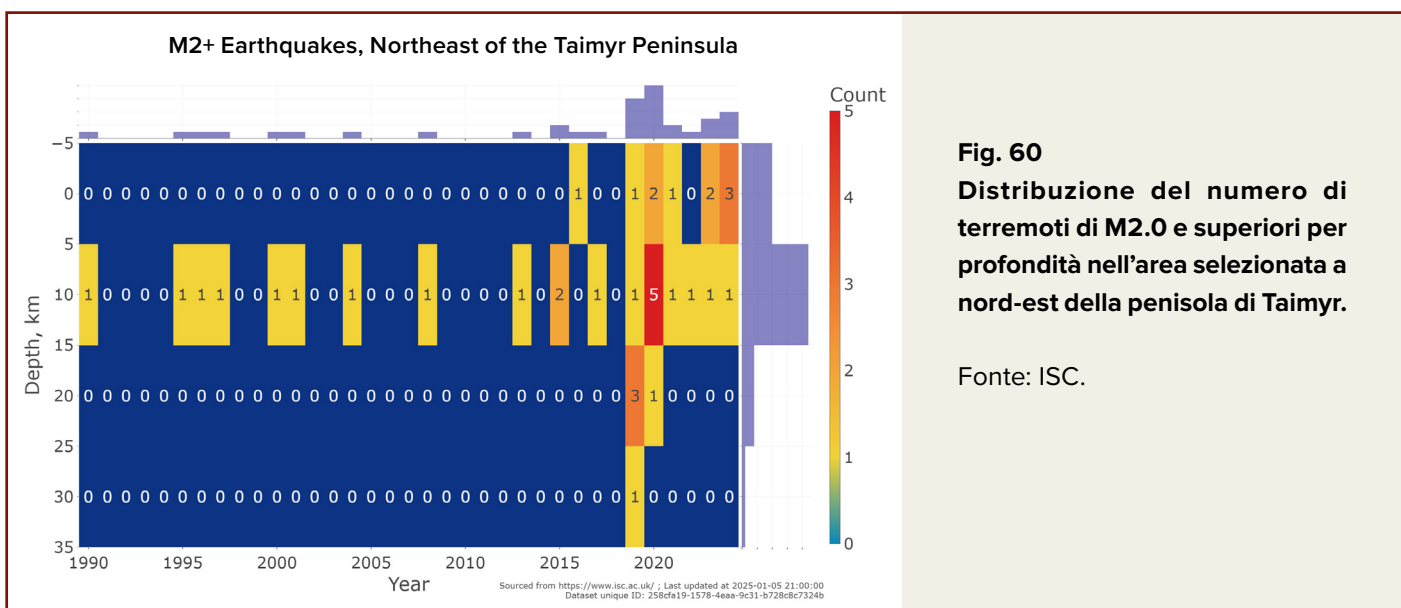


Fig. 60
Distribuzione del numero di terremoti di M2.0 e superiori per profondità nell'area selezionata a nord-est della penisola di Taimyr.

Fonte: ISC.

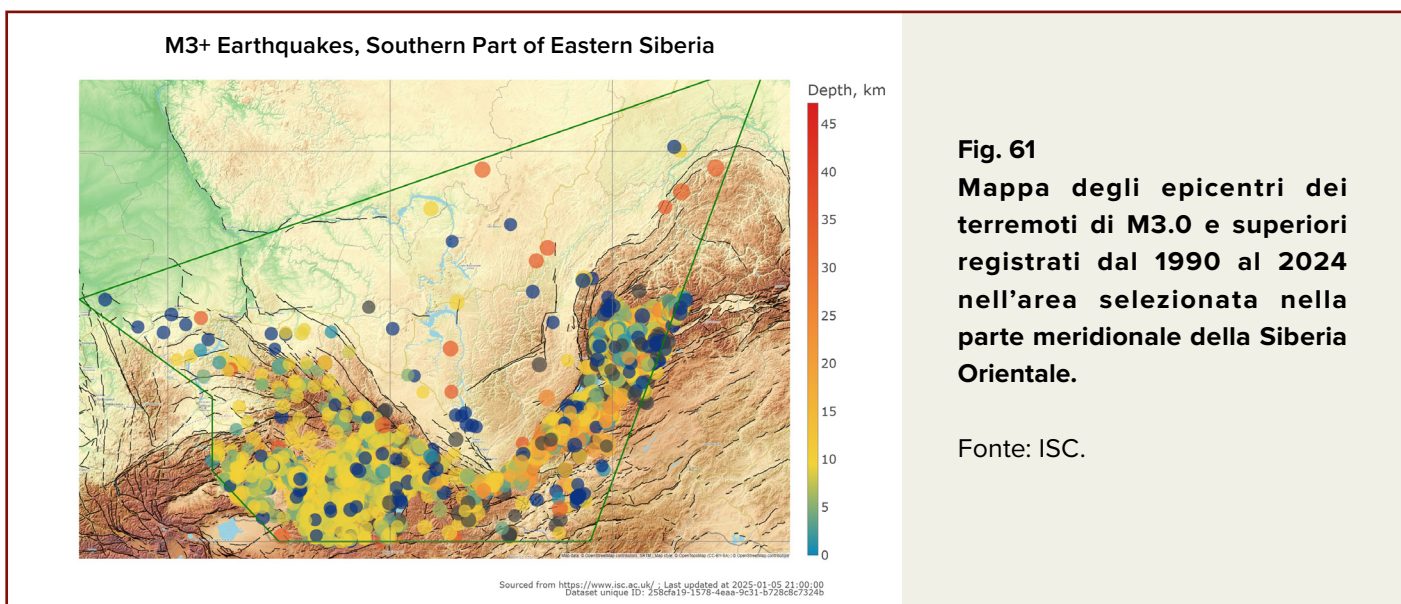


Fig. 61
Mappa degli epicentri dei terremoti di M3.0 e superiori registrati dal 1990 al 2024 nell'area selezionata nella parte meridionale della Siberia Orientale.

Fonte: ISC.

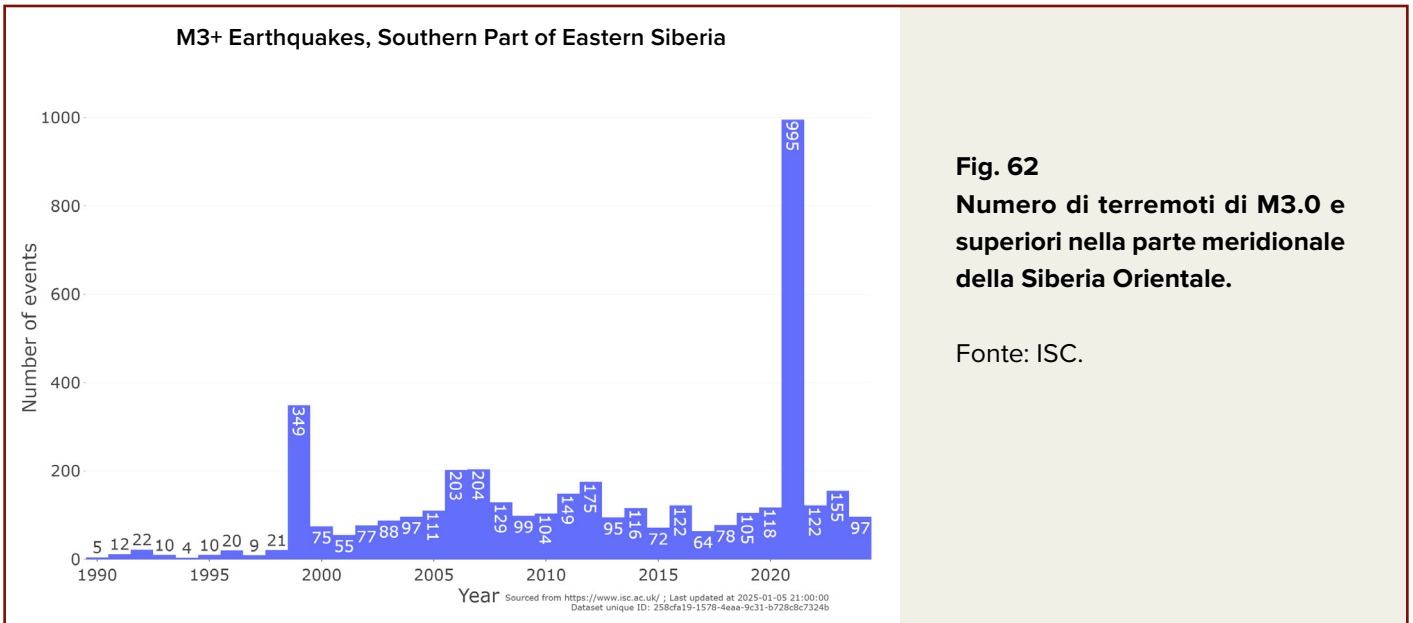


Fig. 62
Numero di terremoti di M3.0 e superiori nella parte meridionale della Siberia Orientale.

Fonte: ISC.

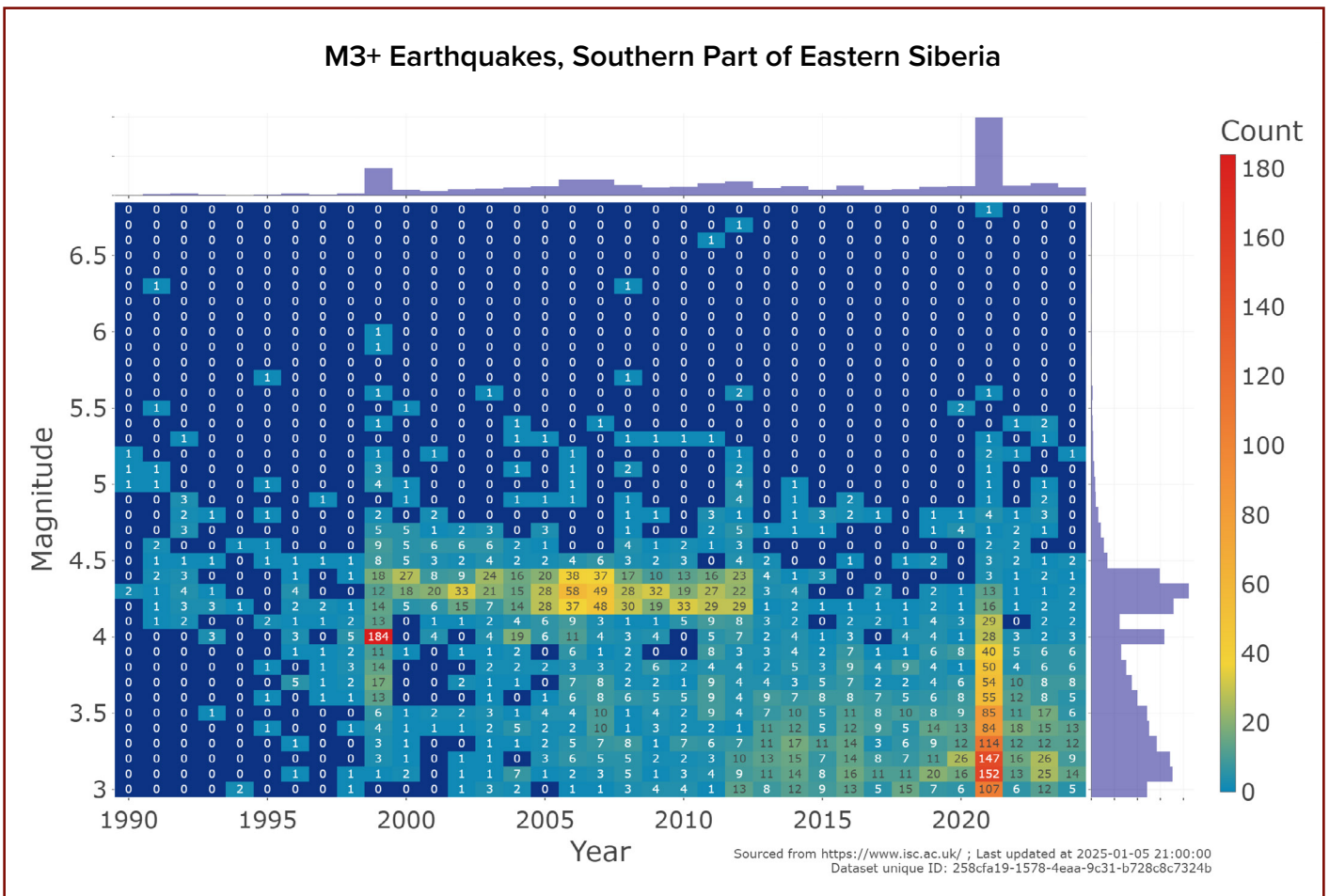


Fig. 63
Distribuzione dei terremoti per magnitudo nell'area selezionata nella parte meridionale della Siberia Orientale dal 1990 al 2024.

Fonte: ISC.

È importante notare il verificarsi di terremoti del mantello sotto il Cratone Siberiano. Già nel 1998, un terremoto di M3.3 è stato registrato a una profondità di 211 km nell'area di Sineclisi di Vilyuy. Questa è stata una scoperta inaspettata, ma un evento ancora più unico è stato un significativo terremoto di M5.1 a una profondità di 627 km nella stessa regione nel 2023 (Fig. 64).

La manifestazione stessa della sismicità a focalizzazione profonda sotto il blocco cratonico stabile della crosta terrestre è un evento eccezionale. Tradizionalmente, si presume che tali terremoti dentro il mantello si verificano nelle cosiddette zone di subduzione; tuttavia, la zona di subduzione più vicina si trova a migliaia di chilometri di distanza e non può influenzare quest'area.

Gli autori di questo rapporto suggeriscono che le cause di questi terremoti a focalizzazione

profonda sono esplosioni dentro il mantello di immensa potenza, che si verificano quando i flussi di magma relativamente più caldi entrano in contatto con quelli relativamente più freddi. Secondo il modello sismo-tomografico, anomalie nelle velocità delle onde sismiche sono osservate nelle posizioni di entrambi i terremoti a focalizzazione profonda. Queste anomalie corrispondono a regioni di flussi relativamente più viscosi e fluidi, che probabilmente riflettono le loro differenze di temperatura. Quindi, questi due terremoti del mantello si sono verificati all'interfaccia di flussi del mantello relativamente freddi e relativamente caldi (Fig. 65), rilasciando quantità significative di energia che hanno generato onde acustiche rilevate dai sensori sismici come terremoti. Ciò indica chiaramente un'attività sostanziale dei flussi del mantello in quest'area.

Location of Deep Earthquakes in Siberia

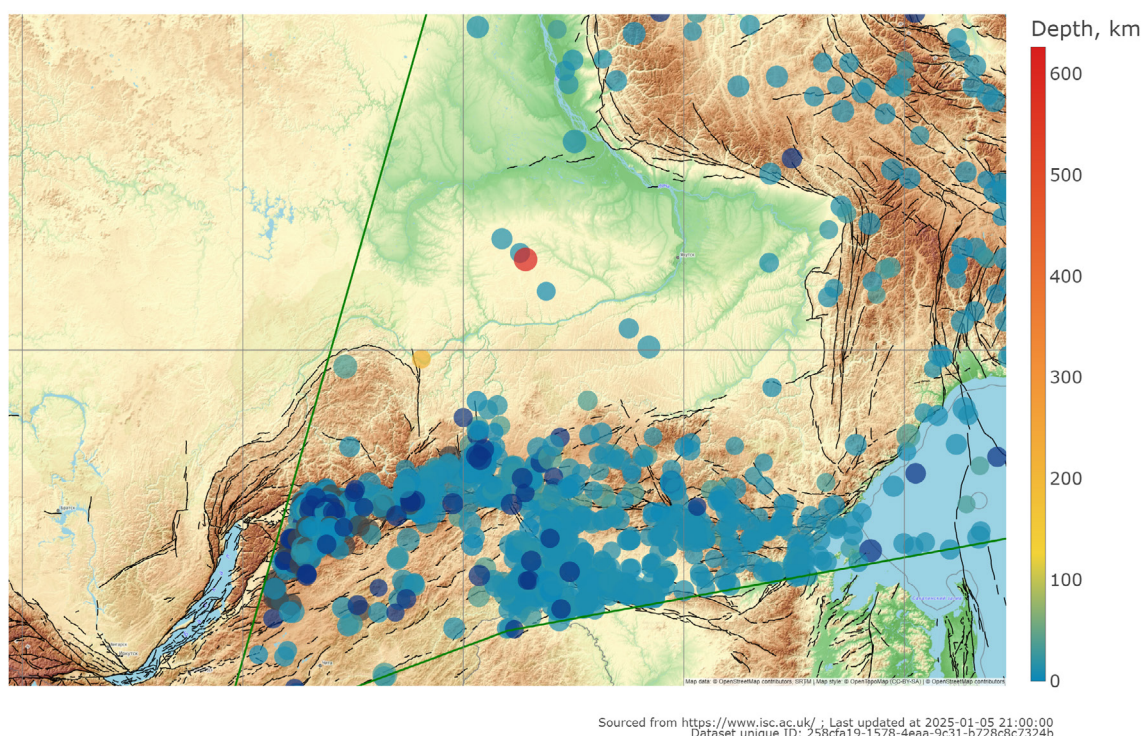


Fig. 64

La mappa segna l'epicentro del terremoto a focalizzazione profonda di M5.1 a una profondità di 627 km (contrassegnato in giallo) sotto la Piattaforma Siberiana nel 2023 e il terremoto di M3.3 a una profondità di 211 km (contrassegnato in giallo).

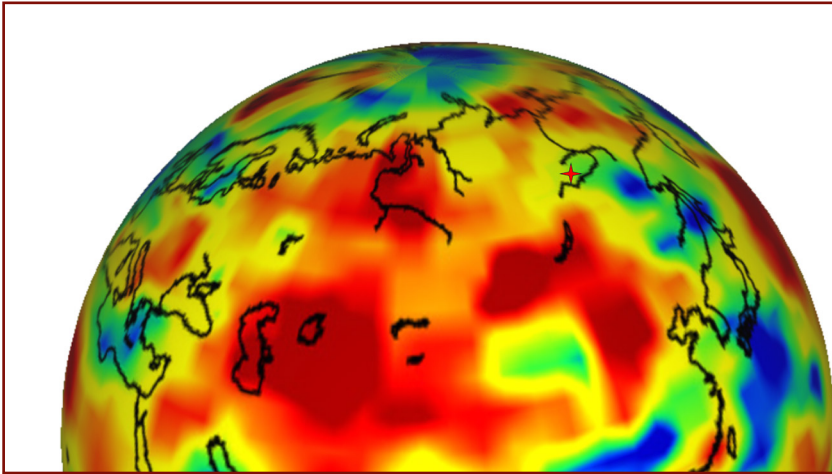


Fig. 65

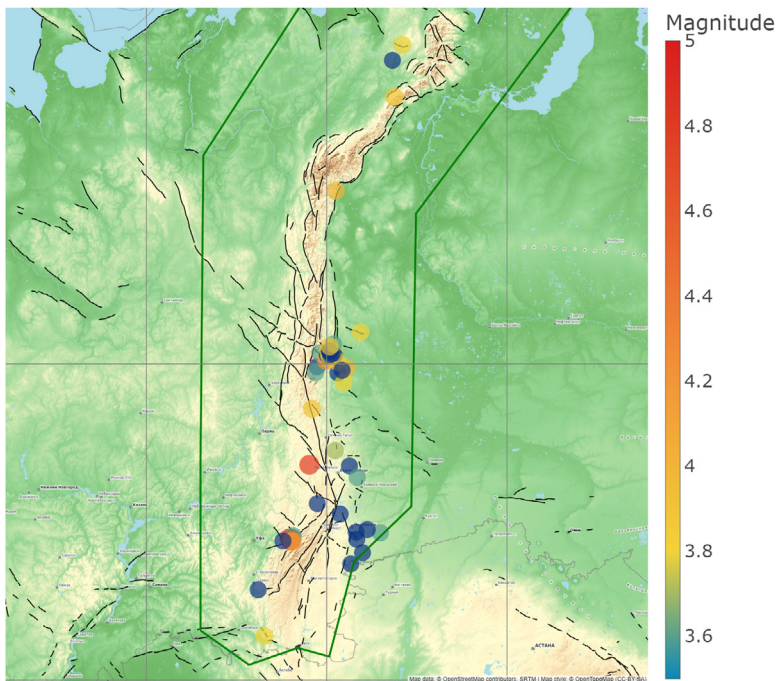
Zone a basse velocità sismiche nel mantello ad una profondità di circa 600 km. L'ipocentro del terremoto di 2023 di M5.1 si trova nell'area di contatto tra regioni del mantello relativamente calde e relativamente fredde.

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

L'oscillazione delle sezioni periferiche del Blocco Siberiano sta innescando un aumento dell'attività sismica nella regione degli Urali. I dati per l'analisi sono stati filtrati per escludere gli eventi sismici associati alle attività minerarie, considerando solo i terremoti con magnitudo di

3.5 e superiori per eliminare gli eventi indotti dall'uomo (Fig. 66, 67). Di conseguenza, l'aumento ondulatorio osservato nella sismicità riflette i processi naturali.

M3.5+ Earthquakes in the Ural



Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> - Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1378-4aaa-9c31-b728c8c7324b

Fig. 66

Mappa degli epicentri di terremoti di M3.5 e superiori registrati nella regione degli Urali dal 1990 al 2022.

M3.5+ Earthquakes in the Ural

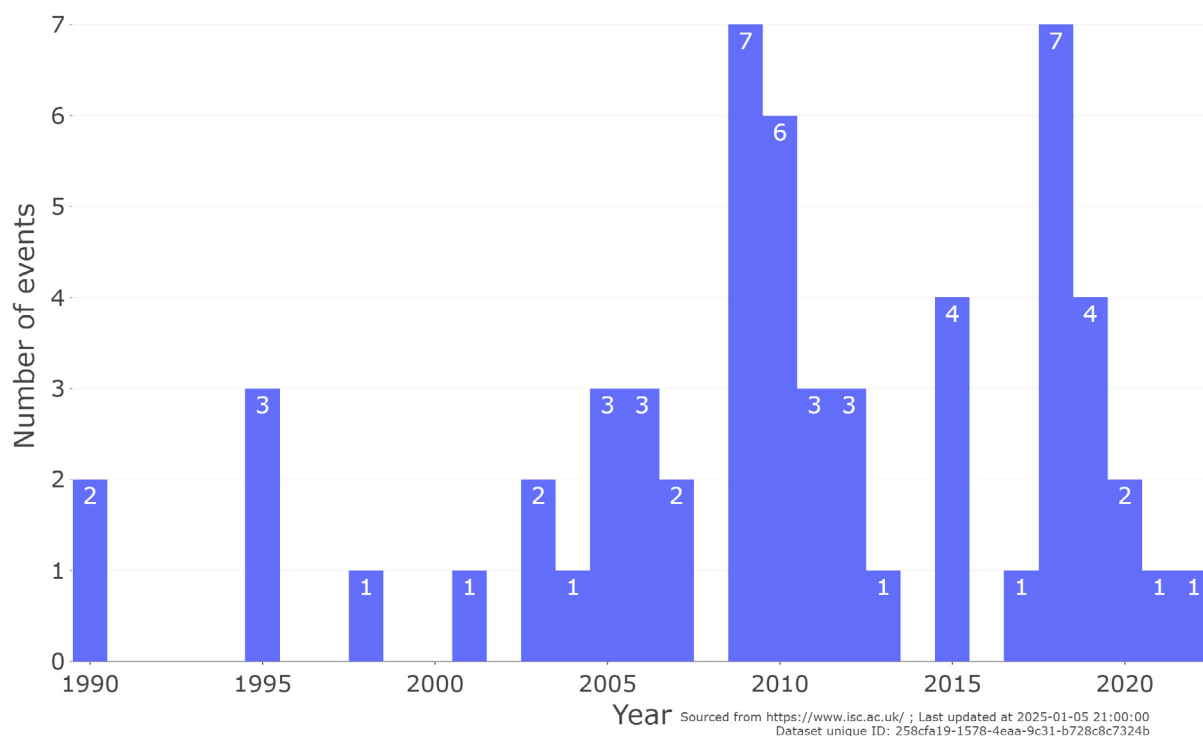


Fig. 67

Numero di terremoti di M3.5 e superiori registrati nella regione degli Urali dal 1990 al 2022.

