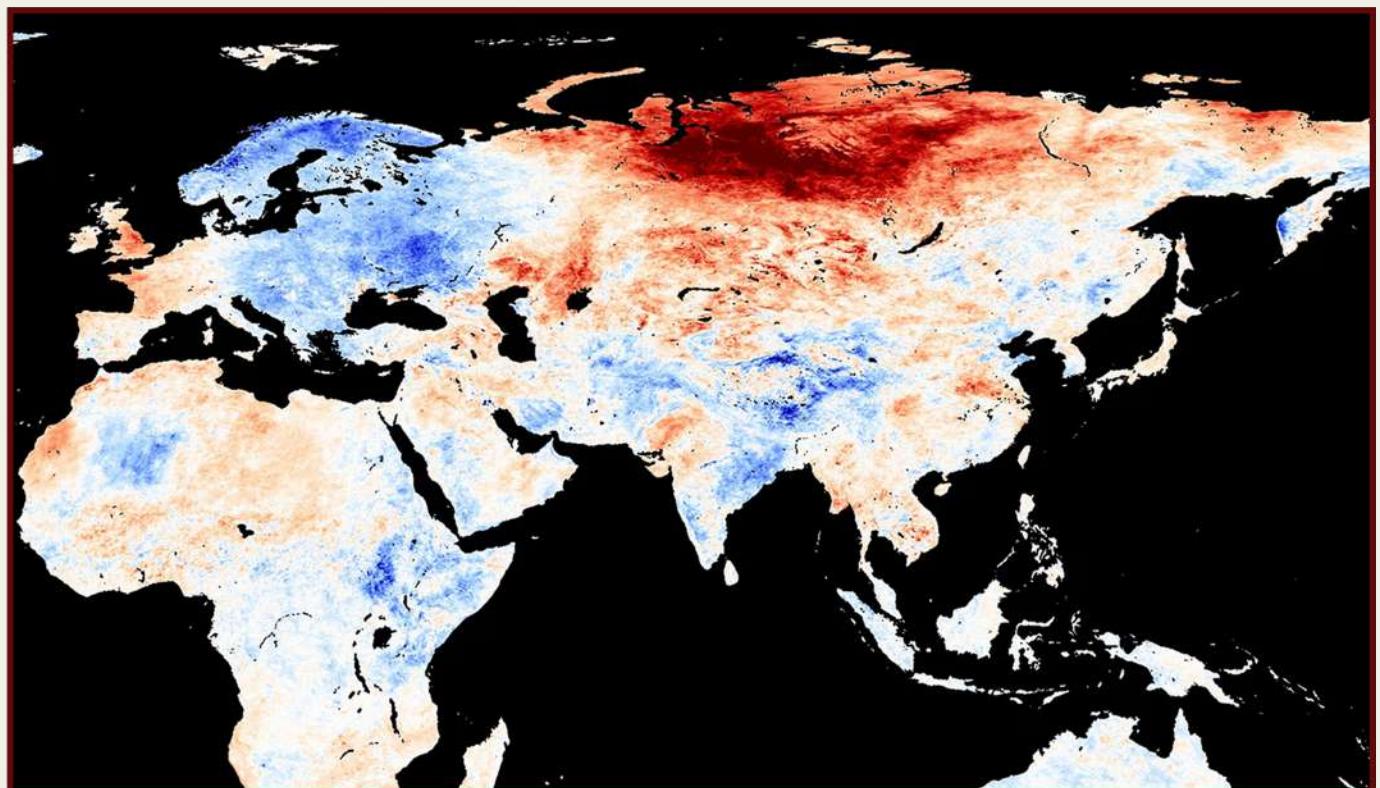


SOBRE LA AMENAZA

DE UNA ERUPCIÓN DE LA PLUMA MAGMÁTICA

EN SIBERIA Y ESTRATEGIAS PARA ABORDAR EL PROBLEMA



INFORME

SOBRE LA AMENAZA DE UNA ERUPCIÓN DE LA PLUMA MAGMÁTICA EN SIBERIA Y ESTRATEGIAS PARA ABORDAR EL PROBLEMA

CONTENIDO

Breve descripción del modelo geodinámico del cambio climático en la Tierra en el período actual	4
Desplazamiento del núcleo hacia Siberia en 1998	16
Siberia y el Ártico Siberiano se están calentando de 3 a 4 veces más rápido que el resto del mundo.....	21
Signos indirectos del ascenso de la pluma Siberiana.....	25
Derretimiento del permafrost.....	27
Manifestaciones del vulcanismo de lodo.....	29
Calentamiento del suelo.....	31
Temperatura del aire cerca de la superficie.....	32
Aumento de la cantidad de rayos	34
Agotamiento de la capa de ozono	36
Estructura, posibles dimensiones y localización de la pluma magmática según datos publicados y observacionales	38
Localización de la pluma magmática	44
Aumento de la actividad sísmica como signo de la desestabilización de las placas tectónicas	48
Evidencia de la inevitabilidad de la erupción de la pluma Siberiana	72
Escenario 1: Erupción repentina de la pluma Siberiana	73
Activación de supervolcanes y sistemas volcánicos	80
Lluvias ácidas	82
Invierno volcánico	83
Conclusiones sobre el Escenario 1: Erupción repentina de la pluma Siberiana	84
Escenario 2: Erupción gradual de la pluma Siberiana	85
Consecuencias de la ruptura gradual de la pluma Siberiana para Rusia	90
Consecuencias de la ruptura gradual de la pluma Siberiana para todo el mundo	91
Consecuencias a largo plazo de la erupción gradual de la pluma Siberiana para el planeta	92
Escenario 3: Desgasificación planificada y controlada	93
Técnicas existentes de geoingeniería volcánica	93
Ejemplo de un programa para de desgasificación planificada de la pluma Siberiana	100
Justificación de la elección del lugar para la perforación de pozos de investigación para el monitoreo de la dinámica de la pluma magmática actual de Siberia	102
Características de la perforación y bloqueo de los canales magnáticos durante la desgasificación planificada	105
Selección del momento óptimo para la perforación de pozos durante la desgasificación planificada.....	106
Escenarios de resultados de la desgasificación planificada de la pluma Siberiana.....	107
Conclusiones	109
Apéndice 1	110
Referencias	112

Breve descripción del modelo geodinámico del cambio climático en la Tierra en el período actual

Durante los últimos 30 años, la Tierra ha experimentado un aumento sin precedentes y sincronizado de cambios climáticos, anomalías y eventos extremos en todas las capas del planeta y sus parámetros geofísicos. La progresión de estos cambios se está acelerando de manera exponencial. Un análisis integral de los datos científicos muestra que las principales causas del aumento de anomalías en todas las capas de la Tierra son los ciclos astronómicos, que ocurren en todo el Sistema Solar cada 12 000 años.

La hipótesis sobre la influencia astronómica externa se confirma mediante la observación de anomalías climáticas, geodinámicas y magnéticas similares en otros planetas del Sistema Solar y sus satélites, que ocurren en el período actual de manera sincronizada con los cambios en la Tierra. Por ejemplo, se han registrado aumentos en la velocidad de los vientos y la expansión del tamaño de los huracanes en Urano, Júpiter y Venus. Mientras tanto, en Marte se ha observado el derretimiento

de los casquetes polares, junto con un aumento de la actividad volcánica tanto en Venus como en Marte. Además, la actividad sísmica en Marte se ha intensificado, lo que indica la aparición de procesos geodinámicos anómalos.

Los cambios críticos dentro de los sistemas de la Tierra debido al ciclo astronómico de 12 000 años comenzaron en el ciclo actual en 1995. Entre las anomalías geofísicas notables registradas en ese momento se incluyen una aceleración abrupta de la rotación terrestre (Fig. 1), un desplazamiento de su eje¹ (Fig. 2) y el inicio de una deriva pronunciada del Polo Magnético Norte² (Fig. 3). Estos fenómenos sugieren que se están produciendo cambios sustanciales dentro del núcleo de la Tierra.