Inoltre, terremoti con magnitudo compresa tra 4.0 e 5.0 sono apparsi nella regione, che serve come ulteriore prova di un naturale aumento dell'attività sismica (Fig. 68). L'aumento

della sismicità nella regione degli Urali non si verifica costantemente, ma piuttosto a ondate, che è un modello naturale.

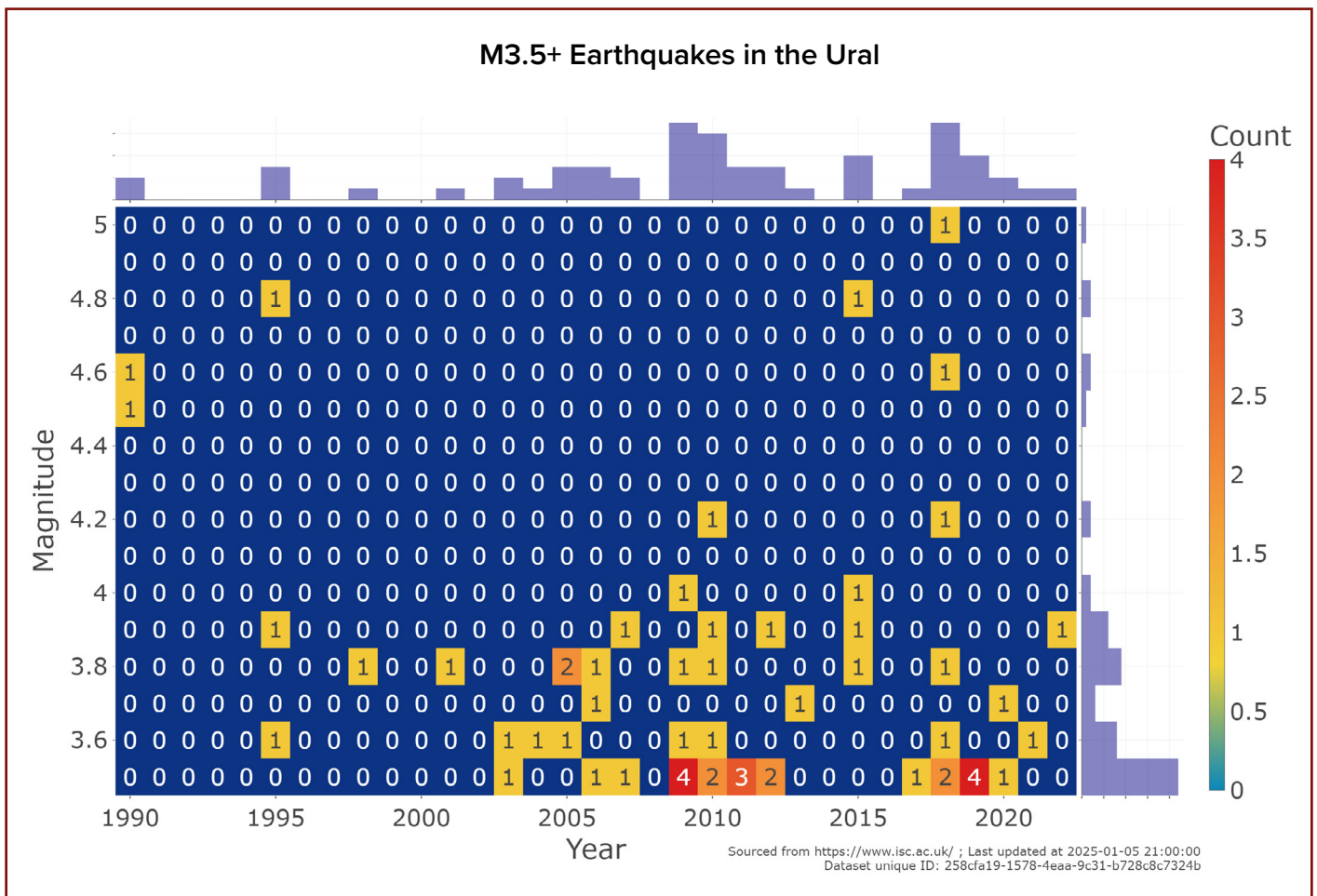


Fig. 68
Distribuzione dei terremoti registrati nella regione degli Urali dal 1990 al 2022 per magnitudo.

Fonte: ISC.

Viene presentato un grafico (Fig. 69) per confrontare i tempi dei picchi di attività sismica in diverse parti dell'area del Pennacchio Siberiano e della sua periferia. Nel 2021, l'attività sismica è aumentata in tutte le regioni esaminate, ad eccezione degli Urali. Osserviamo che l'attività è in aumento in tutte le regioni e, negli ultimi anni, è aumentata in modo ondulatorio, con impennate "pulsanti" che interessano diverse aree. Allo stesso tempo, si osserva un certo modello, simile alla graduale oscillazione della placca da ovest a est e da nord a sud.

Anche l'emergere di incendi boschivi in determinate località dovrebbe essere preso in considerazione. L'aumento dell'area interessata dagli incendi in questa regione indica una maggiore attività del sottosuolo, poiché gli incendi spesso sorgono nelle zone di faglia in cui i gas combustibili fuoriescono. Questi incendi sono difficili da estinguere e si diffondono molto rapidamente su vaste aree. Nella regione degli Urali, c'è stato un forte aumento dell'area degli incendi naturali dal 2020 (Fig. 70). Il grafico si basa sui dati dell'Aerial Forest Protection Service ("Avialesookhrana").

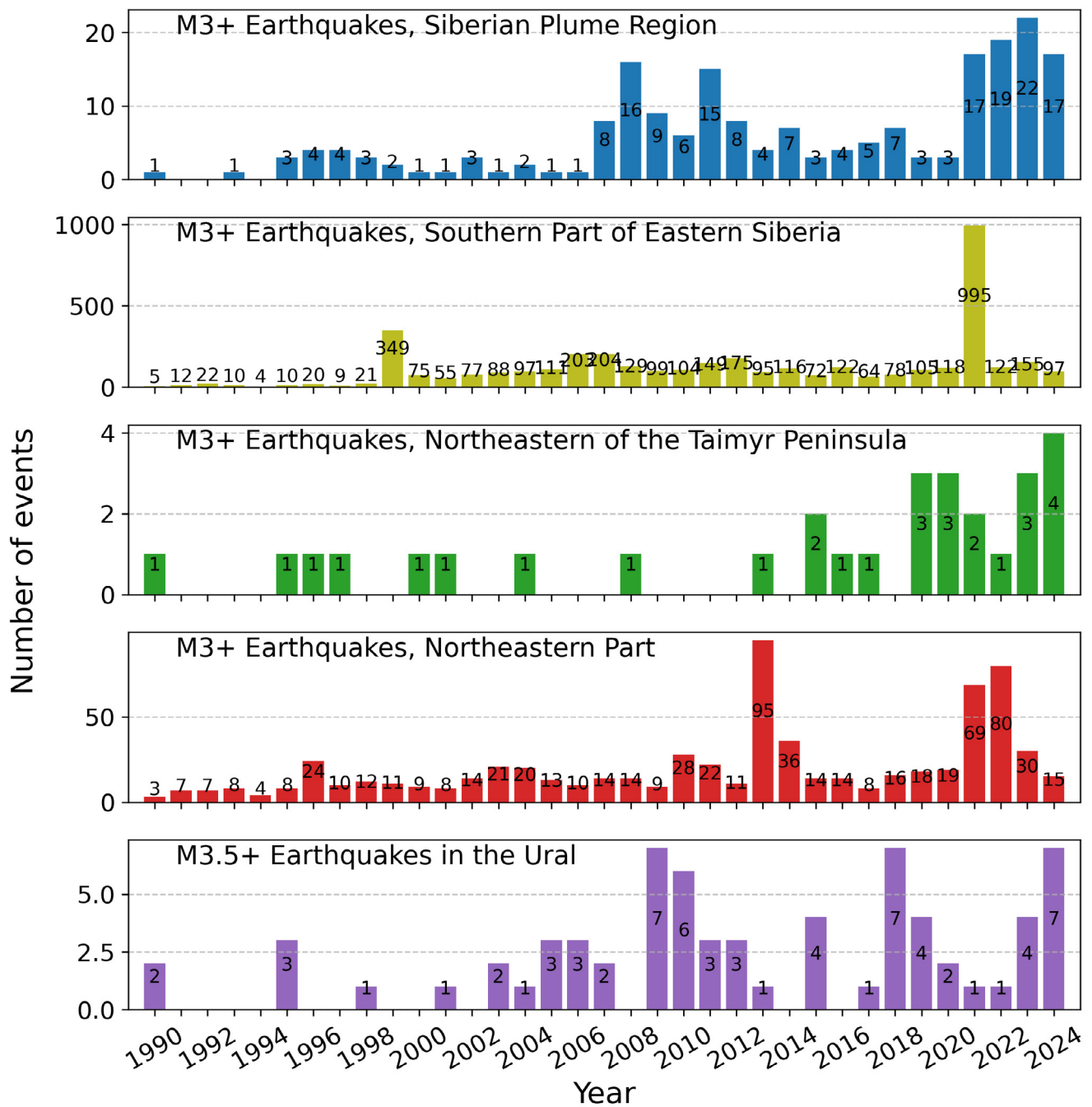


Fig. 69

Distribuzione dei picchi di attività sismica nella regione di Verkhoyansk (a est della Piattaforma Siberiana), nella parte meridionale della Siberia Orientale, nella regione degli Urali (a ovest della Piattaforma Siberiana) e nella Siberia Centrale (compresa la Placca Siberiana Occidentale e la Piattaforma Siberiana Orientale) per anno. Terremoti di M3.0 e superiori.

Fonte: ISC.

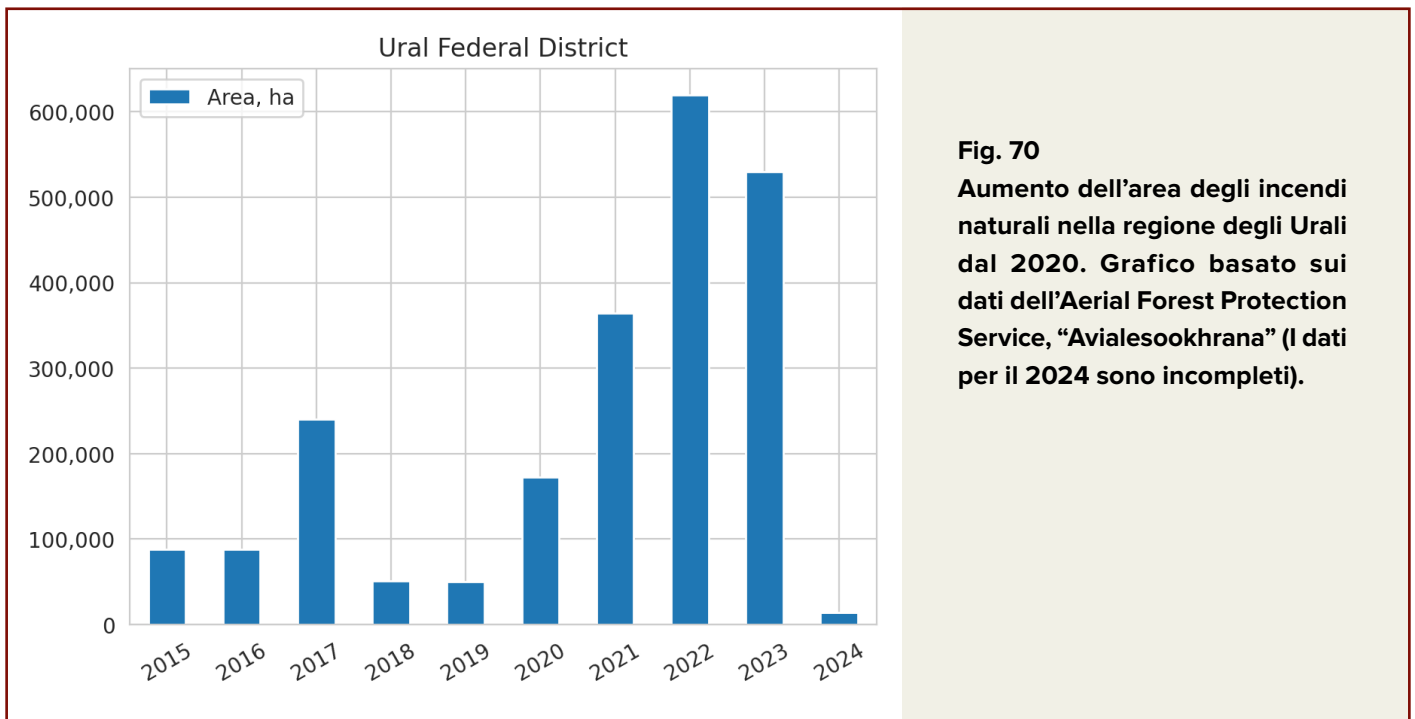


Fig. 70
Aumento dell'area degli incendi naturali nella regione degli Urali dal 2020. Grafico basato sui dati dell'Aerial Forest Protection Service, "Avialesookhrana" (I dati per il 2024 sono incompleti).

Anche l'area interessata dagli incendi nella regione dell'Estremo Oriente è in crescita esponenziale, come chiaramente illustrato nel grafico (Fig. 71).

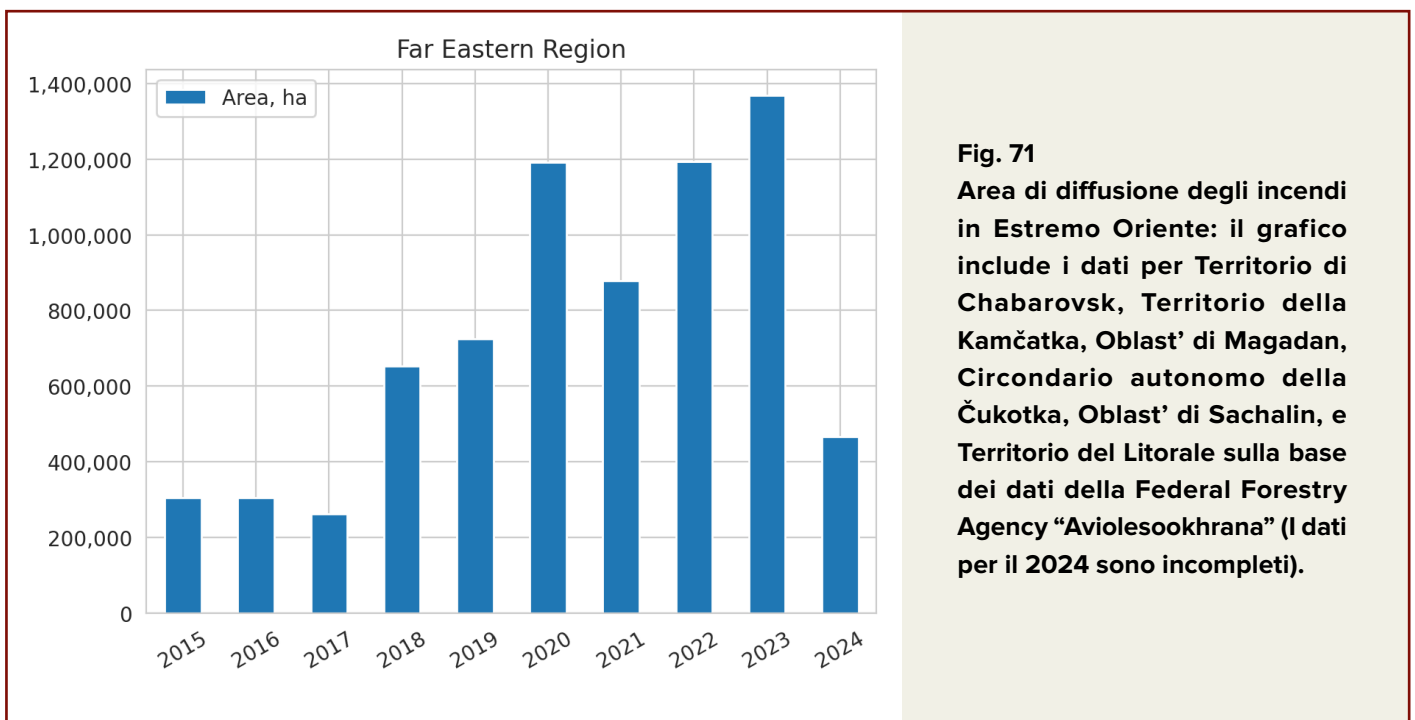
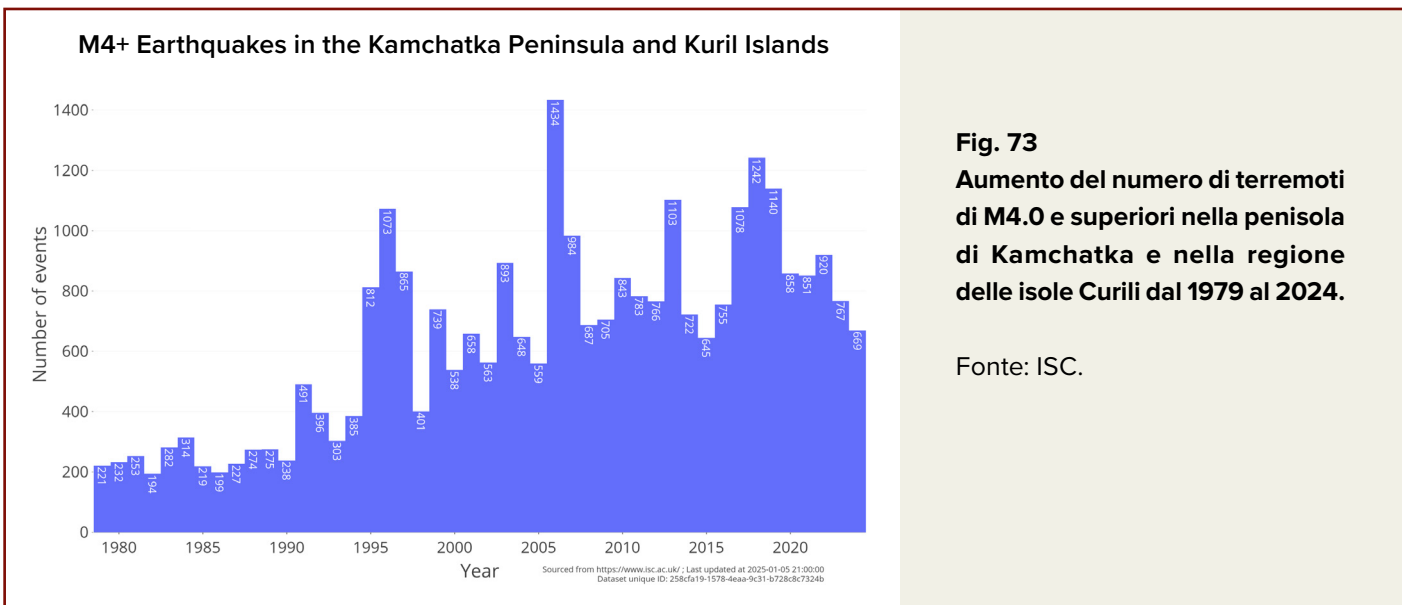
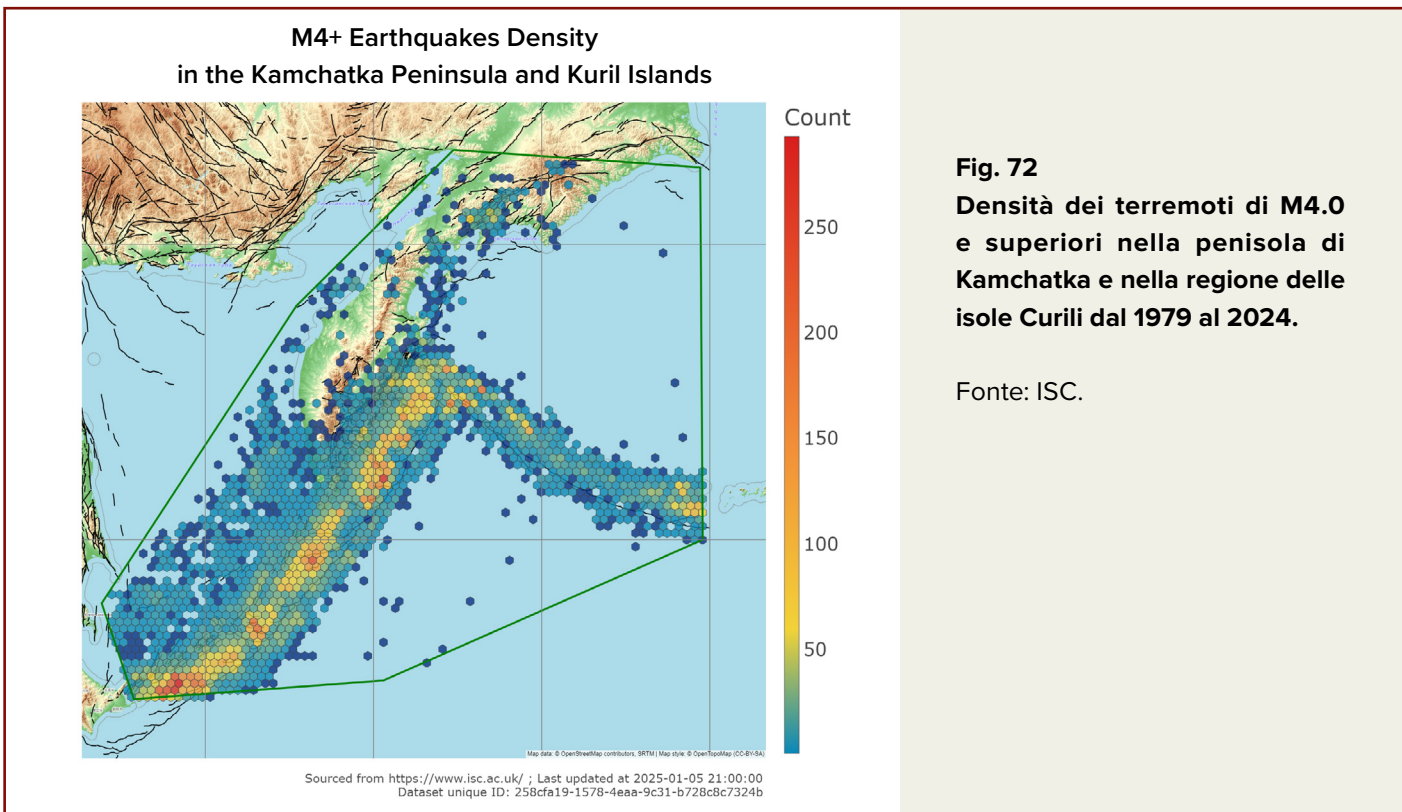


Fig. 71
Area di diffusione degli incendi in Estremo Oriente: il grafico include i dati per Territorio di Chabarovsk, Territorio della Kamčatka, Oblast' di Magadan, Circondario autonomo della Čukotka, Oblast' di Sachalin, e Territorio del Litorale sulla base dei dati della Federal Forestry Agency "Avialesookhrana" (I dati per il 2024 sono incompleti).