¹Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L. y Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes [Deriva polar en la década de 1990 explicada por cambios en el almacenamiento de agua terrestre]. *Geophysical Research Letters*, 48(7).

<https://doi.org/10.1029/2020GL092114>

²Dyachenko, A. I. (2003). Earth's Magnetic Poles [Polos magnéticos de la Tierra]. MCCME.

Desviación en la duración del día

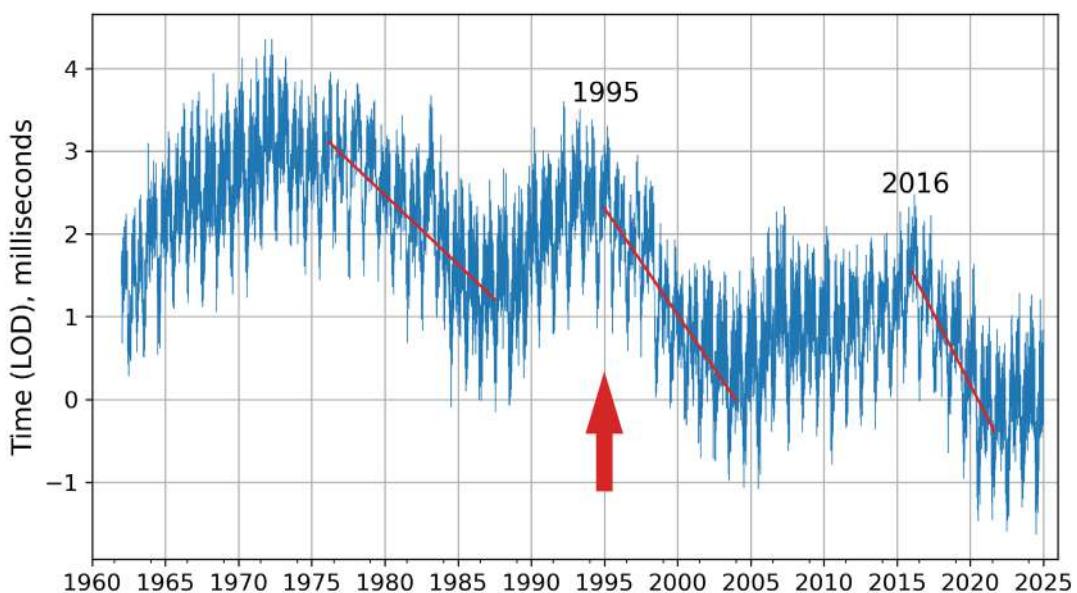


Fig. 1.

Desviación de la duración del día en milisegundos desde 1962 hasta 2023.

Fuente: Centro de Orientación de la Tierra del Observatorio de París (IERS)

Duración del día – Parámetros de orientación de la Tierra:

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

En la figura, las líneas rojas representan las líneas de tendencia que ilustran la velocidad a la que la duración del día está disminuyendo. Por ejemplo, la línea de tendencia de la izquierda es relativamente suave, mientras que la línea de tendencia de la derecha, que marca la aceleración desde 2016, es casi vertical. Esto indica que la duración del día está disminuyendo significativamente más rápido, lo que significa que la rotación del planeta se está acelerando.

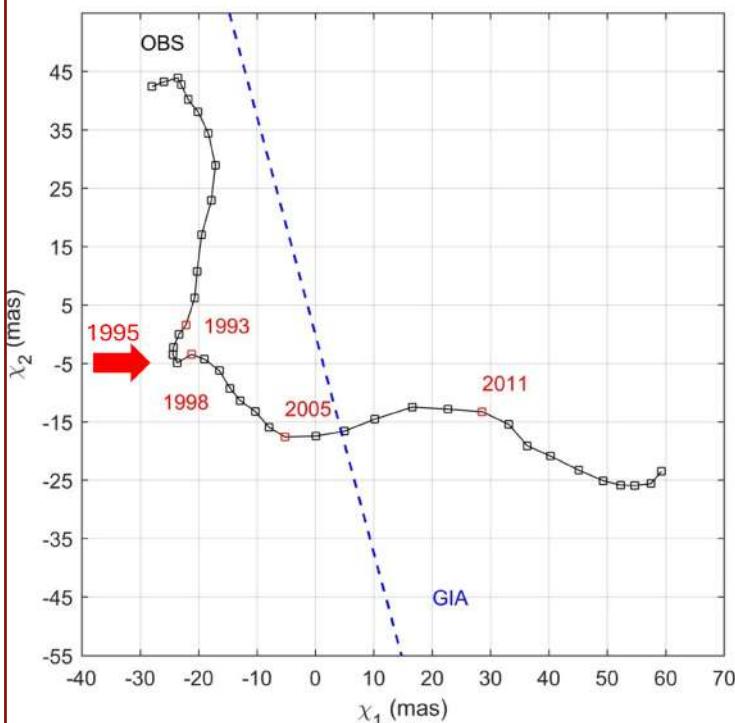
Fig. 2

Trayectoria a largo plazo de la excitación observada tras la eliminación de los ciclos anual y de Chandler mediante el método de media móvil.

Línea negra con cuadrados: trayectoria observada; línea azul discontinua: dirección de la deriva polar causada por el ajuste isostático glacial (GIA).

El tamaño del subconjunto de la media móvil se estableció en 84 meses, para los cuales el mínimo común múltiplo es 12 meses (ciclo anual) y 14 meses (ciclo de Chandler), según el estudio de Liu et al. (2017).

Fuente: Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L. y Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes [Deriva polar en la década de 1990 explicada por cambios en el almacenamiento de agua terrestre]. Geophysical Research Letters, 48(7). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>



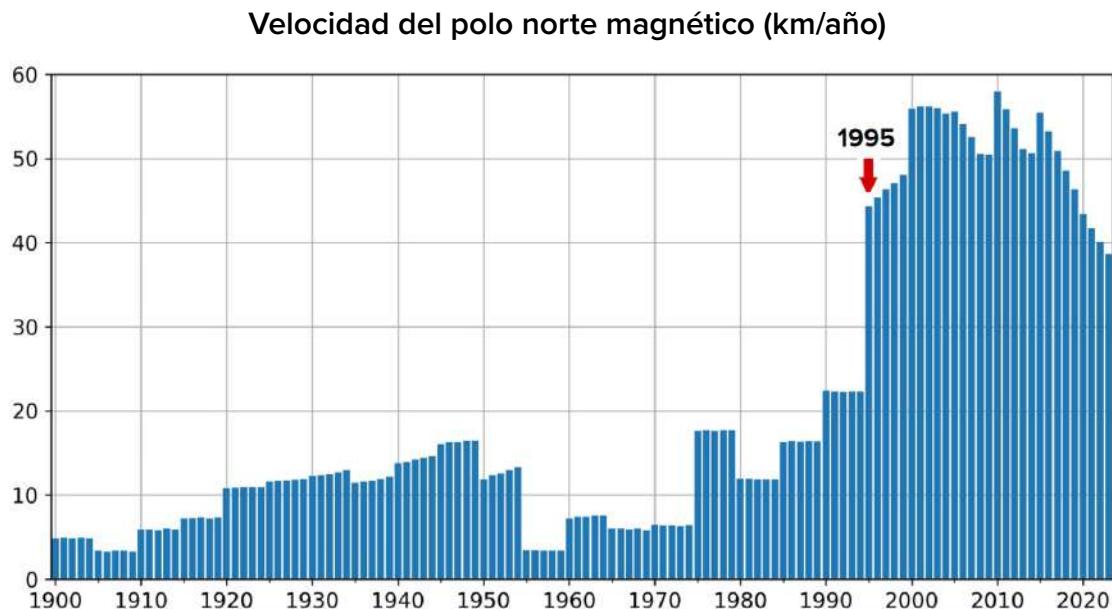


Fig. 3

Velocidad de la deriva del polo norte magnético (km/año)

Fuente: Datos de la NOAA sobre la posición del polo norte magnético

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

Según la hipótesis, en este momento, el Sistema Solar comenzó a entrar en una zona donde fuerzas cósmicas externas empezaron a ejercer una influencia significativa sobre los núcleos planetarios. Los cambios observados en el núcleo de la Tierra en 1995 sugieren un aumento en el calentamiento del núcleo externo, lo que implica que una cantidad adicional de energía comenzó a llegar al núcleo terrestre. Tales cambios profundos en el núcleo de la Tierra requieren aportes de energía cuatrillones de veces superiores a toda la energía jamás producida por la civilización humana a lo largo de su existencia.