Pertanto, processi simili di crescente sismicità e incendi si verificano sul lato opposto dei Blocchi Crostali Siberiano e dell'Estremo Oriente, lungo il confine con la placca del Pacifico.

Si presume che l'intrusione del Pennacchio Siberiano influenzi anche la regione delle Curili-Kamchatka come regione finale del blocco crostale continentale pressato dal pennacchio. Un'analisi dei dati sismici nella regione della Kamchatka e delle Isole Curili

mostra un notevole aumento dei terremoti di M4.0 e superiori (Figg. 72, 73). La regione fa parte della Cintura di Fuoco del Pacifico (Fig. 74) e dimostra una tendenza di crescente sismicità secondo gli schemi di questa struttura tettonica. Tuttavia, la maggior parte dei picchi di sismicità sono indipendenti. Ciò potrebbe indicare che il Pennacchio Siberiano esercita la propria influenza sulla regione della Kamchatka e delle isole Curili.



M4+ Earthquakes in the Ring of Fire 1979-2022

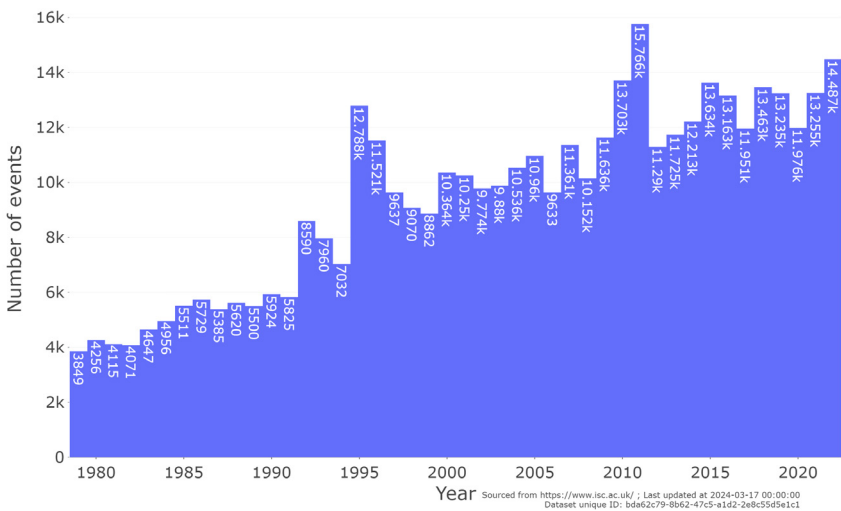


Fig. 74

Aumento del numero di terremoti di M4.0 e superiori nella regione della Cintura di Fuoco dal 1979 al 2022.

Fonte: ISC.

Sorprendentemente, anche la profondità dei terremoti nella regione delle Curili-Kamchatka sta aumentando (Fig. 75). Ciò indica che l'interazione tra le placche litosferiche sta diventando più dinamica a causa dell'influenza del Pennacchio del mantello Siberiano. Si prevede un aumento dell'attività vulcanica nella regione delle Curili-Kamchatka, insieme all'emergere di

anomalie nella rapida ascesa del magma profondo e un rapido spostamento della composizione durante le eruzioni vulcaniche verso magmi più mafici. Un simile spostamento compositivo verso le sorgenti più profonde è stato dimostrato dal vulcano Bezymianny durante la sua eruzione del 2017.⁴⁵

M4+ Earthquakes in the Kamchatka Peninsula and Kuril Islands

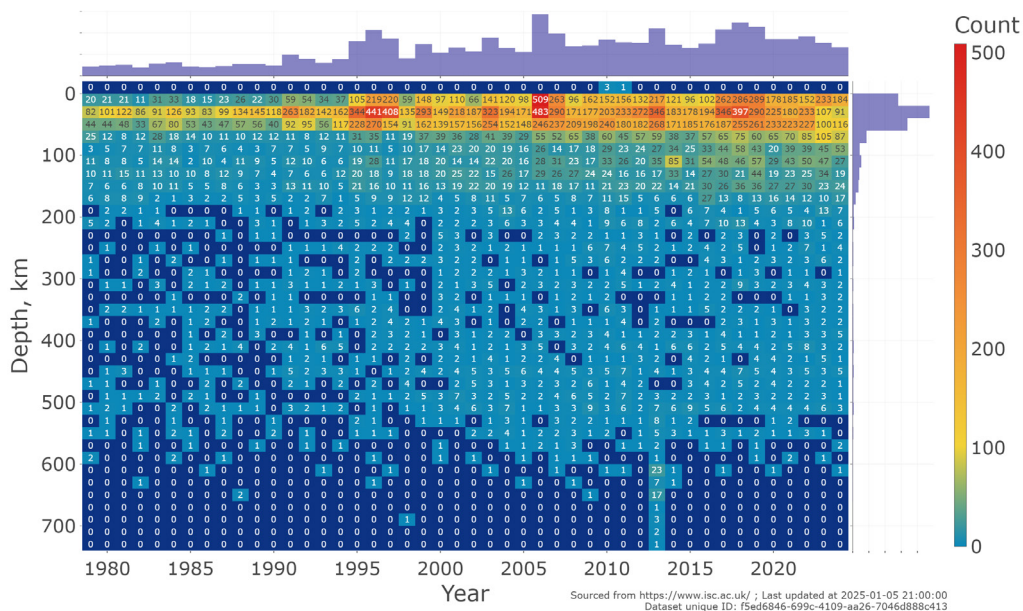


Fig. 75

Distribuzione dei terremoti di M4.0 e superiori registrati nel settore selezionato della penisola di Kamchatka e della regione delle isole Curili dal 1979 al 2024 per profondità. Fonte: ISC.

⁴⁵V.O. Davydova, V.D. Shcherbakov, P.Yu. Plechov, I.Yu. Koulakov, 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, Volume 421, 2022, 107422, ISSN 0377-0273, <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107422>

L'aumento della sismicità, degli incendi e delle anomalie dell'attività vulcanica sono effetti marginali del sollevamento del Blocco Siberiano della crosta terrestre, che sta subendo la pressione dell'intrusione del Pennacchio Siberiano.

L'aumento dell'attività sismica non solo in Siberia, ma soprattutto lungo i bordi della Placca Siberiana Occidentale e del Cratone Siberiano Orientale suggerisce che lo spostamento verso l'alto della placca a causa della pressione dal pennacchio del mantello sottostante è già iniziato. Ciò indica l'impatto significativo e diffuso del pennacchio di magma sulla placca.

I modelli tradizionali presumevano che quando i pennacchi del mantello si alzano e riscaldano la litosfera sovrastante, dovrebbero creare un sostanziale sollevamento della

superficie fino a 2 km di altezza prima che il magma sfondi. Tuttavia, le prove geologiche di tale drammatico sollevamento sono assenti nella regione dei Trappi Siberiani, che si sono formate a seguito di un'intrusione di un pennacchio di magma 250 milioni di anni fa.

Sulla base dello studio delle rocce magmatiche dei Trappi Siberiani, gli scienziati di istituti in Russia, Germania e Francia hanno determinato⁴⁶ che, piuttosto che salire come una bolla, il pennacchio ha gradualmente eroso la litosfera dal basso (Fig. 76).

Quando l'erosione nella zona di contatto tra il materiale fuso del pennacchio e le rocce del mantello superiore ha raggiunto una profondità di 50 km, sono iniziate le fuoriuscite di lava su larga scala e le eruzioni in superficie.

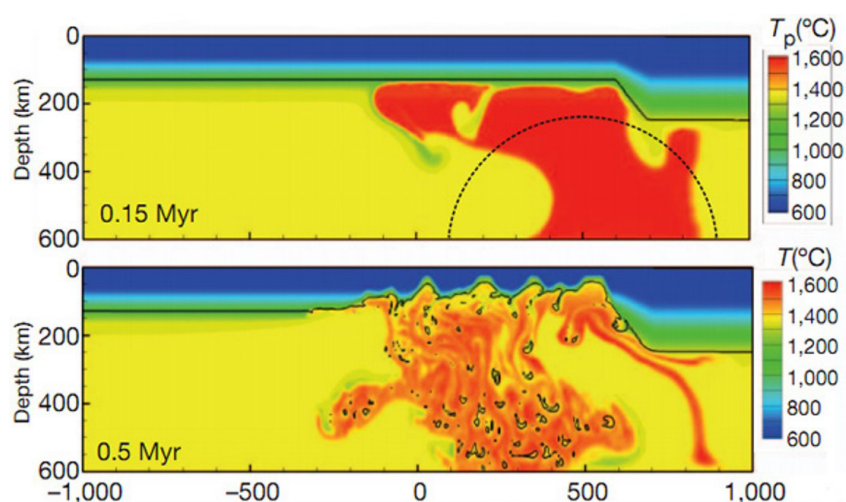


Fig. 76

Una ricostruzione delle fasi iniziali della formazione dei Trappi Siberiani. L'asse verticale mostra la profondità (in km). Diversi colori indicano la temperatura della roccia. La posizione iniziale dell'apice del pennacchio del mantello è mostrata da un semicerchio tratteggiato. Il pennacchio si avvicina al limite inferiore della litosfera – mostrato come una linea nera continua – e “si diffonde” sotto di esso.

In basso: a causa dell'erosione da parte dell'apice del pennacchio – visibili sono frammenti della litosfera che affondano nelle profondità – ha forgiato un percorso attraverso il mantello superiore verso la crosta terrestre. Ciò corrisponde all'inizio della fase principale del legato ai trappi.

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

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

L'attività moderna del pennacchio probabilmente segue lo stesso meccanismo. Pertanto, non è previsto un significativo sollevamento superficiale localizzato in un singolo punto in cui la testa del pennacchio si introduce. Tuttavia, questo meccanismo non esclude un sollevamento regionale diffuso dell'intera piattaforma della Siberia Orientale di una piccola quantità. Secondo la modellazione tettonofisica, anche un sollevamento minore sarebbe sufficiente per innescare eruzioni magmatiche, rilasciando materiale fuso ad alta pressione e causando un evento catastrofico.

Il presunto centro della testa del pennacchio si trova nella regione a nord dell'altopiano di Putorana, a circa 225 km a nord-est di Norilsk. Inoltre, le scoperte interesserebbero l'intera sottile Placca Siberiana Occidentale, dove le vecchie suture – spaccature e faglie profonde nella crosta terrestre – potrebbero riaprirsi.



Prova dell'inevitabilità dell'eruzione del Pennacchio Siberiano

L'elevato rischio di fuoriuscite di magma dal moderno Pennacchio Siberiano nel periodo attuale è dovuto alle seguenti condizioni:

Negli ultimi 30 anni, la Terra ha sperimentato un graduale aumento delle anomalie geofisiche, che sono conseguenze dirette delle forze esterne che intensificano l'energia termica vicino al nucleo del pianeta. Tuttavia, la situazione attuale differisce significativamente dal periodo precedente. **Entro la fine del 2024, il pianeta entrerà in una fase di maggiore influenza energetica sul suo nucleo. I calcoli indicano che entro il 2030 raggiungeremo il picco di questa fase.**

Un fattore critico che aggrava la situazione è l'inquinamento globale degli oceani a causa di influenze antropogeniche, tra cui idrocarburi, microplastiche e nanoplastiche. Questo inquinamento ha alterato significativamente la conduttività termica dell'acqua oceanica, compromettendo la sua capacità di dissipare in modo efficiente il calore dall'interno della Terra. Storicamente, l'oceano ha agito come regolatore termico primario del pianeta, ma ora ha perso una parte sostanziale della sua capacità di conduzione del calore.

Di conseguenza, c'è un accumulo anomalo di energia termica nel mantello, che porta alla sua fusione ad un ritmo senza precedenti nella storia della Terra.

Gli studi geofisici indicano un drammatico aumento del numero di terremoti a focalizzazione profonda, che servono come indicatori diretti dello scioglimento attivo del mantello. Il volume in espansione del magma fuso esercita un'immensa pressione sulla crosta terrestre. Questo processo è analogo a gonfiare un palloncino. Alla fine,

la pressione supererà la forza della crosta, causandone una rottura.

La regione Siberiana è particolarmente vulnerabile a questi processi a causa della sua struttura geologica unica, poiché un potente pennacchio del mantello – un flusso ascendente di materiale fuso del mantello stesso – sta risalendo sotto l'area. Questo pennacchio è stato innescato dallo spostamento del nucleo in questa direzione nel 1997-1998. Le crescenti anomalie di temperatura in Siberia indicano che il volume di magma sotto il Cratone Siberiano continua a crescere esponenzialmente. Sulla base di dati geologici e osservazioni recenti, c'è un alto grado di fiducia che il Pennacchio Siberiano sia entrato in una fase critica di preparazione a un'eruzione.

Ciò che è particolarmente preoccupante è la situazione critica simultanea nella Fossa delle Marianne, il punto più profondo del fondale oceanico, dove la crosta è più sottile e vulnerabile. Questa regione sta anche sperimentando la risalita di magma fuso, accompagnata da un significativo aumento dell'attività sismica. Esiste una reale minaccia di rottura del fondale oceanico in questo punto e uno scenario di distruzione del pianeta.

Si possono verificare due potenziali scenari. Il primo riguarda l'eruzione del Pennacchio Siberiano, che potrebbe verificarsi in qualsiasi momento a causa della crescente pressione del magma. Il secondo riguarda una rottura nella Fossa delle Marianne, che potrebbe precedere la catastrofe siberiana. Il Pennacchio Siberiano non erutterebbe se si verificasse prima la rottura della Fossa delle Marianne.

La storia geologica di Marte fornisce un chiaro esempio delle conseguenze di tale scenario – Valles Marineris serve come testimonianza silenziosa di un disastro simile, dove l'eruzione di un pennacchio sotto un oceano ha portato a risultati catastrofici per l'intero pianeta.

Secondo i calcoli basati sulle attuali tendenze dell'attività geofisica, il punto critico di rottura per la Fossa delle Marianne potrebbe essere raggiunto entro il 2036. Tuttavia, è importante riconoscere che questa linea temporale è condizionale. La crosta terrestre in Siberia potrebbe soccombere all'aumento della pressione molto prima. Data l'attuale traiettoria degli eventi, un'eruzione del Pennacchio Siberiano o della Fossa delle Marianne sembra essere una conseguenza inevitabile dei processi che si verificano in profondità nella Terra. L'unica

incertezza risiede nel momento esatto e nel luogo della catastrofe, non nella certezza del suo approccio.

Consideriamo tre potenziali scenari per lo sviluppo della situazione con il Pennacchio Siberiano.

Il primo scenario è una svolta improvvisa e unica del Pennacchio Siberiano.

Il secondo scenario prevede eruzioni laviche lente e gradualmente in Siberia, simili alla formazione dei Trappi Siberiani.

Il terzo scenario è un degassamento controllato e pianificato. Si verifica se l'umanità prende le misure necessarie per degassare i punti magmatici secondari del Pennacchio Siberiano all'interno della crosta terrestre.

Scenario 1:

Eruzione istantanea del Pennacchio Siberiano

Un'analisi comparativa degli eventi geologici storici può essere utilizzata per stimare il potenziale danno da un'improvvisa eruzione del Pennacchio Siberiano. Tuttavia, è importante considerare che le condizioni attuali sulla Terra – in particolare, la convergenza del ciclo più intenso di 24.000 anni con l'inquinamento antropogenico del sistema di raffreddamento primario del pianeta, gli oceani – sono senza precedenti. Per questo motivo, un'improvvisa eruzione del Pennacchio Siberiano è considerata lo scenario più probabile se non vengono prese misure dall'umanità per mitigarne i rischi.

Per valutare l'entità delle eruzioni vulcaniche, viene utilizzato il volume di materiale espulso. Ad

esempio, durante una delle più potenti eruzioni del supervulcano di Yellowstone 2,1 milioni di anni fa, il volume di magma espulso era di circa 2.500 km³, come determinato dallo studio dei depositi di tufo in Nord America.⁴⁷ Questa eruzione ha spinto cenere e gas ad un'altitudine di 50 km, raggiungendo il limite superiore della stratosfera. Una scala simile è stata osservata nell'eruzione del supervulcano Toba sull'isola di Sumatra, avvenuta circa 72.000-74.000 anni fa ed è stata l'eruzione più potente degli ultimi 25 milioni di anni.

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>

Secondo varie stime, il volume di materiale espulso durante l'eruzione dei Trappi Siberiani circa 250 milioni di anni fa variava da 3 a 4 milioni di km³ di lava e tufi⁴⁸ (Fig. 77). Ciò significa che l'eruzione dei Trappi Siberiani è stata 1.000 volte più grande in termini di materiale espulso rispetto alle più potenti eruzioni conosciute della Caldera di Yellowstone o del supervulcano Toba.

Considerando la natura improvvisa di una potenziale eruzione del Pennacchio Siberiano, la sua attivazione potrebbe provocare un evento con una magnitudo 1.000 volte maggiore di queste eruzioni storiche, come quelle della Caldera di Yellowstone o del supervulcano Toba.

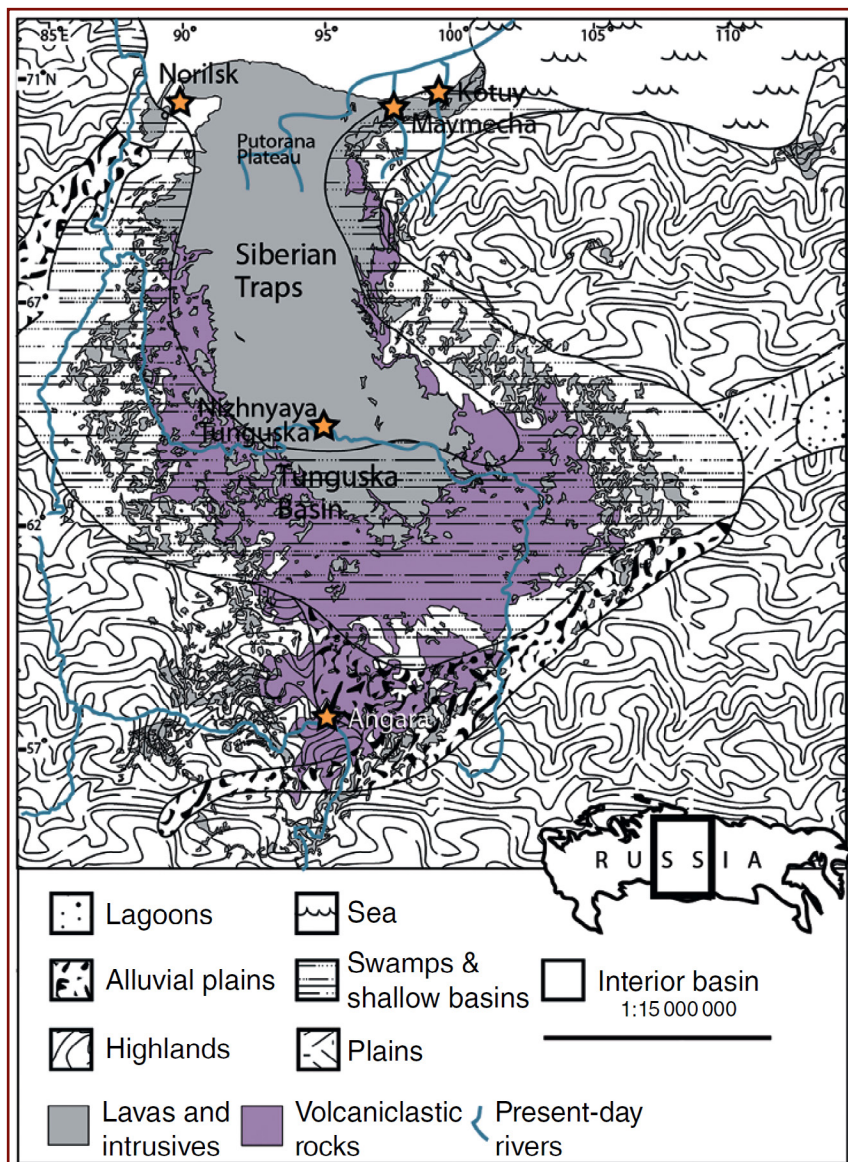


Fig. 77
Mappa paleogeografica dei Trappi Siberiani che illustra la scala dei principali deflussi vulcanoclastici e delle regioni associate ai Trappi Siberiani. Si basa su dati di Malich et al. (1974), Polozov et al. (2010), e Black et al. (2015), con paleogeografia semplificata del tardo Permiano adattata da Czamanske et al. (1998).

Fonte: 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>

⁴⁸Black, B., Mittal, T., Lingo, F., Walowski, K., & Hernandez, A. (2021). Assessing the Environmental Consequences of the Generation and Alteration of Mafic Volcaniclastic Deposits During Large Igneous Province Emplacement. In R. E. Ernst, A. J. Dickson, & A. Bekker (Eds.), Geophysical Monograph Series (pp. 117-131). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch5>

Si ipotizza che un improvviso sfondamento del Pennacchio Siberiano si tradurrebbe in un'eruzione esplosiva, formando una singola caldera. Secondo questa ipotesi, la caldera creata dall'esplosione del Pennacchio Siberiano coprirebbe un'area di circa 75.000 km², con un raggio di circa 150 km o dimensioni di 380 km per 250 km. Durante l'eruzione dei Trappi Siberiani 250 milioni di anni fa, l'area inondata dalla lava, come documentato in letteratura⁴⁹, variava da 4 a 7 milioni di km²⁵⁰. Un evento del genere potrebbe avere ripercussioni su una simile scala di copertura territoriale.

L'idea che i flussi di lava siano i fenomeni vulcanici più pericolosi è un equivoco. In realtà, la cenere diventa spesso la causa principale delle conseguenze fatali. Per i supervulcani caratterizzati da elevata esplosività, una porzione significativa di magma non si trasforma in lava. Invece, si frammenta durante l'esplosione, producendo enormi quantità di cenere vulcanica fine – frammenti scottanti di particelle di roccia taglienti e frastagliate che si disperdono nell'atmosfera. L'inalazione di questa cenere forma una miscela simile al cemento nei polmoni umani, portando inevitabilmente alla morte.

Si stima che durante un'eruzione del Pennacchio Siberiano, il raggio di dispersione di cenere rovente raggiungerebbe circa 9.000 km, coprendo un'area di circa 255 milioni di km². Dato che la superficie totale della Terra è poco più di 510 milioni di km², la zona colpita dalla cenere, dove la respirazione diventerebbe impossibile, comprenderebbe circa la metà del pianeta, circa il 50% della superficie terrestre.

Pertanto, un'improvvisa eruzione del Pennacchio Siberiano dovrebbe produrre tre

zone d'impatto potenzialmente letali.

La prima zona d'impatto (centrale) è una regione con un raggio di 150 km, centrata nella parte nord-occidentale dell'altopiano di Putorana, dove si prevede la formazione della caldera (Fig. 78). Questa zona comprende le città di Noril'sk, Dudinka e Talnakh nel territorio di Krasnojarsk. All'interno di questa zona, l'attivazione del pennacchio comporterà la distruzione istantanea di tutte le strutture a causa dell'onda d'urto e dei flussi piroclastici roventi durante la fase iniziale dell'eruzione.

La seconda zona d'impatto, che si estende per un raggio di 1.500 km dal centro, è l'area interessata da colate laviche e materiali vulcanici pesanti (Fig. 79). Questa zona coprirà vaste aree della Siberia Settentrionale, tra cui il Circondario autonomo Jamalo-Nenec, la penisola di Taimyr, parti del circondario autonomo degli Chanty-Mansi-Jugra, la parte settentrionale di Territorio di Krasnojarsk, la Jacuzia occidentale e la parte nord-orientale europea della Russia. Le principali città all'interno di questo raggio includono Igarka, Novyj Urengoj, Nadym, Salechard, Vorkuta, Nar'jan-Mar, Mirnyj, Kogalym, Lesosibirsk, Surgut, Krasnojarsk, Chanty-Mansijsk, Tomsk e Nižnevartovsk.

Nelle prime ore dell'eruzione, questo territorio sarà sottoposto a flussi in rapido movimento di gas rovente, cenere e lava che viaggiano a velocità fino a 700 km/h. Questi flussi cancelleranno tutta la vita e le infrastrutture, seppellendo la regione sotto uno spesso strato di materiali vulcanici e consumando le risorse naturali.

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

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

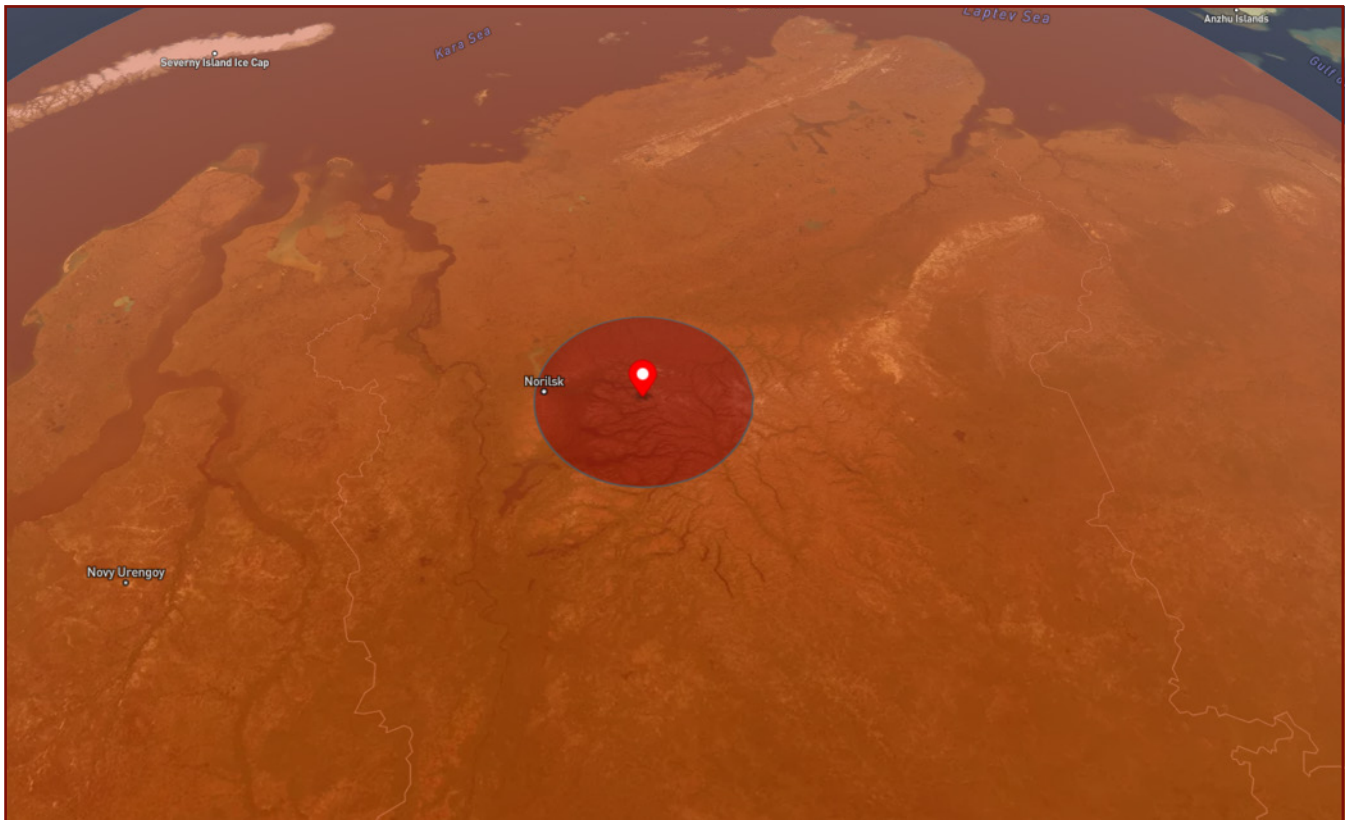


Fig. 78

La zona di formazione della caldera è mostrata in rosso, con un raggio approssimativo di 150 km.

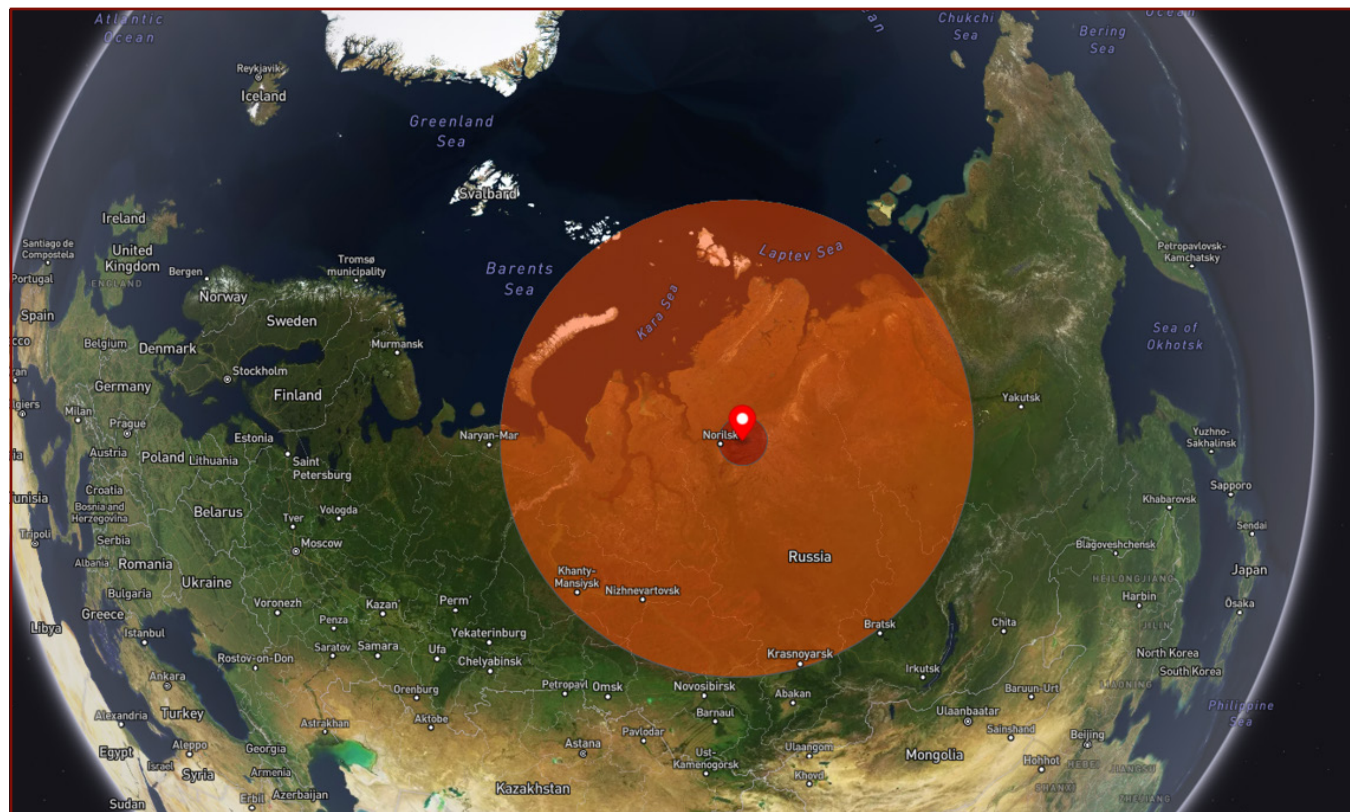


Fig. 79

Il flusso di lava e la zona di intensa ricaduta piroclastica sono indicate in arancione, con un raggio approssimativo di 1.500 km

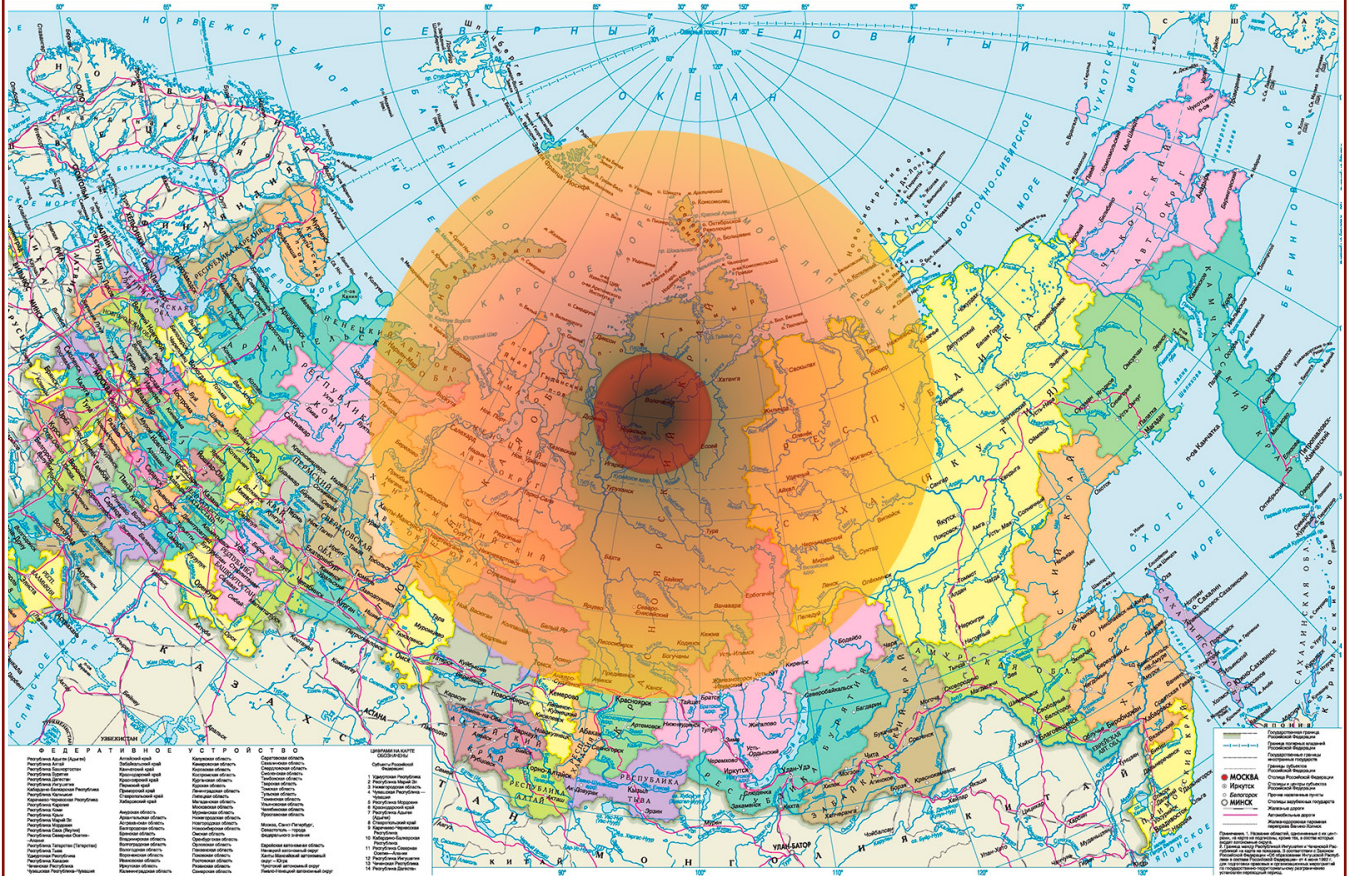
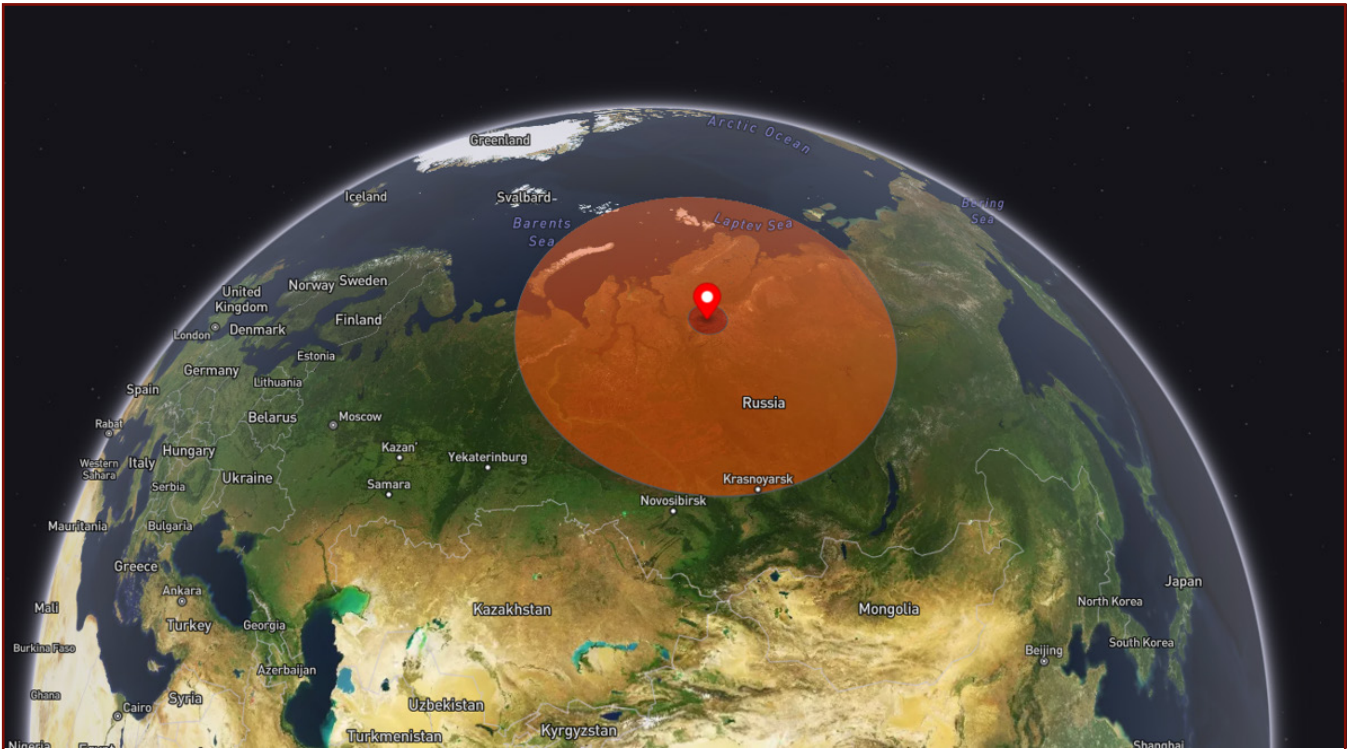


Fig. 79
 Il flusso di lava e la zona di intensa ricaduta piroclastica sono indicate in arancione, con un raggio approssimativo di 1.500 km

La terza zona d'impatto, con un raggio di circa 9.000 km, comprende l'area di dispersione di materiali piroclastici sottili e cenere vulcanica, che copre circa il 50% della superficie terrestre (Fig. 80).

Durante la fase iniziale (le prime 24 ore dopo l'eruzione), la caduta di cenere interesserà

principalmente i territori della Federazione Russa, dell'Asia Continentale, dell'Europa, della Penisola Arabica, della parte settentrionale del continente Africano e del Nord America. Nei successivi 7-10 giorni, si prevede che le masse di cenere si diffonderanno nel continente Australiano, in Sud America e in Antartide.





Fig. 80

L'area di dispersione delle ceneri vulcaniche sottili è mostrata in giallo, con un raggio approssimativo di 9.000 km

La ricerca sui processi geologici indica che l'attivazione del Pennacchio Siberiano innescherà una serie di ulteriori fenomeni catastrofici. Questi includono la generazione di una potente onda d'urto, il verificarsi di potenti terremoti (con magnitudo intorno a 10), la formazione di tsunami distruttivi e il potenziale risveglio di altri importanti sistemi vulcanici sulla Terra. L'energia rilasciata durante l'eruzione potrebbe avviare una reazione a catena, attivando supervulcani e grandi regioni

vulcaniche in tutto il pianeta. Queste conclusioni si basano su calcoli matematici dei processi energetici e del loro impatto sulla crosta terrestre.

Successivamente esamineremo ulteriori fattori di rischio che minacciano l'umanità a seguito dell'improvvisa eruzione del Pennacchio Siberiano.

Onda d'urto

Secondo i dati pubblicamente disponibili, un'eruzione del supervulcano di Yellowstone potrebbe rilasciare energia equivalente a circa 900.000 megatoni e innescare un terremoto di magnitudo 11.2. Poiché la scala di magnitudo è logaritmica (ogni aumento di numero intero rappresenta un aumento di energia di 32 volte), un'eruzione del Pennacchio Siberiano, stimata 1.000 volte più potente di Yellowstone, potrebbe provocare un terremoto di magnitudo 13,2. Questo sarebbe 350.000 volte più potente del più forte terremoto mai registrato – il Grande Terremoto del Cile (magnitudo 9,5, 1960) – e sarebbe paragonabile all'impatto di un grande asteroide.

L'energia rilasciata, dell'ordine di 10^{24} joule, genererà un'onda d'urto immensamente potente su scala globale. Al centro dell'eruzione, la pressione raggiunge livelli così estremi che le rocce saranno immediatamente vaporizzate ed espulse nell'atmosfera superiore. Un'onda d'urto supersonica devasterà aree a migliaia

di chilometri di distanza in pochi minuti, simile all'impatto del meteorite Tunguska, ma molto più potente.

Enormi incendi scoppieranno nella taiga siberiana, seppellendo vaste regioni sotto uno spesso strato di cenere vulcanica. Il permafrost si scioglierà rapidamente per migliaia di chilometri, rilasciando quantità significative di gas serra. Il paesaggio subirà una vasta distruzione con l'attivazione di linee di faglia cristalline. Le onde sismiche si propagheranno in tutto il pianeta, innescando ulteriori terremoti con magnitudo superiori a 10.

Nell'Oceano Artico si formeranno enormi tsunami alti centinaia di metri, minacciando le coste di Russia, Canada, Groenlandia e Scandinavia. Tsunami secondari colpiranno le coste dell'Indonesia, del Giappone, dell'Australia e del Nord e Sud America. Le perturbazioni atmosferiche globali porteranno alla formazione di potenti uragani e tempeste.

Attivazione di supervulcani e sistemi vulcanici

Le onde sismiche dell'eruzione del Pennacchio Siberiano si propagheranno non solo attraverso l'atmosfera e la superficie terrestre, ma anche in profondità nel mantello. Poiché tutti i supervulcani sono interconnessi attraverso gli strati fusi del mantello, si prevede che le onde sismiche di questa magnitudo innescheranno una reazione a catena di eruzioni entro le prime

24 ore (Fig. 81). I più grandi sistemi vulcanici che potrebbero diventare attivi includono le caldere di Yellowstone e Long Valley (Nord America), i Campi Flegrei (penisola Appenninica), Toba (Arcipelago della Sonda), la Caldera di Aira (isole Giapponesi) e il complesso vulcanico di Taupo (Nuova Zelanda).

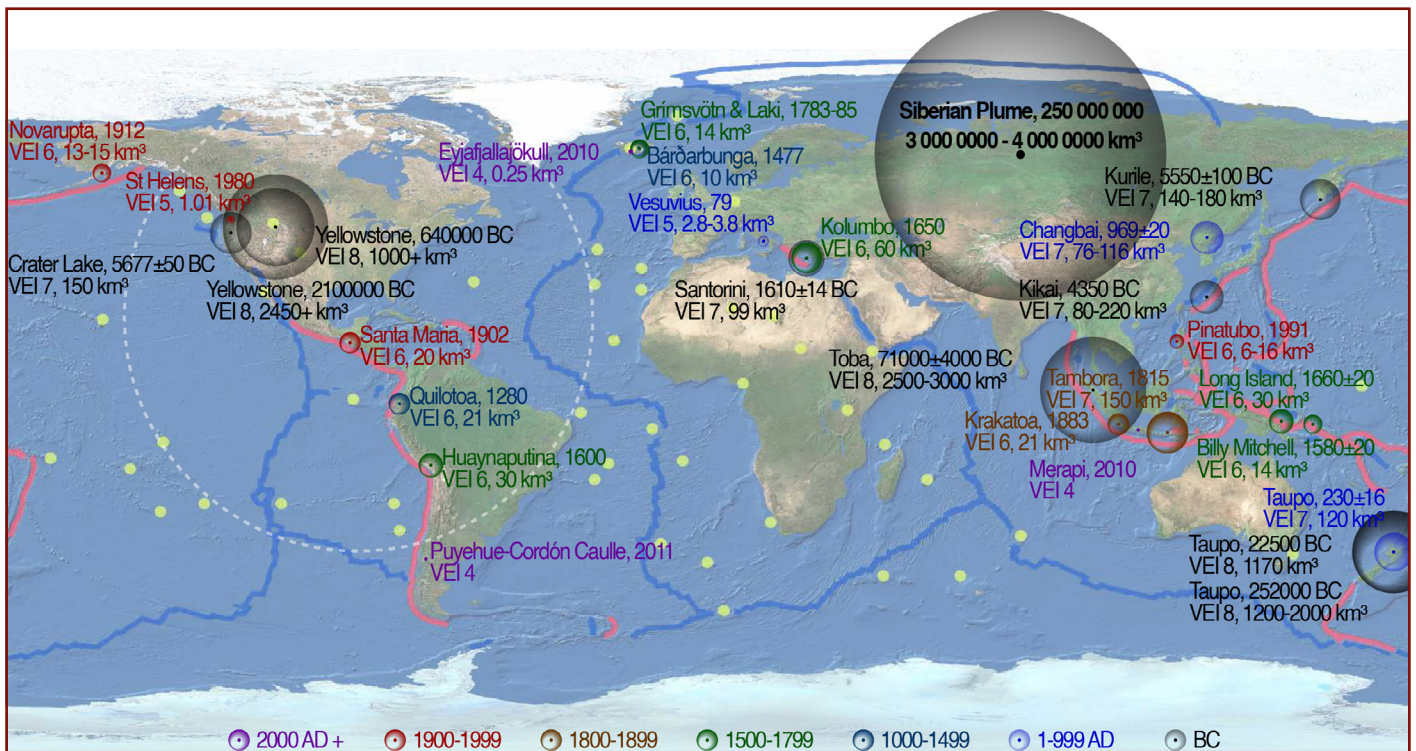


Fig. 81

La mappa mostra una distribuzione globale delle principali eruzioni vulcaniche, classificate per periodi geologici dal Precambriano ai giorni nostri.