El flujo de energía externa hacia el núcleo de la Tierra desencadenó procesos asociados con la fusión del manto y el ascenso del magma hacia la superficie. Esto, a su vez, inició una reacción en cadena de actividad sísmica y volcánica, un aumento del calor emanado desde el interior terrestre y un incremento de los desastres climáticos a nivel mundial.

Por ejemplo, desde 1995, se ha observado un aumento significativo en la actividad sísmica, caracterizado por una mayor frecuencia, magnitud y energía de los sismos. Esta tendencia afecta tanto a las regiones continentales como al fondo oceánico (Fig. 4), incluyendo áreas que anteriormente se consideraban sísmicamente inactivas, lo que indica la naturaleza global de estos cambios.

Es importante señalar que el aumento en el número de sismos con magnitud de 5,0 o superior no se debe a los avances en la tecnología de monitoreo sísmico (Fig. 5), sino que refleja cambios reales en el sistema geodinámico de la Tierra. Los datos acumulativos del Centro Internacional de Sismología confirman que el número de sismos ha aumentado sustancialmente en los últimos 25 años y continúa en ascenso (Fig. 6).

Aumento de los sismos en el fondo oceánico a lo largo de las dorsales mediooceánicas

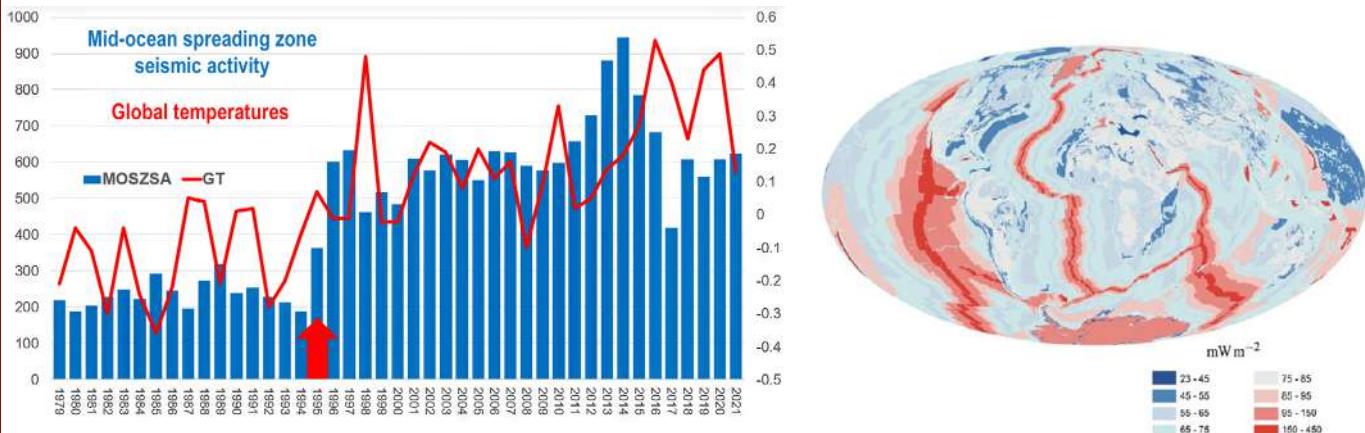


Fig. 4
Aumento simultáneo de los sismos en el fondo oceánico y de las temperaturas atmosféricas globales (izquierda) Calentamiento geotérmico de las dorsales mediooceánicas (derecha)

Fuente: Davies & Davies, 2010; Viterito, A. (2022). 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History [Un importante punto de inflexión en la historia reciente de la geofísica]. International Journal of

Environmental Sciences & Natural Resources, 29(5).