La dimensione dei simboli è proporzionale al volume di materiale espulso (in km³). La mappa evidenzia la sequenza cronologica delle eruzioni con un indice di esplosività vulcanica (VEI) ≥4, sottolineando eventi come Toba (71.000 ± 4.000 a.C., 2.500–3.000 km³), Yellowstone (640.000 a. C., >1.000 km³) e Tambora (1815 d.C., 150 km³). Eruzioni comparabili sono previste se il Pennacchio Siberiano erutta, con una produzione di materiale stimata di 3-4 milioni di km³. Le linee rosse indicano i confini delle placche tettoniche, illustrando la correlazione spaziale con le posizioni delle principali eruzioni.

Oltre ai supervulcani, è probabile che le eruzioni inizino in molti vulcani lungo la Cintura di Fuoco del Pacifico e in altre zone sismicamente attive. C'è un'alta probabilità di rinnovata attività in vulcani come il Monte Fuji (Giappone), Krakatoa e Merapi (Indonesia), Vesuvio ed Etna (Italia), Popocatépetl (Messico), gruppi vulcanici in Kamchatka, le Ande e le cinture vulcaniche dell'Alaska, così come i sistemi vulcanici subglaciali nell'Antartide Occidentale.

Anche strutture vulcaniche dormienti potrebbero riattivarsi, tra cui i stratovulcani Ararat (Altopiano Anatolico), Kilimanjaro e Nyiragongo (Sistema di Rift dell'Africa Orientale); il massiccio vulcanico Elbrus (regione del Caucaso), il vulcano Laacher See (Europa Centrale) e i centri vulcanici della Penisola Arabica.

Piogge acide

Il rilascio catastrofico di cenere vulcanica e anidride solforosa durante l'eruzione causerà precipitazioni in tutto il mondo sotto forma di piogge acide. Per illustrare la scala delle emissioni, possiamo fare riferimento all'eruzione del supervulcano di Yellowstone 630.000 anni fa, che ha rilasciato circa 500 megatoni di anidride solforosa nell'atmosfera. Estrapolando questo per l'ipotetica eruzione del Pennacchio Siberiano, le emissioni potrebbero raggiungere una stima di 1.500.000 megatoni ($1,5 \times 10^{12}$ tonnellate) di anidride solforosa – circa un milione di volte le emissioni di Tambora nel 1815, che ha causato l'“Anno senza estate”. È importante notare che questa stima non tiene conto delle emissioni di altri vulcani che potrebbero essere innescate in una reazione a catena.

Una tale concentrazione di anidride solforosa porterà alla formazione di particelle di aerosol nella stratosfera, che verranno gradualmente spazzate via nel corso di decenni sotto forma di piogge acide. Si prevede che il periodo primario di precipitazione acida duri da 3 a 10 anni, a seconda dei processi climatici e della circolazione atmosferica. Le regioni più vicine all'epicentro, come la Siberia contemporanea, sperimenteranno precipitazioni con un pH inferiore a 1,5, paragonabile all'acido solforico diluito.

Gli effetti includeranno la distruzione della vegetazione, come radici, foglie e rami, e la lisciviazione di minerali dal suolo, rendendolo inadatto a sostenere la vita. Anche gli ecosistemi acquatici subiranno una grave acidificazione, trasformando i corpi idrici in laghi acidi tossici con livelli di pH di 2-3. Queste condizioni saranno fatali per la maggior parte delle forme di vita.

Inoltre, l'infiltrazione acida nei sistemi di approvvigionamento idrico renderanno l'acqua potabile inutilizzabile senza sistemi di filtrazione avanzati. Le infrastrutture realizzate in cemento, marmo e metalli dovranno affrontare una corrosione accelerata da composti di solfato.

Mentre l'intensità di picco delle piogge acide si verificherà nei primi mesi dopo l'eruzione, le precipitazioni si localizzeranno gradualmente in regioni specifiche. Con l'arrivo dell'inverno vulcanico, gran parte delle precipitazioni si trasformerà in neve, riducendo il carico acido immediato sugli ecosistemi. Tuttavia, a questo punto, la distruzione globale della flora e della fauna causata dalle piogge acide sarà già irreversibile.

Il danno agli ecosistemi avrà effetti profondi sui processi naturali e umani molto prima che inizi il raffreddamento globale.

Inverno vulcanico

L'impatto cumulativo dell'eruzione del Pennacchio Siberiano, amplificato dall'attivazione simultanea di numerosi vulcani, si tradurrà in una catastrofica alterazione del clima globale e delle condizioni ecologiche. Massicce emissioni di cenere vulcanica, gas (in particolare anidride solforosa, SO₂) e aerosol nell'atmosfera formeranno una barriera impenetrabile alla radiazione solare per decenni.

L'alta concentrazione di aerosol di solfato nella stratosfera rifletterà una porzione significativa della radiazione solare, interrompendo il bilancio energetico del pianeta. Ciò porterà a una drastica riduzione del calore che raggiunge la superficie terrestre, con conseguente raffreddamento climatico estremo — uno stato che potrebbe essere definito un "inverno ipervulcanico". In tali condizioni, la Terra assomiglierà a una "palla di ghiaccio", con zone abitabili limitate a piccole regioni principalmente vicine all'equatore.

Le proiezioni dei potenziali impatti si basano su dati storici di eruzioni significative. Ad esempio, durante la massima eruzione di Yellowstone 2,1 milioni di anni fa, le temperature globali sono diminuite in media di 3-5°C. Per l'eruzione del Pennacchio Siberiano, la cui magnitudo supera di gran lunga quell'evento, si stima che la temperatura media della Terra scenderà di circa 24-31°C.

Nelle regioni polari, le riduzioni di temperatura dovrebbero raggiungere i 28-36°C o più, con conseguente congelamento completo dei corpi idrici critici, incluso il Nord Atlantico e parti significative dell'Oceano Pacifico.

Le temperature alle medie latitudini diminuiranno di 24-31°C, sradicando tutta la vegetazione e innescando l'estinzione di massa degli organismi.

Gli ecosistemi oceanici subiranno una distruzione catastrofica. Il congelamento inizierà in superficie e lungo le aree costiere, portando all'estinzione del biota marino su scala globale. Nelle regioni equatoriali, si prevede che le temperature scendano di 20-27°C, rendendo anche le zone tropicali troppo fredde per sostenere la vita.

Praticamente tutte le superfici terrestri diventeranno sterili a causa del freddo globale, dell'oscurità e della cessazione della fotosintesi. Le catene alimentari collasseranno, causando il crollo dell'agricoltura e l'estinzione di massa di flora, fauna e una parte significativa dell'umanità. Solo ecosistemi microbici isolati adattati a condizioni estreme rimarranno vitali.

Gli aerosol di solfato che persistono nella stratosfera continueranno a bloccare la luce solare per decenni. Tuttavia, le conseguenze di un inverno ipervulcanico si faranno sentire molto più a lungo. Anche dopo che le ceneri e gli aerosol si sono depositati, dati gli oceani ghiacciati, l'espansione glaciale e le trasformazioni radicali nella biosfera, la Terra richiederà centinaia o addirittura migliaia di anni per ripristinare il suo clima naturale e l'equilibrio ecologico.

Conclusioni sullo scenario 1.

Eruzione improvvisa del Pennacchio Siberiano

Un'improvvisa eruzione del Pennacchio Siberiano costituirà un evento geologico e climatico catastrofico, innescando cambiamenti globali nell'atmosfera, nell'idrosfera e nella biosfera. Una massiccia esplosione sull'altopiano di Putorana immediatamente annienta tutto in un raggio di 150 km, formando una caldera gigante. Flussi piroclastici e lava si estenderanno su un raggio di 1.500 km, trasformando la Siberia in una terra desolata e bruciata. Metà della superficie terrestre si ricopre di cenere.

Un terremoto di magnitudo fino a 13,2 causato dall'esplosione del pennacchio genererà onde sismiche distruttive che si diffonderanno in tutto il pianeta, attivando linee di faglia, terremoti secondari e mega-tsunami alti centinaia di metri, inondando le zone costiere dei continenti.

Il rilascio di 1,5 milioni di megatoni di anidride solforosa (SO_2) provocherà piogge acide con un pH inferiore a 1,5, distruggendo terreni, vegetazione e ecosistemi acquatici. I corpi idrici diventeranno inabitabili e la terra perderà rapidamente la sua fertilità. Il collasso della fotosintesi e delle catene alimentari porterà

all'estinzione di massa della flora, della fauna e della civiltà umana.

La massiccia attivazione di supervulcani, tra cui Yellowstone, Campi Flegrei e Toba, aggraveranno i cambiamenti climatici globali aumentando le emissioni di cenere vulcanica, anidride solforosa (SO_2) e aerosol. Il loro accumulo nella stratosfera bloccherà la luce solare, causando un raffreddamento planetario ("inverno ipervulcanico") e cali di temperatura di decine di gradi. Nelle regioni polari, le temperature si precipiteranno di oltre 28-36°C; nelle zone temperate, di 24-31°C; e nei tropici, di 20-27°C. Ciò si tradurrà in oceani ghiacciati, circolazione oceanica interrotta, collasso degli ecosistemi e formazione di enormi ghiacciai sulla terra.

Gli effetti di un "inverno ipervulcanico" renderà la Terra praticamente inabitabile, con condizioni naturali che richiedono da migliaia a milioni di anni per il recupero. Un tale evento segnerà la più grande estinzione nella storia geologica del pianeta.

Scenario 2:

Gradual Eruption of the Siberian Plume

Il secondo scenario prevede una serie graduale di eruzioni e flussi di lava attraverso fratture e zone indebolite nella crosta terrestre piuttosto che un singolo evento esplosivo. Questo processo è paragonabile alla formazione dei Trappi Siberiani nella stessa regione alla fine del periodo Permiano 250 milioni di anni fa.

La formazione delle province dei Trappi Siberiani ha segnato la più grande manifestazione del vulcanismo terrestre. Durante questo periodo, la Terra ha vissuto la più grande catastrofe

ambientale della sua storia – l'estinzione di massa del Permiano-Triassico, in cui sono scomparse fino al 90% delle specie marine e il 70% delle specie terrestri (Fig. 82, 83).

Le prove geologiche⁵¹ indicano che le eruzioni siberiane potrebbero essere state insolitamente esplosive (Campbell et al. 1992), con depositi piroclastici che raggiungono spessori fino a 800 metri (Khain, 1985). La natura altamente esplosiva delle eruzioni espulse rocce sedimentarie da profondità fino a 10km.



Fig. 82
Rappresentazione artistica di eruzioni in Siberia durante l'evento di estinzione del Permiano-Triassico.

Illustrazione: Image by Tigran Nshanyan

Fig. 83
Rappresentazione artistica di lystrosaurus, sopravvissuti all'estinzione di massa, che dominano un paesaggio desolato, illustrando i cambiamenti dell'ecosistema dopo la crisi Permiano-Triassica.

Illustrazione: Julio Lacerda



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

L'attività vulcanica nella regione si è verificata in più fasi, alterando drasticamente il paesaggio geologico. Inizialmente, il magma si introduceva negli strati sedimentari, formando vari corpi intrusivi, come i sill. Successivamente, lo stile dell'eruzione passò a quello esplosivo, con conseguente rilascio di enormi quantità di materiale piroclastico e formazione di spessi depositi vulcanici. Il culmine di questo processo fu l'eruzione di colossali volumi di lava basaltica, misurati in centinaia di migliaia di chilometri cubi. Il volume totale di rocce vulcaniche, comprese intrusioni, depositi piroclastici e flussi di lava, è stimato in circa 3 milioni di chilometri cubi. È importante notare che questa cifra riflette solo le rocce che sono sopravvissute fino ai giorni nostri, e si può affermare con sicurezza che la scala iniziale delle eruzioni era molto maggiore, ma da allora è stata erosa.

La formazione dei Trappi Siberiani ha portato a emissioni colossali di anidride carbonica (CO₂), zolfo (SO₂), cloro (HCl) e altri composti volatili. Questi gas hanno intensificato significativamente l'effetto serra, causando un rapido riscaldamento a seguito di un inverno vulcanico. Le concentrazioni di CO₂ nell'atmosfera hanno raggiunto 8.000 ppm, che è 20 volte superiore ai livelli attuali. Di conseguenza, la temperatura dei mari tropicali è aumentata da 22-25°C a 30°C e gli oceani hanno iniziato ad acidificarsi, uccidendo organismi con scheletri di carbonato.

L'emissione totale di zolfo ammontava fino a 7800 gigatonnellate, cloro fino a 8700 gigatonnellate e fluoro fino a 13.600 gigatonnellate⁵².

Le ceneri vulcaniche e gli aerosol hanno bloccato la luce solare, interrotto la fotosintesi e causato la deforestazione di massa e il collasso delle catene alimentari, esacerbando l'estinzione di specie vegetali e animali.

La crisi ecologica di quell'epoca sottolinea la potenziale portata delle conseguenze anche con una graduale eruzione del Pennacchio Siberiano.

La ricerca indica che il periodo di eruzioni 250 milioni di anni fa è stato caratterizzato dall'ascesa di un pennacchio di mantello – un massiccio flusso di magma che ascende dalle profondità della Terra sotto l'attuale altopiano di Putorana. Una ripetizione di questo scenario oggi comporterà la formazione di vasti altipiani di lava, tra le più grandi formazioni geologiche del pianeta, cancellando quasi tutta la vita entro migliaia di chilometri, comprendendo la Siberia e le regioni limitrofe. La documentazione geologica rivela che tali catastrofi, contrassegnate dall'effusione di enormi campi di basalto⁵³, si sono verificate ripetutamente, innescando ogni volta estinzioni di massa estese (Fig. 84).

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

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

EARTH'S BIGGEST ERUPTIONS

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

■ Eruptions, showing extent of lava flow

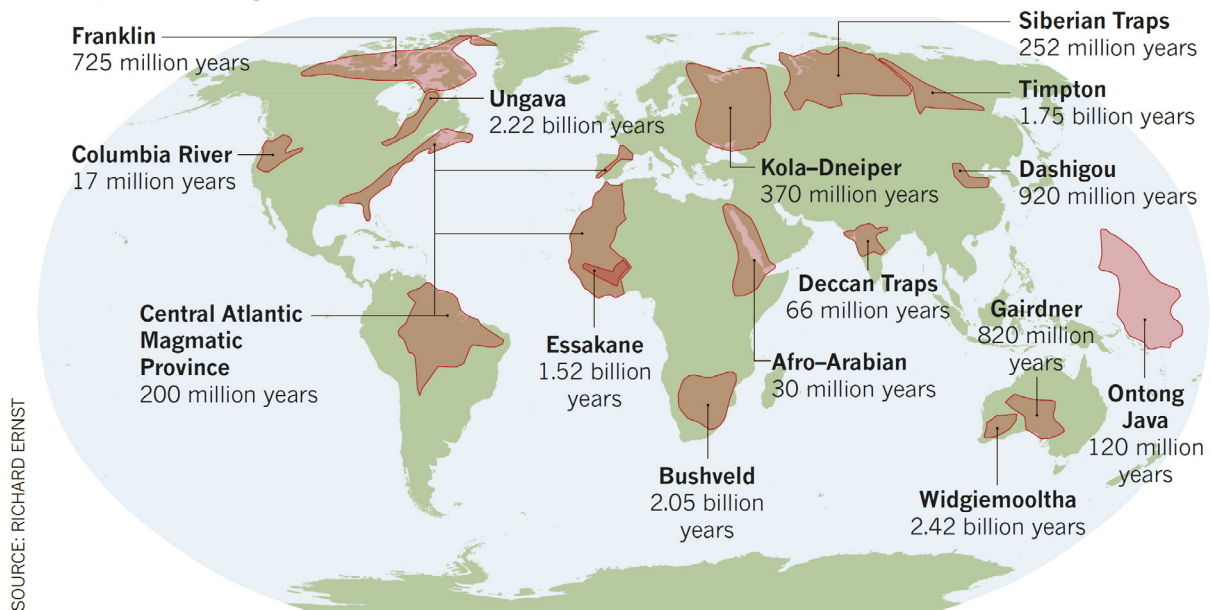


Fig. 84

La mappa mostra le posizioni geografiche e le età delle più grandi eruzioni vulcaniche nella storia della Terra, insieme agli altipiani di lava associati formati da questi eventi.

Illustrazione: Richard Ernst.

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

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

Come nelle epoche geologiche precedenti, il magma salirà dal mantello, penetrando nelle fratture della crosta terrestre, proprio come una sostanza morbida che filtra attraverso un materiale denso. Questo processo porterà al surriscaldamento superficiale, alla formazione di numerose intrusioni di magma intracrostale e alla fusione della litosfera.

Fig. 85 illustra la distribuzione delle rocce effusive in Siberia: i flussi di lava sono mostrati in viola e i corpi magmatici che si

solidificano all'interno della crosta terrestre sono contrassegnati in verde. Le zone verdi sulla mappa evidenziano come il magma abbia eroso la crosta terrestre, creando fratture e avanzando lungo queste aree indebolite. Tale aumento della pressione del magma potrebbe ancora una volta avviare un processo simile con risultati potenzialmente catastrofici.

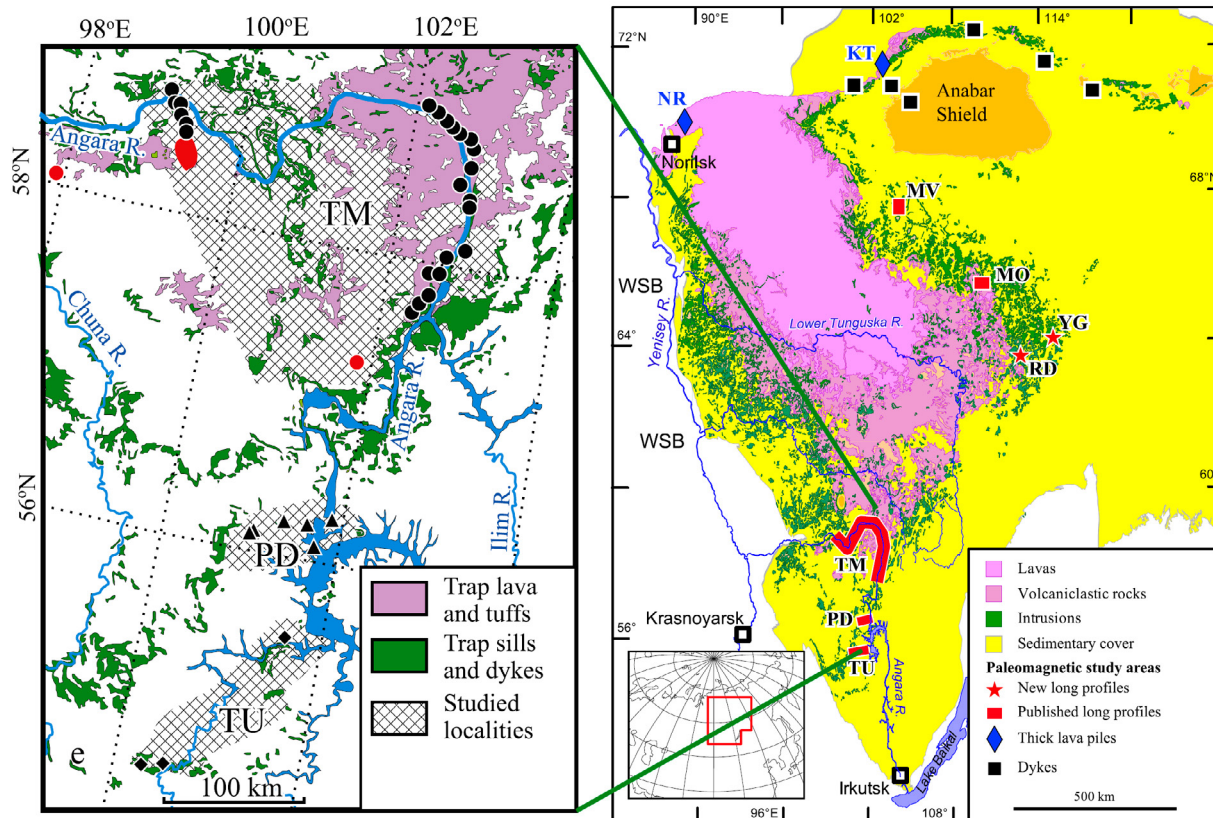


Fig. 85

La mappa a destra fornisce una panoramica della provincia dei Trappi Siberiani (semplificata e modificata da Svensen et al., 2009), con strutture geologiche chiave contrassegnate in diversi colori: rosa per le colate laviche, verde per i corpi intrusivi e giallo per la copertura sedimentaria. La mappa dettagliata a sinistra illustra la distribuzione del magmatismo dei Trappi: viola rappresenta lave e tuffi, e verde denota davanzali e dighe.

Fonte: 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>

Lo scenario di un'eruzione graduale è paragonabile all'improvvisa esplosione del Pennacchio Siberiano, ma prolungata nel tempo. Può essere immaginato come una sequenza di vulcani che eruttano settimanalmente insieme a improvvise fessure che rilasciano flussi di lava basaltica in tutta la Siberia Occidentale.

Fig. 86 illustra questi processi, con le regioni di flusso lavico contrassegnate in viola. La lava si è diffusa in vaste aree nell'area della crosta più densa e più stabile della Piattaforma Siberiana Orientale. Al contrario, nella Siberia Occidentale – caratterizzata da crosta più sottile, più giovane ed eterogenea – le eruzioni si sono verificate

lungo depressioni o spaccature allungate. La mappa evidenzia le zone di tufo, mostrate in rosso, composte da frammenti piroclastici cementati e cenere.

Le eruzioni nella Siberia Orientale e Occidentale differirebbero in modo significativo. Sotto la Siberia Orientale, il magma incontra il denso cratone archeano, creando una barriera sostanziale. Mentre sale, il magma "scava" nelle rocce, si raffredda e si arricchisce di componenti volatili. Ciò porta a eruzioni esplosive con elevate emissioni di cenere e alla potenziale formazione di magma acido e viscoso.