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

El diagrama ilustra un brusco aumento en el número de sismo en el fondo oceánico a lo largo de las dorsales mediooceánicas a partir de 1995, junto con una fuerte correlación entre la sismicidad del fondo oceánico y las temperaturas atmosféricas. Esto indica la presencia de una fuente de calor profunda adicional que está afectando tanto a los océanos como a la atmósfera.

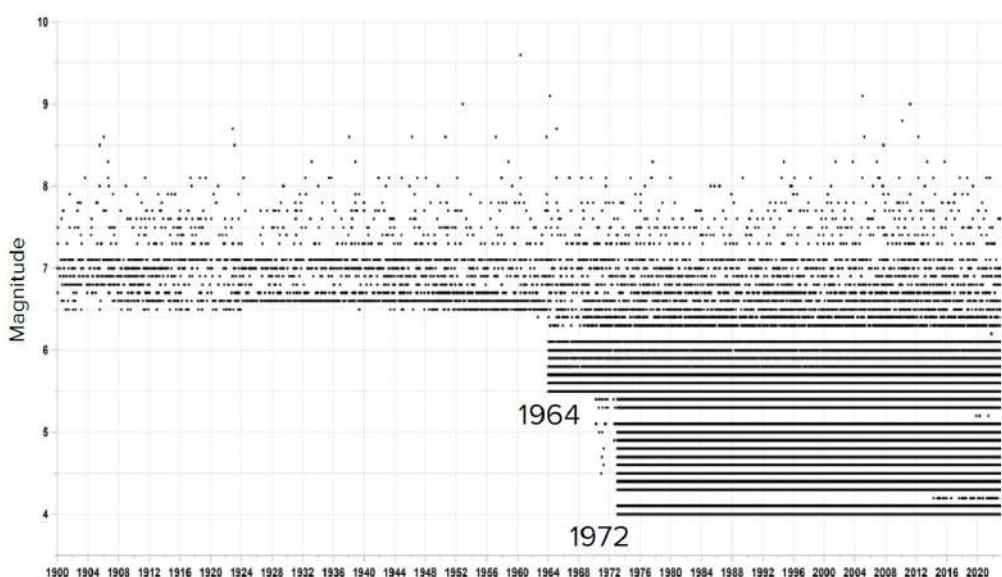


Fig. 5
Magnitudes de sismos registradas a lo largo del tiempo

Los puntos negros representan sismos de diversas magnitudes en diferentes años. Antes de 1964, solo se registraban sismos con magnitudes de 6,5 o superiores. A partir de 1964, con la introducción de sensores más sensibles, se empezaron a documentar sismos de magnitud 5,5 y superior. Desde 1972, los sismos de magnitud 4,0 o mayor han sido registrados de manera constante, independientemente de su ubicación.

Sismos M5+ 1979-2023, ISC

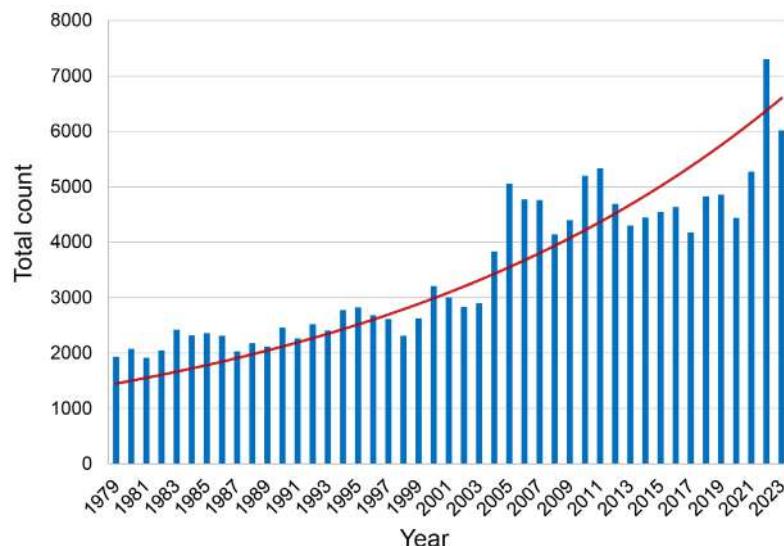


Fig. 6
Sismos de magnitud 5+ desde 1979 hasta 2023

El conjunto de datos fue compilado utilizando el algoritmo de magnitud máxima, seleccionando el valor de magnitud más alto registrado en la base de datos del ISC para cada evento (ver Apéndice 1).