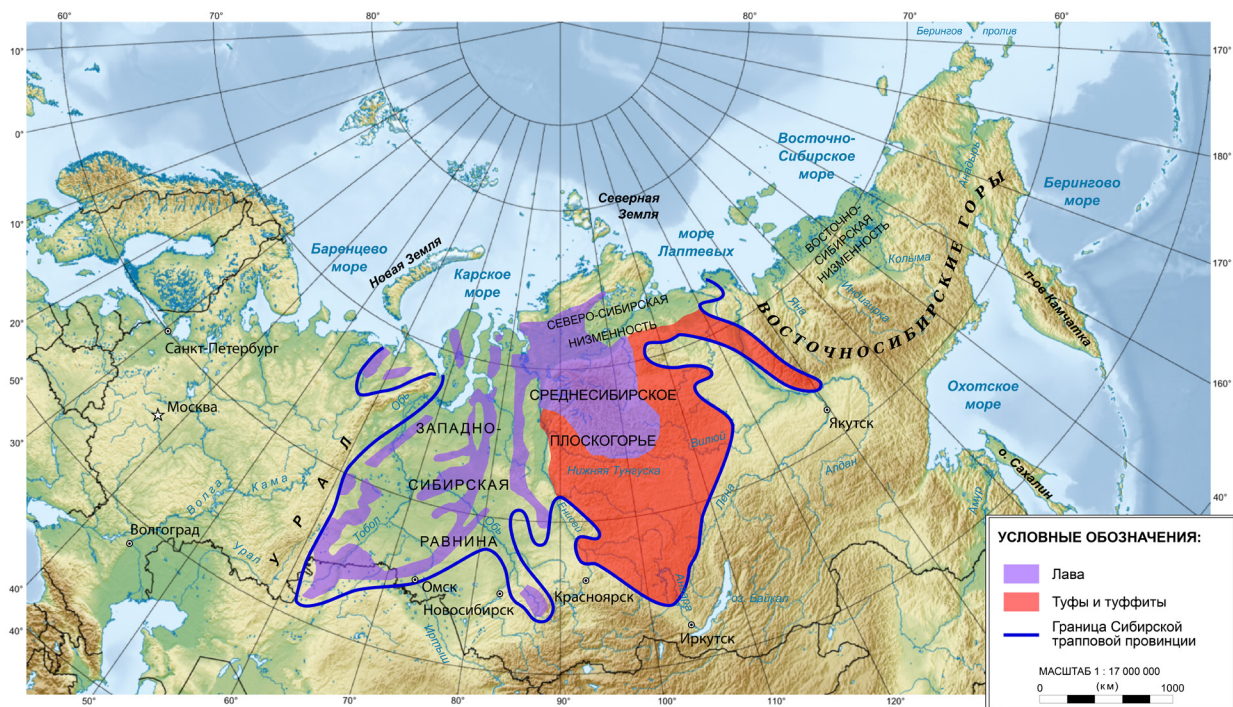


Fig. 86

Mapa della Provincia dei Trappi Siberiani, che mostra le principali strutture geologiche, comprese le aree di colate laviche (viola) e tufi con tuффити (rosso). Le linee blu indicano i confini della Provincia dei Trappi Siberiani
 Fonte: wikipedia.org, sulla base dei dati di Masaitis, 1983.

Nella Siberia Occidentale, con la sua crosta sottile e giovane, si prevede che le eruzioni mostrino prevalentemente l'effusione di lava basaltica fluida.

L'area che dovrebbe essere coperta da colate laviche e tufi è di circa 7 milioni di km² in tutta la Siberia Occidentale e Orientale, paragonabile alle dimensioni dell'attuale Australia. Tuttavia, le regioni soggette a degrado rischiano di superare le decine di milioni di chilometri quadrati. Questi territori subiranno enormi incendi, erosione causata da piogge acide, frane e lahar che trasportano depositi vulcanici. Tutto il permafrost della Siberia sarà a rischio distruzione.

Vale la pena notare che la penisola di Taimyr, a ovest dell'altopiano di Putorana, ospita i più grandi depositi al mondo di nichel, rame e metalli del gruppo del platino, sviluppati dalla società "Norilsk Nickel". Questi depositi sono

di origine magmatica e si sono formati circa 250 milioni di anni fa durante le eruzioni della provincia magmatica dei Trappi Siberiani, che hanno facilitato la creazione di nodi di minerale unici. L'elevata concentrazione di nichel nei magmi di quell'epoca è probabilmente collegata al trasporto di materiali dal nucleo terrestre alla superficie. L'ascesa del Pennacchio di magma Siberiano è in corso, con la sua accelerazione riconducibile allo spostamento del nucleo del 1998 verso la penisola di Taimyr, come determinato dal dott. Yuri Barkin. Nel prossimo futuro, c'è un rischio significativo di una rottura del Pennacchio Siberiano vicino alla città di Norilsk, proprio il luogo in cui si è verificato un evento simile 250 milioni di anni fa.

Successivamente, esamineremo le conseguenze che questo scenario avrebbe per la Russia e il mondo.

Conseguenze della graduale eruzione del Pennacchio Siberiano per la Russia

Gli studi hanno mappato con precisione le posizioni delle lenti astenosferiche all'interno della litosfera della Siberia Meridionale, attribuite alla sottile crosta della regione. Tuttavia, la parte settentrionale della Siberia rimane in gran parte inesplorata sulle mappe sismiche, rappresentando una "macchia bianca" nella ricerca sulla crosta inferiore e sul mantello. Questa mancanza di dati rende impossibile prevedere le posizioni delle scoperte laviche iniziali e delle eruzioni di magma ricco di gas, in particolare data l'assenza di un monitoraggio completo del sottosuolo nella zona del Pennacchio Siberiano.

I primi segnali di allarme di una catastrofe imminente sono noti per includere l'aumento dell'attività sismica e le emissioni di gas localizzate. Mentre il magma avanza verso la superficie, inizierà una rapida fusione del permafrost, che porterà alla destabilizzazione delle infrastrutture costruite sui suoli di permafrost. Il riscaldamento del suolo può anche innescare esplosioni di idrati di gas (metano intrappolato nelle strutture di ghiaccio), causando la formazione di enormi crateri e la distruzione degli insediamenti.

Enormi incendi diverranno inevitabili, guidati dal rilascio di metano, dal surriscaldamento del suolo e dall'emissione di gas vulcanici. I depositi di idrocarburi in Siberia e bacini carboniferi come Kuzbass possono infiammarsi, come si è verificato durante il periodo Permiano-Triassico⁵⁴ quando i depositi di carbone sono stati riscaldati termicamente a 600°C.

Le eruzioni inizieranno improvvisamente, interessando più punti in un vasto territorio. Terremoti con magnitudo di 7-8, combinati con

fessure e faglie, comporteranno flussi di lava che coprono centinaia di migliaia di chilometri quadrati. Intorno alle scoperte laviche, le emissioni tossiche causeranno morti di massa tra piante, animali e esseri umani, formando un "cocktail" mortale nell'atmosfera.

Nei primi giorni, milioni di persone moriranno. La cenere vulcanica distruggerà le reti di trasporto, accumulandosi su strade e ferrovie, riducendo la visibilità e devastando le infrastrutture. L'aviazione cesserà del tutto la sua attività a causa del pericolo rappresentato dalla cenere per i motori degli aerei.

Lo scioglimento del permafrost aggraverà ulteriormente la crisi: le vie di trasporto, gli oleodotti, gli edifici e le infrastrutture cominceranno a collassare. Molte città perderanno l'accesso all'acqua, al cibo e all'elettricità, innescando una crisi umanitaria. L'evacuazione di massa sarà impossibile in gran parte della zona di eruzione, poiché lava, gas, incendi e piogge acide renderanno inutilizzabili le vie di trasporto. Il panico travolgerà milioni di persone e gli sforzi per trasferire la popolazione della Siberia porteranno all'instabilità sociale e a disordini diffusi.

L'economia del paese subirà perdite catastrofiche. La produzione di petrolio, gas, carbone, diamanti e metalli cesseranno a causa della distruzione fisica delle infrastrutture, bloccando le operazioni industriali e creando carenze di materie prime ed energia. L'attività vulcanica devasterà le risorse naturali della regione, comprese le riserve di petrolio e carbone, eliminando le risorse economiche critiche per la nazione.

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>

Decenni dopo l'eruzione, la Siberia rimarrà una zona di disastro ecologico. La catastrofe altererà irreversibilmente la geografia, l'economia e la società della Russia. Solo il 25% del territorio del paese rimarrà abitabile, ma subirà un'immensa pressione da crisi ambientali e sociali. Roccaforti

economiche, monumenti storici e gran parte della ricchezza naturale della nazione andrà persa, rendendo la Siberia inabitabile per la civiltà moderna.

Conseguenze globali della graduale eruzione del Pennacchio Siberiano

Le conseguenze globali dell'eruzione del Pennacchio Siberiano avranno un impatto sul mondo intero, dispiegandosi in più fasi.

Nei primi giorni, il trasporto tra l'Europa e l'Asia attraverso la Siberia cesserà, e il trasporto aereo si fermerà a causa della cenere vulcanica nell'atmosfera. Queste interruzioni paralyzeranno la logistica globale, innescando una crisi alimentare su larga scala, poiché la Russia, uno dei principali esportatori di grano e altri prodotti, fermerà le spedizioni. La cessazione delle esportazioni di petrolio, gas e altre risorse dalla Russia porterà a prezzi in aumento, una crisi energetica e instabilità economica in numerosi paesi. Una reazione a catena di sconvolgimenti finanziari e sociali si propagherà attraverso l'economia globale.

Nuvole di cenere e aerosol di zolfo creeranno un effetto di oscuramento globale, riducendo la radiazione solare e causando un "inverno vulcanico" con un calo di temperatura di 2-3°C. Le piogge acide e la contaminazione del suolo devasteranno l'agricoltura non solo in Russia ma in tutto il mondo. La carestia diffusa, la carenza d'acqua, l'aria tossica e la rottura dei sistemi climatici comporteranno la graduale scomparsa di miliardi di esseri umani e animali. Nel giro di pochi anni, i sistemi sociali crolleranno.

Nel corso del tempo, la cenere vulcanica inizierà a depositarsi, ma si verificheranno bruschi cambiamenti climatici. Il rilascio di metano e anidride carbonica dallo scongelamento del permafrost amplificherà l'effetto serra. Le temperature aumenteranno gradualmente di 5-10 °C, portando a un clima instabile caratterizzato da forti fluttuazioni di temperatura. La distruzione dello strato di ozono comporterà un aumento dei livelli di radiazione ultravioletta nell'emisfero settentrionale, esacerbando le conseguenze delle eruzioni.

Nonostante la sua distanza dalla Siberia, l'Europa dovrà affrontare gravi conseguenze dall'eruzione del Pennacchio Siberiano. La cenere coprirà l'Europa settentrionale e orientale, portando a malattie respiratorie diffuse. Le piogge acide distruggeranno foreste, infrastrutture urbane e terreni agricoli. Dopo una fase di raffreddamento temporaneo, ne deriverà una forte tendenza al riscaldamento, portando siccità al sud e inondazioni in Europa centrale e settentrionale.

La migrazione di massa dalla Russia, dall'Asia e dal Medio Oriente innescherà una crisi demografica e una maggiore competizione per le risorse. I paesi europei dovranno lottare con persistenti sfide ecologiche, economiche e sociali.

L'Asia supporterà il peso maggiore degli effetti dell'eruzione, essendo più vicina al suo epicentro. L'inquinamento atmosferico da polvere e cenere causerà diffuse difficoltà respiratorie e piogge acide, in particolare in Cina, Mongolia e Kazakistan. La riduzione della luce solare e il deterioramento della qualità del suolo devasteranno anche il cuore agricolo della Cina settentrionale, una regione chiave per la produzione alimentare.

Le fluttuazioni di temperatura causeranno danni alle infrastrutture e ai sistemi agricoli in tutto il continente. Il graduale riscaldamento degli

oceani porterà alla deossigenazione, spazzando via gli ecosistemi marini e il collasso della pesca.

Col passare del tempo, le eruzioni in corso aggraveranno la distruzione globale. Le crisi climatiche ed ecologiche si intensificheranno, cancellando gran parte del progresso tecnologico e intellettuale dell'umanità e spingendo la civiltà in una profonda regressione. L'umanità si troverà sull'orlo del collasso totale della società.

Conseguenze a lungo termine della graduale eruzione del Pennacchio Siberiano per il pianeta

Una lenta eruzione del Pennacchio Siberiano porterà a impatti profondi e di vasta portata, trasformando il pianeta per milioni di anni. L'atmosfera sarà inondata di sostanze tossiche, con conseguente pioggia acida su tutto il pianeta e la distruzione dello strato di ozono. Ciò amplificherà le radiazioni ultraviolette e destabilizzerà ulteriormente i sistemi climatici globali.

Gli oceani subiranno un'acidificazione critica, causando l'estinzione di massa della vita marina. Ciò comporterà il collasso degli ecosistemi marini, sconvolgerà le catene alimentari globali e porterà alla perdita di quasi tutta la biodiversità marina.

Sulla terra, la ricaduta delle emissioni tossiche, la distruzione degli ecosistemi del suolo e la perdita della maggior parte delle specie vegetali causeranno l'estinzione di massa.

Senza gli impollinatori, gli ecosistemi terrestri collasceranno e si stima che il 75-95% delle specie esistenti svaniranno.

Come risultato dell'eruzione, si svilupperà una crisi climatica, biologica e geologica completa, trasformando completamente la biosfera terrestre. Questo processo porterà al collasso della civiltà umana, alla morte di miliardi di persone e a una regressione dei gruppi umani sopravvissuti e frammentati a un livello di sviluppo dell'età della pietra. La portata di questa catastrofe sarà paragonabile alle più grandi estinzioni di massa nella storia della Terra, segnando l'inizio di una nuova fase evolutiva per la biosfera che richiederà almeno milioni di anni per svolgersi.

Scenario 3:

Degassamento pianificato e controllato

Metodi di geoingegneria vulcanica esistenti

Data la crescente pressione sotto la Placca Siberiana Occidentale e il Cratone Siberiano Orientale causata dal Pennacchio Siberiano in ascesa, è necessaria un'azione immediata per ridurre al minimo le potenziali conseguenze. Una di queste soluzioni è un rilascio controllato di pressione, lava e gas che si avvicinano alla superficie da camere secondarie, cioè **degassamento pianificato**.

Studi scientifici contemporanei considerano il degassamento delle camere magmatiche un metodo praticabile per prevenire eruzioni su larga scala. Questo approccio supporta l'applicazione delle tecnologie di geoingegneria vulcanica non solo ai vulcani o ai supervulcani, ma anche per gestire l'attività dei pennacchi del mantello. Numerose pubblicazioni scientifiche e brevetti sviluppati da esperti di vari paesi esplorano il concetto di degassamento controllato.

Le basi teoriche della geoingegneria vulcanica sono state stabilite nel XX secolo, con esperimenti pratici condotti nel secolo scorso. I metodi di intervento vulcanico hanno incluso la perforazione nei crateri, il drenaggio dei laghi vulcanici, la creazione di canali per deviare i flussi di lava, il raffreddamento dei flussi di lava

con acqua di mare, il bombardamento di flussi di lava e l'estrazione di gas serra come anidride carbonica e metano (Fig. 87).

Dal 1960, il Servizio Geologico degli Stati Uniti (USGS) ha effettuato operazioni di perforazione nelle regioni dei laghi lavici sul vulcano Kilauea delle Hawaii per reindirizzare i flussi di lava. Iniziative simili sono state attuate in Giappone, Islanda e Italia. Ad esempio, il Giappone ha testato tecnologie per ridurre la pressione nelle camere magmatiche. L'Islanda ha deviato con successo i flussi di lava, come sull'isola di Heimaey, dove la lava è stata raffreddata usando cannoni ad acqua. In Italia sono stati sviluppati sistemi di allarme rapido e metodi per controllare i flussi di lava, tra cui la distruzione esplosiva delle barriere laviche sull'Etna nel 1983.

Conferenze scientifiche internazionali e simposi sulla perforazione profonda in zone di attività vulcanica e geotermica stanno espandendo le potenziali applicazioni della geoingegneria vulcanica per prevenire le eruzioni e mitigare le conseguenze globali.

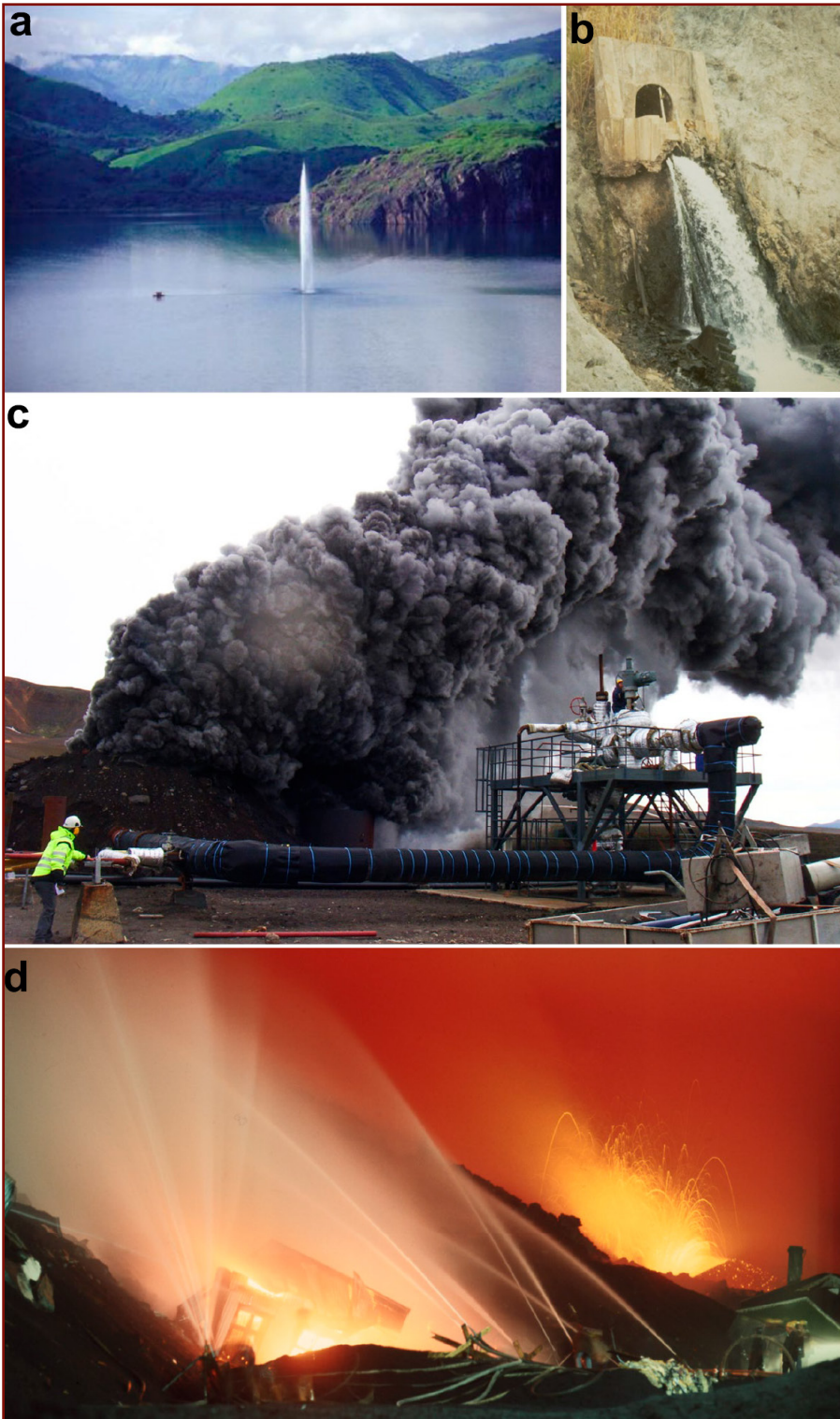


Fig. 87

(a) Degassamento di anidride carbonica dal lago Nyos, Camerun, come documentato da Halbwachs et al. (2020).

(b) Tunnel di drenaggio nella parete del cratere del Monte Kelud, Indonesia (Global Volcanism Program, immagine GVP-01120).

(c) Perforazione ausiliaria di una tasca magmatica a Krafla, Islanda, nel 2009 (immagine di GO Friðleifsson/IDDP).

(d) Raffreddamento delle colate laviche con iniezione di acqua di mare a Heimaey, Islanda, nel 1973, Tristan H. Benediktsson.

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

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

Il diagramma (Fig. 88) presenta la cronologia dei casi più notevoli di geoingegneria vulcanica. I cerchi neri rappresentano interventi deliberati, mentre i cerchi rossi denotano effetti non intenzionali sull'attività vulcanica.

Esistono anche metodi brevettati per il degassamento pianificato e la riduzione dei rischi di eruzioni vulcaniche e supervulcaniche.

Ad esempio, la tecnologia, brevettata da due esperti russi, prevede la prevenzione di eruzioni vulcaniche incontrollate a cascata utilizzando la perforazione angolata dei pozzi per regolare la pressione all'interno delle camere magmatiche. (Fig. 89).

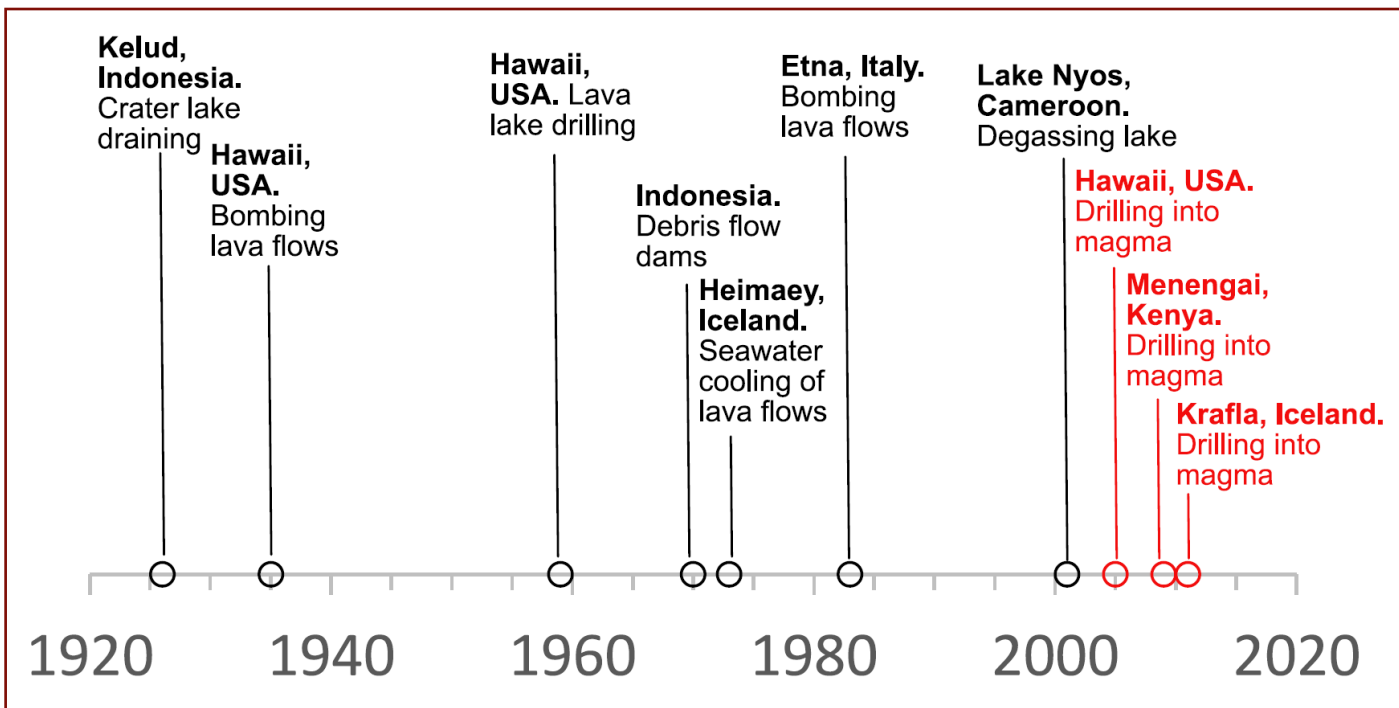


Fig. 88

Una cronologia di alcuni esempi notevoli di geoingegneria vulcanica. I cerchi neri indicano interventi mirati, mentre i cerchi rossi indicano un intervento involontario del vulcano.

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



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

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

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.04.2007

(45) Опубликовано: 10.01.2009 Бюл. № 1

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

(72) Автор(ы):

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

(73) Патентообладатель(и):

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

(54) СПОСОБ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЛАВИНООБРАЗНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ

(57) Реферат:

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

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

5 0 8 C 1

RU 2 3 4 3 5 0 8 C 1

Fig. 89

Brevetto: Metodo per la prevenzione delle eruzioni vulcaniche simili a valanghe.

Questa invenzione si riferisce a metodi per prevenire eruzioni vulcaniche incontrollate, simili a valanghe e per organizzare il trasporto controllato di magma per l'uso nella costruzione. Migliora l'efficienza dell'approccio.

Riassunto dell'invenzione:

Il metodo prevede la gestione della pressione nelle camere magmatiche secondarie sotto i vulcani ad attività solfatica. Ciò si ottiene mediante perforazione inclinata di canali nella base della camera magmatica secondaria. Il gas compresso viene iniettato nella camera per aumentare la pressione, rallentando così l'afflusso di magma dalla camera primaria. Contemporaneamente, il magma accumulato nella camera secondaria viene estratto e trasportato per scopi di costruzione attraverso i canali perforati. Il processo assicura che la pressione non raggiunga livelli critici, il che potrebbe innescare un'eruzione simile a una valanga.

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

Un'altra tecnologia è stata sviluppata da un inventore americano. (Fig. 90) Questa tecnologia delinea i metodi per evacuare il magma dalle camere magmatiche vulcaniche, come la camera del supervulcano di Yellowstone, per prevenire potenziali eruzioni catastrofiche.

L'idea di base prevede la creazione di canali artificiali (tubi) per dirigere il magma verso la superficie, dove può essere elaborato e potenzialmente utilizzato, ad esempio, nella produzione di energia.

(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.

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

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

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

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

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

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

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

(56) **References Cited**
U.S. PATENT DOCUMENTS
3,115,194 A * 12/1963 Adams 376/273

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

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

* cited by examiner

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

(57) **ABSTRACT**

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

25 Claims, 2 Drawing Sheets

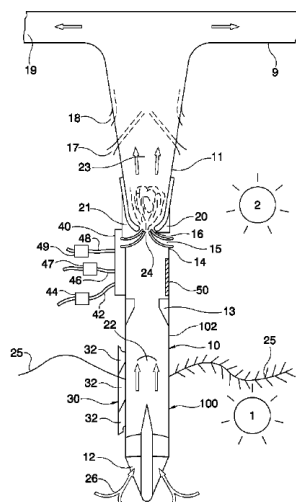
Fig. 90

Brevetto: Sistemi di evacuazione di magma per la prevenzione delle esplosioni di supervulcani.

Un apparato controlla l'evacuazione del magma vulcanico per prevenire esplosioni. L'evacuazione avviene attraverso un unico tubo, il quale riscalda il flusso di magma al suo interno per evitare che aderisca alle pareti. Il riscaldamento può avvenire mediante piccole camere di combustione che generano vapore, il quale a sua volta riscalda e stabilizza il flusso di magma. La stabilità è ulteriormente supportata, quando necessario, da un raffreddamento centrale tramite getti d'acqua provenienti da ugelli situati lungo le pareti del tubo.

Fonte:

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



Un esempio di degassamento di successo è il progetto giapponese “[Unzen Scientific Drilling Project](#)” (USDP), un’iniziativa di sei anni lanciata nell’Aprile 1999. Lo scopo era di studiare la storia della crescita, la struttura del sottosuolo e i processi di ascesa del magma del Monte Unzen (Fig. 91). La prima fase prevedeva la perforazione di due pozzi sulle

pendici del vulcano e la creazione di un modello strutturale. La seconda fase si è concentrata sulla perforazione nel canale del magma dalle eruzioni del 1990-1995 per analizzare il meccanismo di degassamento. La strategia di perforazione includeva la perforazione verticale seguita dall’aumento graduale dell’inclinazione del foro (Fig. 92).



Fig 91
Attrezzature di perforazione utilizzate per il progetto di perforazione del vulcano Unzen nel 1995.
Fonte:
<https://www.icdp-online.org/projects/by-continent/asia/usdp-japan/gallery/>

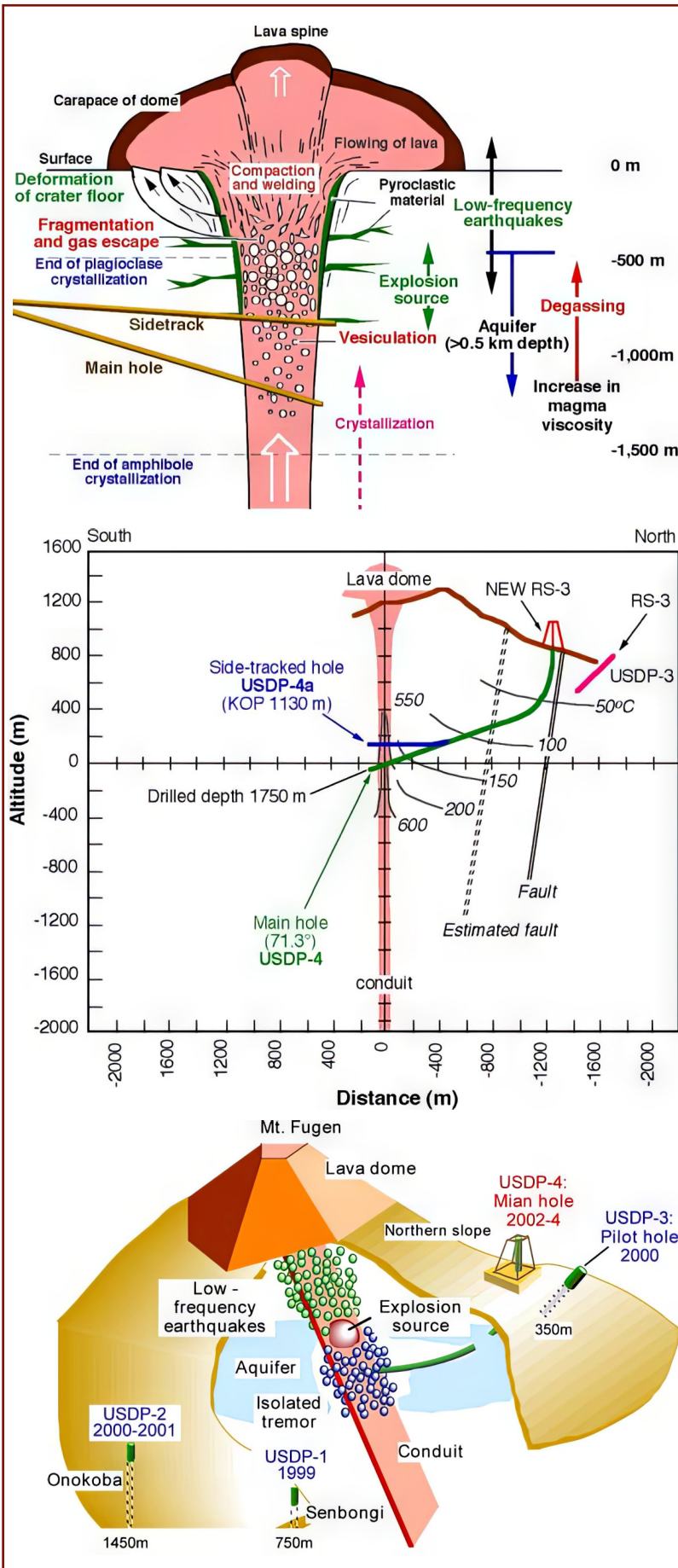


Fig. 92

(A) Immagine della cupola di lava e della parte superiore del condotto del vulcano Unzen. Il degassamento efficace dal magma schiumoso si è verificato durante la sua frammentazione e ricottura nella parte superiore del condotto. La condizione del condotto è stata studiata durante perforazione del foro principale (USDP-4) nel 2003 e il carotaggio continuo era eseguito perforando il foro laterale (USDP-4a) nel 2004.

Fonte: Progetto USDP. (n. d.). Istituto di Ricerca Sismologica, Università di Tokyo. Estratto il 31 Dicembre 2024 da <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USD%20consists%20of%20two%20phases%20>

(B) Traiettorie di perforazione del condotto. New RS-3 e RS-3 sono siti di perforazione di fori principali e laterali e di un foro pilota, rispettivamente.

Fonte: Progetto USDP. (n. d.). Istituto di Ricerca Sismologica, Università di Tokyo. Estratto il 31 Dicembre 2024 da <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USD%20consists%20of%20two%20phases%20>

(C) Immagine tridimensionale della perforazione del condotto.

Fonte: Centro di ricerca sui fluidi vulcanici. (n. d.). Comprendere il sistema del condotto del vulcano Unzen. Istituto di Ricerca Sismologica, Università di Tokyo. Estratto il 31 Dicembre 2024 da <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/vrc/usdp/conduit.html>

Oggi, l'umanità possiede un potenziale tecnologico e ingegneristico sufficiente per intervenire nei sistemi vulcanici. Tuttavia, ogni caso di degassamento pianificato richiede la massima preparazione, compresa un'ampia analisi dei dati e calcoli precisi. Anche allora, i rischi persistono.

I metodi descritti sono stati testati principalmente su vulcani convenzionali, che sono fondamentalmente diversi in scala rispetto al massiccio Pennacchio del mantello Siberiano. Questo pennacchio rappresenta una minaccia che supera di gran lunga la potenza di un singolo supervulcano. È paragonabile all'energia di mille eruzioni della caldera di Yellowstone. Tuttavia, affrontare questo problema ha acquisito urgenza proprio perché esistono potenziali approcci per mitigarlo.

Con il giusto impegno, l'umanità è in grado di sviluppare un programma per il degassamento del Pennacchio del mantello Siberiano, attingendo alle competenze accumulate da specialisti globali. L'obiettivo principale di tale programma sarebbe quello di ridurre al minimo le conseguenze della risalita del pennacchio riducendo la pressione di lava e gas nelle camere magmatiche secondarie, prevenendo così eruzioni incontrollate su larga scala.

L'attuazione di tale programma richiederà una stretta cooperazione internazionale e gli sforzi collettivi di scienziati e ingegneri in tutto il mondo. Solo un approccio unito può produrre soluzioni efficaci per garantire la sicurezza dell'umanità nel suo complesso.

Esempio di un programma per il degassamento pianificato del Pennacchio Siberiano

Il programma può comportare lo sviluppo parallelo di diverse aree chiave:

1. Creazione di una rete di monitoraggio

1.1 Sviluppare una rete di sensori ad alta sensibilità e sistemi di sorveglianza satellitare per monitorare l'attività sismica e termica nella regione. Ciò consentirà il rilevamento tempestivo delle camere magmatiche secondarie.

1.2 Realizzazione di una mappatura dettagliata delle camere magmatiche secondarie utilizzando metodi di esplorazione sismica. Le valutazioni preliminari della pressione e del volume del magma in ciascuna camera secondaria saranno cruciali.

1.3 Perforazione scientifica e monitoraggio di pozzi in zone anomale e installazione di sensori

di pressione, temperatura e attività sismica per raccogliere dati critici.

2. Sviluppo di tecnologie di degassamento controllato e il blocco del canale magmatico

2.1 Sarà necessario sviluppare un piano per la perforazione di pozzi profondi inclinati fino a 8 km di profondità in zone sicure. Saranno necessari calcoli dettagliati della traiettoria per garantire che i fori raggiungano con precisione le camere magmatiche secondarie. Devono essere utilizzate tecnologie di perforazione resistenti alle alte temperature e alla pressione. Ciò include l'uso di materiali resistenti al calore per rinforzare le pareti dei pozzi e l'implementazione di un sistema di monitoraggio per tracciare la pressione e la temperatura all'interno dei pozzi, garantendo sicurezza ed efficacia.

2.2 Un processo di deviazione dei gas e della lava deve essere attentamente pianificato, prevedendo una gestione graduale della pressione all'interno delle camere magmatiche secondarie attraverso un sistema di pozzi. Ciò richiede il controllo della velocità di degassamento per prevenire improvvisi cambiamenti di pressione e l'utilizzo di sistemi di compressori per regolare la pressione del gas. Saranno necessari sistemi di filtrazione e raffreddamento per impedire il rilascio di sostanze tossiche nell'atmosfera. L'estrazione di lava e gas continuerà fino a quando la pressione in ciascuna camera non sarà stabilizzata.

2.3 Per sigillare gli strati al di sopra delle camere magmatiche secondarie, è necessario sviluppare un piano per un'esplosione nucleare mirata in pozzi specifici. Questo approccio ha lo scopo di evitare che il magma eccessivo raggiunga la superficie e di ridurre al minimo le emissioni di cenere.

Il graduale rilascio della pressione garantirà la stabilità della Siberia e proteggerà le aree popolate chiave, sebbene Norilsk e i suoi insediamenti circostanti possano rimanere a rischio.

2.4 Durante il processo di deviazione della lava dalle camere, è necessario fare sforzi per controllarne il più possibile il flusso. La

lava dovrebbe essere diretta attraverso canali appositamente preparati verso i mari artici. Inoltre, dovrebbe essere sviluppato un programma per utilizzare il magma per scopi di costruzione, come la creazione di isole artificiali o il rafforzamento delle coste.

3. Evacuazione della popolazione

È necessario implementare un sistema di allarme rapido, insieme allo sviluppo di piani di evacuazione per emergenze impreviste. Inoltre, sarà necessario un piano strutturato per l'evacuazione sicura delle persone dalle zone ad alto rischio. Questo piano dovrebbe includere misure per l'adattamento e il sostegno sociale degli sfollati, considerando la possibilità di una ricollocazione a lungo termine.

4. Preservazione delle infrastrutture

Devono essere sviluppati piani per la protezione e l'evacuazione di strutture strategiche dalle aree a rischio di inondazione lavica. Ciò include la creazione di strutture di stoccaggio sicure in zone protette per l'evacuazione delle risorse critiche della regione, come petrolio, gas, metalli non ferrosi e preziosi, minerali, fertilizzanti, forniture alimentari, acqua e forniture mediche.

Giustificazione per la selezione di posizioni per i pozzi di ricerca per monitorare la dinamica del moderno Pennacchio del mantello Siberiano

Il primo passo per comprendere la velocità e la direzione dell'ascesa del pennacchio, la diffusione della sua testa e la sua penetrazione attraverso le fessure della crosta terrestre è monitorare i parametri geotermici e geofisici in profondità. Ciò richiede la perforazione di nuovi pozzi e la conduzione di misurazioni regolari di

temperatura, pressione, composizione del gas, marcatori di processi magmatici intensificati, rumore sismico e altri parametri all'interno di questi pozzi.

Sono state proposte dieci posizioni per la perforazione di pozzi di ricerca (Figg. 93, 94).

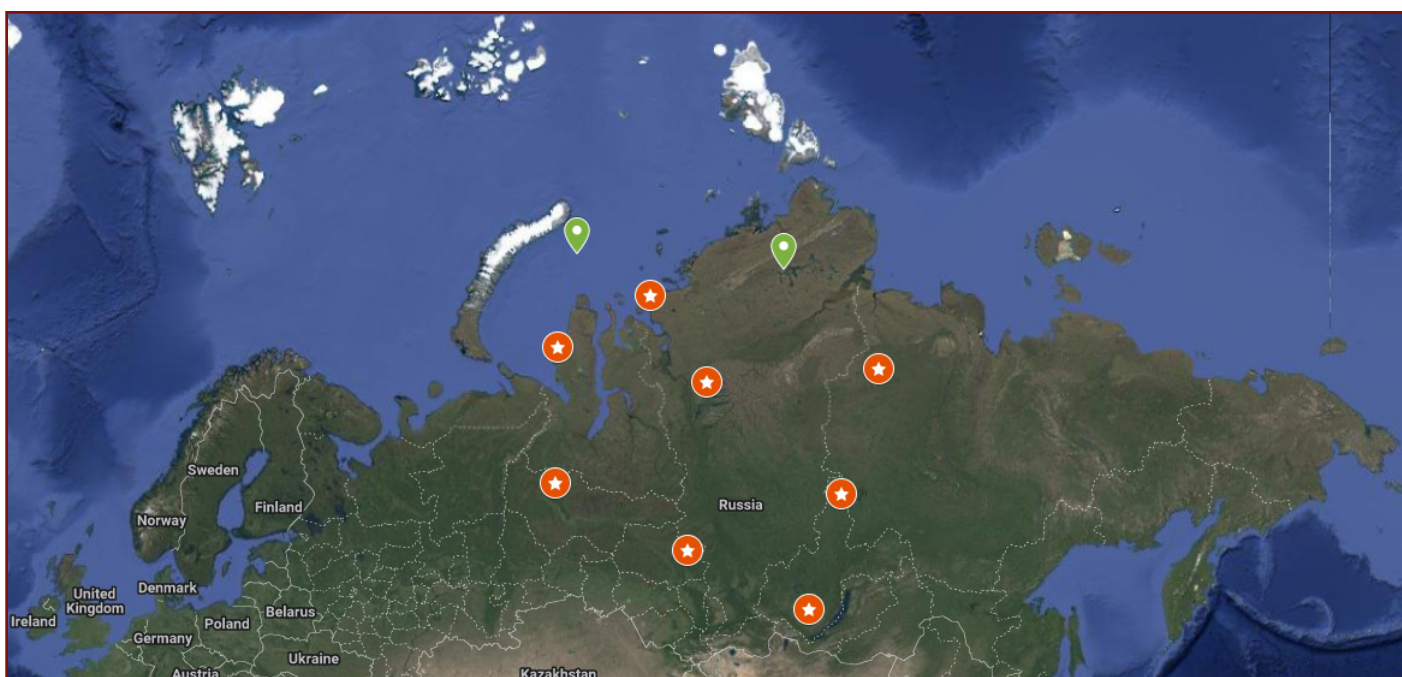


Fig. 93

Posizione preliminare di 10 siti raccomandati per la perforazione di pozzi di ricerca

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

Fig. 94

Tabella dei 10 pozzi di ricerca raccomandati per monitorare la progressione del Pennacchio del mantello Siberiano. Compreso il nome del pozzo, le coordinate, l'insediamento o l'infrastruttura nelle vicinanze e la struttura geologica della sezione trasversale.

I criteri di selezione per questi siti sono stati basati sui seguenti principi:

Le posizioni dei pozzi sono state scelte in relazione alla massima intersezione di anomalie termiche e geodinamiche associate all'ascesa e alla diffusione della testa del pennacchio. Sulla base di questo principio, un pozzo è stato posizionato nella regione centrale del previsto sollevamento della testa del pennacchio, sette pozzi sono stati designati lungo il perimetro del flusso di magma previsto, un altro pozzo è stato posizionato vicino al lago Baikal, nella direzione dell'avanzamento attivo del magma sotto il Cratone Siberiano Orientale, e un altro è stato pianificato vicino al Mare di Kara, per monitorare il progresso del pennacchio sotto la crosta oceanica della piattaforma artica.

Il posizionamento del pozzo è stato ottimizzato per il successivo lavoro di tomografia sismica, garantendo che i dati dei sensori sismici, una volta elaborati, fornissero l'imaging 3D più chiaro. In altre parole, la griglia dei sensori sismici all'interno dei pozzi è stata progettata per essere posizionata in modo ottimale per la tomografia sismica sotterranea.

Le posizioni dei pozzi hanno considerato la fattibilità della consegna delle attrezzature per la perforazione e le vie di accesso (disponibilità di trasporto). A causa del terreno difficile, dei paesaggi paludosi, delle poche strade e delle condizioni climatiche estreme nella Siberia Settentrionale Occidentale e Orientale, la selezione dei siti di perforazione si basava sulla vicinanza alle infrastrutture esistenti per la ricerca scientifica, come strade, insediamenti e piattaforme di perforazione attive. Due punti sono stati scelti sugli attuali giacimenti petroliferi gestiti da "Gazprom" e "Rosneft", mentre gli altri erano situati vicino a giacimenti di petrolio, gas e altri giacimenti minerari. Va notato che se la perforazione alle coordinate specificate si rivela

impossibile, le posizioni del pozzo possono essere regolate di 10-20 km in qualsiasi direzione.

Metodi di ricerca raccomandati per i pozzi

Per il monitoraggio completo e lo studio del pennacchio del mantello, i seguenti parametri devono essere raccolti dai pozzi di ricerca:

1. Monitoraggio della temperatura: si tratta di misurare le temperature a varie profondità per analizzare le anomalie termiche.

2. Pressione: determinazione dei livelli di pressione all'interno degli strati per valutare le condizioni idrodinamiche.

3. Campionamento di gas: raccolta di campioni di gas da strati profondi per studiare la loro composizione e la potenziale influenza dell'attività magmatica su di essi.

4. Ricerca sismica: Installazione di sensori sismici standard e ad ampio raggio per registrare l'attività sismica per creare una tomografia sismica dettagliata della crosta terrestre e del mantello per il monitoraggio continuo dello stato del pennacchio.

5. Composizione del fluido di formazione: Analisi della composizione dei fluidi di formazione per identificare potenziali contributi termici o magmatici.

6. Studi geomeccanici: Misurazioni dello stress nelle rocce per analizzare lo stato di stress della litosfera sottoposta a deformazione a causa dell'intrusione del pennacchio.

7. Metodi elettromagnetici: Effettuare ricerche elettromagnetiche per registrare i cambiamenti nelle proprietà elettriche dei materiali in relazione all'intrusione del magma.

I dati raccolti costituiranno una base per lo sviluppo di un modello completo della dinamica dei pennacchi del mantello e la valutazione del suo impatto sui processi geologici in Siberia.

Caratteristiche della perforazione e del blocco dei canali magmatici durante il degassamento pianificato

L'obiettivo principale della perforazione di pozzi durante il degassamento pianificato è quello di ridurre la pressione nei serbatoi magmatici secondari del pennacchio, prevenire esplosioni di magma e stabilire un rilascio controllato di gas e lava.