Fuente: Base de datos del ISC

Además, la actividad sísmica cerca de volcanes está en aumento, incluyendo supervolcanes como Yellowstone (EE. UU.), Campi Flegrei (Italia), Taupo (Nueva Zelanda) y otros que entraron en erupción durante ciclos previos de 12 000 años. También está aumentando el número total de días de erupciones volcánicas, que va acompañado de erupciones anómalas. En estos eventos, la lava expulsada está sobre calentada y presenta una composición atípica, característica del magma proveniente de capas más profundas del manto^{3,4,5,6,7}.

Cabe destacar el creciente número de terremotos de foco profundo que se producen a profundidades superiores a 300 kilómetros, llegando en ocasiones hasta 750 kilómetros por

debajo de la superficie terrestre. Estos eventos no se originan en la corteza terrestre, sino en el manto, donde el material suele deformarse suavemente en lugar de fracturarse. Esto hace que la naturaleza de estos sismos sea altamente inusual.

Dadas las presiones y temperaturas extremas a estas profundidades, estos fenómenos pueden interpretarse como poderosas explosiones comparables en energía a la detonación simultánea de múltiples bombas atómicas dentro del manto terrestre. Además, los terremotos de foco profundo suelen desencadenar eventos sísmicos significativos en la corteza terrestre, amplificando su impacto destructivo^{8,9}.

³Castro, J. y Dingwell, D. (2009). Rapid ascent of rhyolitic magma at Chaitén volcano, Chile [Rápido ascenso del magma riolítico en el volcán Chaitén, 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 [Alta explosividad de la erupción del 21 de junio de 2019 del volcán Raikoke (Islas Kuriles Centrales): Restricciones mineralógicas y petrológicas de los materiales piroclásticos]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 418, 107346. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107346>

⁵Why the Tonga eruption will go down in the history of volcanology [Por qué la erupción de Tonga pasará a la historia de la vulcanología]. (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 [Rápido desplazamiento de una fuente magmática profunda en el volcán Fagradalsfjall, Islandia]. 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 [Rápido ascenso del magma bajo La Palma revelado por tomografía sísmica]. Scientific Reports, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>

⁸Mikhailova, R. S. (2014). Strong earthquakes in the mantle and their influence in the near and far zone [Fuertes terremotos en el manto y su influencia en la zona cercana y lejana]. Geophysical Survey RAS. <http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mikhailova.pdf>

⁹Mikhailova, R. S., Ulubieva, T. R. y Petrova, N. V. (2021). The Hindu Kush earthquake of October 26, 2015 with $Mw=7.5$, $I_o \sim 7$: Previous seismicity and aftershock sequence [El terremoto del Hindu Kush del 26 de octubre de 2015 con $Mw=7.5$, $I_o \sim 7$: Sismicidad previa y secuencia de réplicas]. Earthquakes in Northern Eurasia, 24(2015), 324-339. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.31>

Desde 1995, ha habido un rápido aumento exponencial del número de estos terremotos de foco profundo (Figs. 7, 8), coincidiendo con otras anomalías geodinámicas que comenzaron en el mismo período. El incremento de estas

explosiones dentro del manto indica un aumento de la energía en las profundidades de la Tierra y una intensificación de la fusión del manto, lo que podría desencadenar erupciones volcánicas a gran escala.