Nella fase iniziale, la perforazione sarà condotta con operatori umani, poiché a basse profondità, il processo prevede operazioni tecnologiche standard con rischi minimi per il personale. Le piattaforme di perforazione tradizionali dotate di sistemi di monitoraggio della temperatura e della pressione saranno utilizzate per controllare il processo e rispondere tempestivamente alle deviazioni dalla norma.

Man mano che la perforazione si avvicina a profondità critiche e vicino a zone attive del sistema magmatico, il rischio per il personale aumenta in modo significativo. In questa fase, le operazioni devono passare interamente all'automazione. Saranno impiegate perforatrici specializzate con sistemi di controllo automatizzati. Il processo di perforazione sarà gestito da remoto utilizzando un software che analizza i dati in tempo reale e regola le azioni delle attrezzature di conseguenza.

Per migliorare la precisione del monitoraggio, gli operatori utilizzeranno tecnologie di realtà virtuale, consentendo un controllo dettagliato delle apparecchiature senza presenza fisica in zone pericolose. Questo approccio riduce al minimo la probabilità di incidenti causati da scarichi di gas ad alta pressione o guasti alle apparecchiature causati da onde d'urto.

Droni e robot monitoreranno il complesso di perforazione e l'ambiente circostante. I droni dotati di telecamere, immagini termiche e sensori rilevano perdite di gas, anomalie termiche

e attività sismica. I robot che operano direttamente nella zona di perforazione raccoglieranno dati su temperatura, pressione e composizione chimica dell'ambiente, trasmettendo queste informazioni ai centri di controllo automatizzati. Queste tecnologie riducono al minimo la presenza umana in aree ad alto rischio e garantiscono un elevato livello di precisione e sicurezza.

Dopo il completamento della perforazione, la fase successiva prevede il degassamento controllato — rilasciando gradualmente la pressione ed espellendo grandi volumi di lava. Nelle fasi finali, dopo una significativa riduzione dei volumi di magma e gas, potrebbe essere necessaria un'esplosione controllata per sigillare le vie di risalita del magma. Un metodo proposto prevede un'esplosione nucleare diretta nel pozzo trivellato. L'obiettivo di questo approccio è quello di alleviare lo stress tettonico e creare barriere strutturali stabili che bloccano i canali magmatici.

Questo approccio prevede la rottura delle rocce in zone ad alto stress, seguita dalla loro fusione e raffreddamento sotto l'influenza dell'energia termica. Questo processo favorisce la formazione di una barriera monolitica in grado di ostruire completamente o parzialmente l'accesso del magma alla superficie. L'impatto termodinamico può anche alleviare lo stress tettonico, riducendo la probabilità di future eruzioni.

L'implementazione di esplosioni nucleari richiede calcoli precisi, comprese le valutazioni della pressione litostatica, della durezza e della densità della roccia e delle caratteristiche della fusione magmatica. Questi fattori devono essere attentamente considerati per massimizzare l'efficacia del metodo e minimizzare i potenziali rischi.

Selezione del tempo ottimale per la perforazione dei fori durante il degassamento pianificato

Allo stato attuale, i nostri specialisti sono concentrati sullo studio dei tempi ottimali per lo svolgimento di operazioni di perforazione come parte del degassamento pianificato. Mentre è troppo presto per trarre conclusioni definitive, i calcoli preliminari indicano già il potenziale per selezionare con precisione il momento più favorevole per iniziare il degassamento. I risultati suggeriscono che, con una tempistica correttamente determinata, il rischio di complicanze può essere ridotto più volte.

Il processo di perforazione deve tenere conto non solo delle proprietà fisiche e meccaniche delle rocce, come la loro forza e fratturazione, ma anche dei parametri temporali legati alla meccanica celeste. I calcoli dovrebbero essere basati sull'analisi della posizione della Terra

lungo l'eclittica, la fase lunare, l'allineamento dei pianeti principali come Giove e l'attuale livello di attività solare. Inoltre, il monitoraggio dei terremoti a focalizzazione profonda nella regione di perforazione è cruciale, in quanto tali eventi possono aumentare significativamente l'attività sismica locale.

Attualmente, abbiamo formato una comprensione generale del meccanismo e dei modelli chiave che governano il processo, ma questi risultati richiedono un'ampia convalida. I risultati devono essere rigorosamente riesaminati dal nostro team scientifico e confermati in modo indipendente attraverso ricerche e modelli sviluppati da altri specialisti.

Risultati previsti del degassamento pianificato del Pennacchio Siberiano

Effettuare il degassamento pianificato del Pennacchio Siberiano può portare a tre scenari primari, calcolati in due fasi del progetto: la fase iniziale e quella successiva. Di seguito è riportata una considerazione dettagliata di ogni scenario.

1. Danni minimi al territorio della Russia

Se il processo di degassamento e rilascio di lava in eccesso dalle camere magmatiche secondarie viene accuratamente modellato da un team internazionale di esperti, con calcoli meticolosamente eseguiti per tenere conto di tutte le caratteristiche geologiche, entrambe

le fasi del degassamento possono procedere senza incidenti o complicazioni. In questo scenario, il danno al territorio russo sarebbe ridotto al minimo, con perdite pari al 5-7% dell'area del paese, o al massimo fino al 10% (un raggio interessato di circa 500-600 km). Le principali città del territorio di Krasnojarsk potrebbero essere protette e la perdita di vite umane potrebbe essere evitata. Inoltre, sviluppi favorevoli potrebbero consentire la deviazione della lava verso i mari artici, potenzialmente espandendo il territorio della Russia attraverso la creazione di nuove terre costiere.

2. Danni moderati al territorio della Russia

Questo scenario presuppone il completamento con successo della fase iniziale di degassamento. Tuttavia, anticipa complicazioni impreviste durante le fasi successive, come un'improvvisa esplosione di gas o una scarica di lava. A quel punto, alcuni gas e lava sarebbero già stati sfiati, riducendo l'impatto complessivo. I possibili risultati potrebbero includere flussi di lava basaltica fluida, simili a quelli osservati in Islanda o nelle isole Hawaii, o un'eruzione di moderata esplosività. In questo caso, la potenziale perdita di territorio potrebbe aumentare al 25-30% (circa 4-5 milioni di km²). Ciò interesserebbe le città entro un raggio di 1.000 km dalla zona attiva. Tuttavia, questo scenario non si tradurrebbe in una catastrofe globale per la civiltà o in una distruzione irreversibile in tutto il territorio russo. L'umanità sarebbe in grado di gestire le sfide climatiche ed ecologiche che ne derivano.

3. Massimo danno alla Russia e al mondo

Questo scenario presuppone che un'iniziativa tardiva o un'esperienza insufficiente tra gli specialisti potrebbero portare a complicazioni significative. Una mancanza di ricerca, errori di calcolo o perforazione attraverso roccia morbida o fratturata potrebbe interrompere le operazioni. Se sorgono complicazioni durante la fase iniziale di degassamento, quando la pressione nelle camere magmatiche è al suo picco, potrebbe verificarsi uno dei due esiti catastrofici: un'esplosione immediata dell'intero sistema del Pennacchio Siberiano o flussi lavici lenti ma estesi simili alla formazione dei Trappi Siberiani.

Nonostante i potenziali rischi, la probabilità di un tale risultato è estremamente bassa, in quanto è difficile immaginare l'attuazione di un progetto così complesso senza un'adeguata preparazione internazionale.

Un risultato ottimistico e più probabile comporta la perdita di solo il 5-7% del territorio russo con danni minimi. Anche in caso di complicazioni durante le fasi successive, le perdite potrebbero salire al 25-30%, che rimane significativamente più favorevole delle conseguenze dell'inazione. Il rischio di distruzione più grave durante il degassamento pianificato, sia per la Russia che per il mondo, è trascurabile.

L'implementazione del degassamento pianificato fornirà alla Russia un'opportunità unica per guidare la gestione dei rischi geodinamici globali, rafforzando la sua posizione di leader scientifico e tecnologico internazionale. L'esecuzione con successo del progetto dimostrerà la capacità del paese di affrontare le sfide su scala planetaria, promuovendo la collaborazione globale per prevenire i disastri naturali. Questa iniziativa non solo stabilizzerà l'ambiente politico e sociale interno della Russia, ma rafforzerà anche la cooperazione internazionale nell'affrontare le questioni globali.

Il degassamento controllato del Pennacchio Siberiano potrebbe avere un impatto non solo sulla regione locale, ma anche su altri sistemi vulcanici, come Yellowstone e stratovulcani in tutto il mondo. I serbatoi magmatici e le loro dinamiche formano un'unica rete globale interconnessa, che funziona come un sistema geomeccanico unificato. La riduzione della pressione controllata in un segmento può ridurre lo stress attraverso i serbatoi magmatici, prevenendo reazioni a catena ed eruzioni. Questo può essere paragonato allo sgonfiamento di uno pneumatico per auto: la riduzione della pressione in un'area ridistribuisce il carico e previene la rottura nei punti criticamente sollecitati. Un approccio simile al degassamento potrebbe stabilizzare i sistemi magmatici su scala globale.

Quindi, intraprendere un'operazione di degassamento pianificato e controllato rimane l'unica possibilità praticabile dell'umanità per evitare il disastro, sia per la Russia che per il mondo intero. Questo scenario offre un percorso per evitare una catastrofe globale mentre acquista tempo per l'umanità per sviluppare ulteriori soluzioni.

Tuttavia, nonostante la sua immensa promessa, la riuscita realizzazione anche dello

scenario più ottimistico rappresenta una sfida monumentale. Un'azione immediata è essenziale, poiché i ritardi aumentano la probabilità di eventi catastrofici. Sorprendentemente, un tale progetto potrebbe incontrare opposizione all'interno della Russia a causa di potenziali rischi, come danni alle infrastrutture e ridotto controllo sulle risorse strategiche.



■ Conclusione

Il Pennacchio Siberiano rappresenta una minaccia geodinamica globale paragonabile in scala a mille eruzioni catastrofiche dei più grandi supervulcani. Un'eruzione incontrollata potrebbe portare a conseguenze su scala planetaria, tra cui l'inizio di un'era glaciale, la distruzione degli ecosistemi, il crollo delle infrastrutture e l'estinzione dell'umanità. Questi rischi richiedono l'attuazione di misure preventive, come il degassamento pianificato del sistema magmatico del Pennacchio Siberiano.

L'inazione pone la minaccia di eruzioni spontanee e incontrollate, le cui conseguenze saranno catastrofiche non solo per la Russia ma per l'intero pianeta. La riduzione controllata della pressione nelle camere magmatiche può aiutare a scongiurare gli scenari peggiori e fornire all'umanità il tempo necessario per sviluppare soluzioni a lungo termine.

Inoltre, l'integrazione della tecnologia dei generatori di acqua atmosferica nell'uso quotidiano insieme al degassamento del Pennacchio Siberiano aprirà nuove opportunità per ripristinare l'equilibrio ecologico. Ciò consentirà la pulizia della plastica oceanica, rafforzerà il ciclo dell'acqua e ristabilirà l'equilibrio termico del pianeta. L'adozione

globale di tali misure stabilizzerà il clima e garantirà un futuro per l'umanità, acquistando tempo per affrontare l'influenza cosmica esterna responsabile di eventi catastrofici durante il ciclo di 12.000 anni.

Questi obiettivi richiedono un'urgente collaborazione internazionale tra scienziati di diverse discipline, inclusi i fisici quantistici, per sviluppare e implementare soluzioni complete. Tuttavia, i conflitti geopolitici e militari ostacolano tale cooperazione. Pertanto, una moratoria globale sulla guerra e il reindirizzamento delle risorse militari verso la mitigazione dei disastri e gli sforzi umanitari sono imperativi. L'umanità ha solo 4-6 anni di condizioni relativamente stabili per intraprendere le azioni necessarie.

Se vengono stabilite le condizioni per una collaborazione aperta, gli scienziati non partiranno da zero, poiché la ricerca esistente e la comprensione delle relazioni causali in questo settore forniscono già una base. L'incapacità dell'umanità di dare priorità all'unità globale e alla collaborazione scientifica porterà a conseguenze irreversibili per la vita sulla Terra.

■ Appendice 1

La metodologia per analizzare l'attività sismica ha comportato il download e l'elaborazione dei dati dal Centro Sismologico Internazionale (ISC). Poiché il set di dati include contributi di vari paesi e istituti di ricerca, nonché diversi tipi di scale di grandezza (Mw, Ms, Mb, ML, MD, ecc.), è stato applicato uno specifico algoritmo di elaborazione dei dati per selezionare il tipo di grandezza più appropriato da più fonti. Sono stati utilizzati due approcci distinti:

1. Indicato nel testo come **Algoritmo Speciale di Magnitudo Mediana**, questo metodo comporta la selezione di una stima di magnitudo preferita e l'inclusione di un evento nel set di dati solo se la stima preferita rientra nell'intervallo di magnitudo richiesto. Il processo di selezione segue una gerarchia di tipi di grandezza in ordine di preferenza: Mw, ML, MS, Mb, MD, MV.

Se esistono più valori del tipo di magnitudo preferito per un determinato evento, la mediana viene calcolata da tutte le stime disponibili di quel tipo per l'evento.

Se non sono disponibili stime dei tipi preferiti per un determinato evento (il che è raro, rappresentando solo una piccola percentuale di eventi nell'intero database), viene selezionata qualsiasi stima di magnitudo con un valore corrispondente alla mediana calcolata da tutti i tipi di magnitudo per quell'evento.

2. Indicato nel testo come **Algoritmo di Magnitudo Massima**, questo metodo seleziona la stima di magnitudo con il valore più alto tra tutte le stime di magnitudo disponibili per l'evento specificato.

Il primo algoritmo generalmente si traduce in una leggera riduzione dei valori di magnitudo rispetto alla stima più alta riportata. Tuttavia, l'esperienza ha dimostrato che

l'algoritmo di magnitudo mediana fornisce una rappresentazione affidabile della legge di Gutenberg-Richter e di altri modelli sismici e si allinea bene con i dati di altri database sismologici, come il Servizio Geologico degli Stati Uniti (USGS) e l'Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS).

Il secondo algoritmo consente una valutazione del numero di terremoti registrati da qualsiasi istituto di ricerca con una magnitudo superiore a una soglia selezionata. Questo approccio aiuta a identificare le tendenze nella frequenza dei terremoti all'interno di un determinato intervallo di magnitudo.

Tutti i grafici presentati nella sezione "Aumento dell'attività sismica come indicatore della destabilizzazione della placca dovuta all'attività del Pennacchio magmatico Siberiano" sono stati costruiti utilizzando il primo algoritmo – lo speciale algoritmo di magnitudo mediana (Figg. 44–75).

Dopo aver selezionato la grandezza, i dati sono stati filtrati per tipo di evento nel database ISC per escludere gli eventi causati da attività umane durante le operazioni minerarie, come esplosioni, sospette esplosioni, crolli di roccia, ecc. Sono stati esclusi i seguenti tipi di eventi:

km = known mine explosion – esplosione in miniera conosciuta

sm = suspected mine explosion – esplosione in miniera sospetta

kh = known chemical explosion (Not standard IMS) – esplosione chimica conosciuta (non standard IMS)

sh = suspected chemical explosion (Not standard IMS) – esplosione chimica sospetta (non standard IMS)

kx = known experimental explosion –
esplosione sperimentale conosciuta

sx = suspected experimental explosion –
esplosione sperimentale sospetta

kn = known nuclear explosion – esplosione
nucleare conosciuta

sn = suspected nuclear explosion – esplosione
nucleare sospetta

Inoltre, poiché la Russia ha un gran numero
di operazioni minerarie, il database ISC è stato
incrociato con i dati del Servizio Geofisico

Unificato dell'Accademia Russa delle Scienze
a partire da Gennaio 2025. Questo set di dati
include tutte le esplosioni conosciute e crolli di
roccia all'interno del territorio russo. Anche questi
eventi sono stati esclusi per garantire che nessun
evento correlato all'esplosione rimanesse nel set
di dati finale.



Riferimenti

- Arushanov, M. L. (2023). *Dinamiche climatiche: fattori spaziali*. LAMBERT Academic Publishing.
- Arushanov, M. L. (2023). Cause dei cambiamenti climatici della terra come risultato dell'impatto cosmico, disperdendo il mito del riscaldamento globale antropogenico. *Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft*, 53, 4-14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979>
- Barkin, Y. V. e Lyubushin, AA (2007) "Movimento del geocentro terrestre e il suo contenuto geodinamico", in *Sagitov Readings 2007*, Università Statale di Mosca, Mosca, 31 gennaio - 1 febbraio [Online]. Disponibile su: http://Infm1.sai.msu.ru/grav/russian/life/chteniya/sagi2007/SAGITOV_BARKIN_2007.pdf
- Barkin, Y.V. (2009). Cambiamenti ciclici e inversivi del clima negli emisferi settentrionale e meridionale della Terra // *Geologia dei mari e degli oceani: Atti della XVIII Conferenza Scientifica Internazionale (Scuola) di Geologia Marina*. Vol. III. — Mosca: GEOS, 2009. pp. 4–8.
- Barkin, Y. V. (2011). "Salti sincroni nell'attività dei processi planetari naturali nel 1997-1998 e il loro meccanismo unificato". In *Geologia dei mari e degli oceani: Atti della XIX Conferenza Scientifica Internazionale sulla Geologia Marina (Vol. 5, pp. 28-32)*. GEOS.
- Barkin, Y. V., Smolkov, G. Y. (2013). Bruschi cambiamenti nelle tendenze dei fenomeni geodinamici e geofisici nel 1997-1998. Negli Atti della Conferenza russa sulla Fisica Solare-Terrestre (pp. 16-21). Irkutsk.
- Barkin, Yu. V. (16 Settembre 2014). *Conseguenze geofisiche degli spostamenti relativi e delle oscillazioni del nucleo e del mantello terrestre*. Istituto di Fisica della Terra, Mosca.
- 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>
- Benjamin 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>
- 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. e Bogoyavlensky, I. V. Nuovi dati sul degassamento intensivo della Terra nell'Artico nel nord della Siberia Occidentale: laghi termokarst con crateri di esplosione di gas e vulcani di fango. *AEE* 13, 353-368 (2023). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>
- Bogoyavlensky, V. I. Nuovi dati sul vulcanismo del fango nell'Artico sulla penisola di Yamal. *Accademia Russa delle Scienze. Scienze della Terra* 512, 92-99 (2023). <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>
- Brown, S. K., Croweller, H. S., Sparks, R. S.J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3(5). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Bryson, R. A. (1989). Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115–125. <https://doi.org/10.1007/bf00868307>
- 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. Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. *Climatic Change* 166, 9 (2021) <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>

Nikiforova, M. P., Vargin, P. N., Zvyagintsev, A. M., Ivanova, N. S., Kuznetsova, I. N. e Luk'yanov, A. N. (2016). Mini-buco di ozono sopra gli Urali Settentrionali e la Siberia. *Atti del Centro di Ricerca Idrometeorologica della Federazione Russa*, 360, 168-180. Nei materiali della Conferenza di Idrometeorologia, 9–10 febbraio, Volume 4, pp. 91–96. Voronezh: Pubblicazioni di ricerca scientifica.

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. Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept. *Nat Commun* 6, 6960 (2015). <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., Kiryashkin, A. G., Kiryashkin, A. A. “Geodinamica profonda”. Novosibirsk, Casa editrice della Filiale Siberiana dell'Accademia Russa delle Scienze, GEO, 2001, 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). I poli magnetici della Terra. 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.

Centro Federale di Ricerca, Servizio Geofisico Unificato dell'Accademia Russa delle Scienze <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 <https://doi.org/10.1029/2020GL091366>
- Comitato Internazionale GCGE GEOCHANGE. (2010). Cambiamenti ambientali globali: minaccia allo sviluppo della civiltà (Vol. 1). Londra: 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.earsci.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. “Interazione di un Pennacchio Termochimico con i flussi Convettivi del Mantello e la sua Influenza sulla Fusione del Mantello e sulla Ricristallizzazione”, “Geologia e geofisica”, 2013, Vol. 54, n. 5, pp. 707-721.
- Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3(5). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Konstantinov, K. M., Bazhenov, M. L., Fetisova, A. M., & Khutorskoy, M. D. (2014). Paleomagnetism of trap intrusions, East Siberia: Implications to flood basalt emplacement and the Permo–Triassic crisis of biosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 242-253. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029>
- Koptev, A., Cloetingh, S. Role of Large Igneous Provinces in continental break-up varying from “Shirker” to “Producer”. *Commun Earth Environ* 5, 27 (2024). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01191-9>
- Koulakov, I. Y. (2008). Struttura del mantello superiore sotto la Siberia Meridionale e la Mongolia dalla tomografia sismica regionale. *Geologia e geofisica*, 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). Tettonica dei pennacchi del mantello: evoluzione dei concetti di base. *Bollettino geologico dell’Università di Mosca*, 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) “Forti terremoti nel mantello e la loro influenza nelle zone vicine e lontane”, Servizio Geofisico dell’Accademia Russa delle Scienze. Disponibile all’indirizzo: <http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mihaylova.pdf>
- Mikhailova, R.S., Ulubieva, T.R. e Petrova, N.V. (2021) “Il terremoto dell’Hindu Kush del 26 ottobre 2015 con Mw=7,5, 10~7: sismicità precedente e sequenza di aftershock”, *Terremoti dell’Eurasia settentrionale*, 24(2015), pp. 324-339. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.31>

- Nikiforova, M.P. Valori estremamente bassi di ozono totale sopra gli Urali Settentrionali e la Siberia alla fine di Gennaio 2016. AOO (2017) 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). Rapporto sulle caratteristiche climatiche nella Federazione Russa per il 2021. Mosca: Servizio Federale per l'Idrometeorologia e il Monitoraggio Ambientale.
- Roshydromet. (2024). Rapporto sulle caratteristiche climatiche nella Federazione Russa per il 2023. Mosca: Servizio Federale per l'Idrometeorologia e il Monitoraggio Ambientale.
- 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). *Ricerca Eliogeofisica*. Numero 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. Degassamento profondo nelle regioni polari del pianeta e cambiamenti climatici. Agosto (2018) doi:10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.articolo 48
- TASS. (Gennaio, 2024). Il territorio della Russia si sta riscaldando 2,5 volte più velocemente del resto del pianeta. Agenzia di stampa TASS. <https://tass.ru/obschestvo/16009287>

Progetto USDP. (n. d.). Istituto di Ricerca Sismologica, Università di Tokyo. Estratto il 31 Dicembre 2024 da <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. "Geodinamica profonda della Terra", "Geologia e Geofisica", 1993, Vol. 34 (4), pp. 3-13.

Zonenshain, L. P., Kuzmin, M. I. "Geodinamica profonda della Terra", "Geologia e Geofisica", 1993, Vol. 34 (4), pp. 3-13.

Zotov, L. V., Barkin, Y. V., e Lyubushin, A. A. (2009). Il moto geocentrico e la sua geodinamica. Negli atti della conferenza "Geodinamica Spaziale e Modellazione dei Processi Geodinamici Globali" (pp. 98-101). Ramo siberiano di RAS.