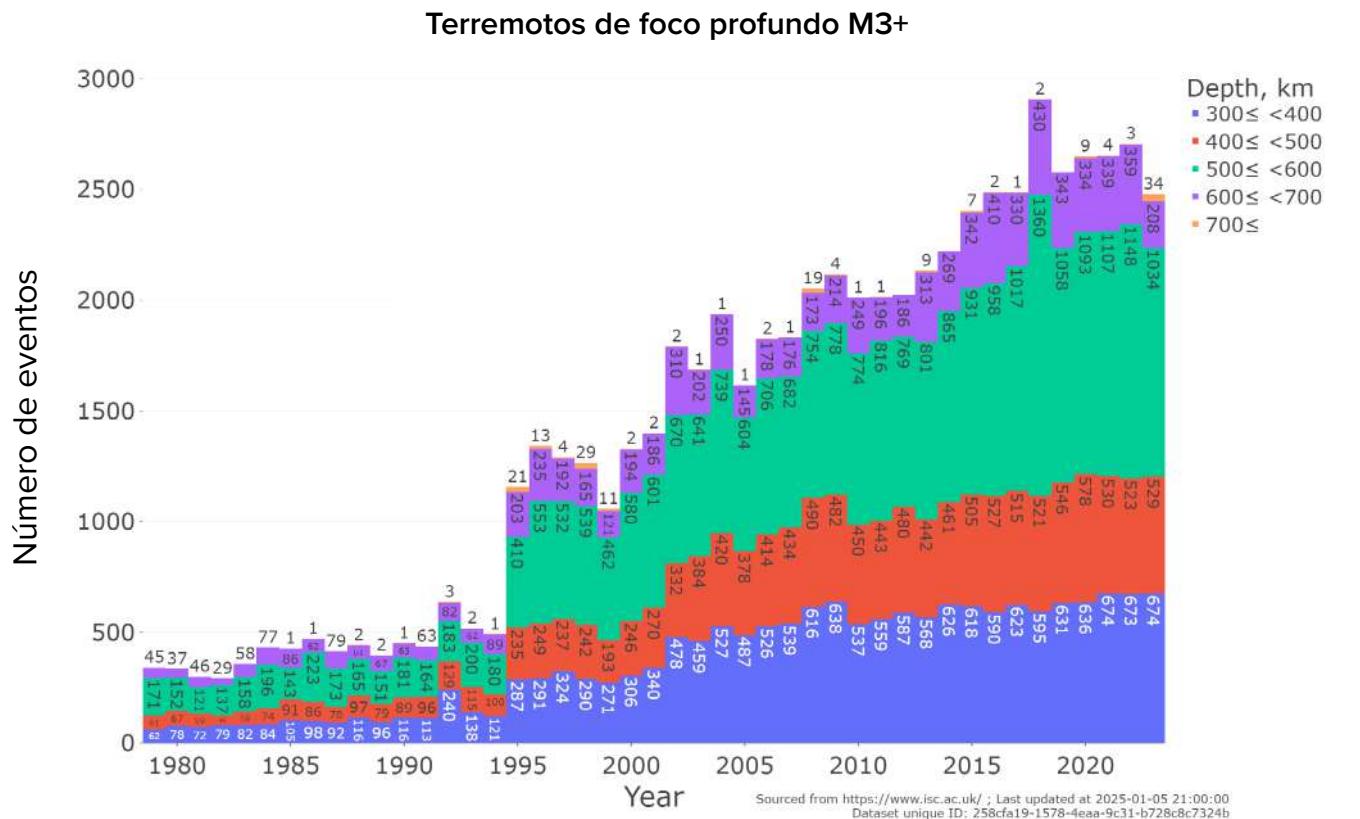


Fig. 7
Crecimiento exponencial del número de terremotos de foco profundo M3+ en todo el mundo desde 1979. El gráfico fue elaborado utilizando el algoritmo especial de magnitud mediana (ver Apéndice 1) con datos de la base de datos del ISC para cada evento.

Fuente: Base de datos del ISC

El gráfico ilustra la progresión geométrica del aumento de sismos a profundidades superiores a 300 kilómetros dentro del manto superior de la Tierra, una región tradicionalmente considerada maleable e incapaz de fracturarse. Se observa un aumento significativo a partir de 1995, coincidiendo con incrementos similares en muchas otras anomalías geodinámicas. El incremento en los terremotos de foco profundo no está relacionado con un aumento en la cantidad de sensores de monitoreo sísmico.

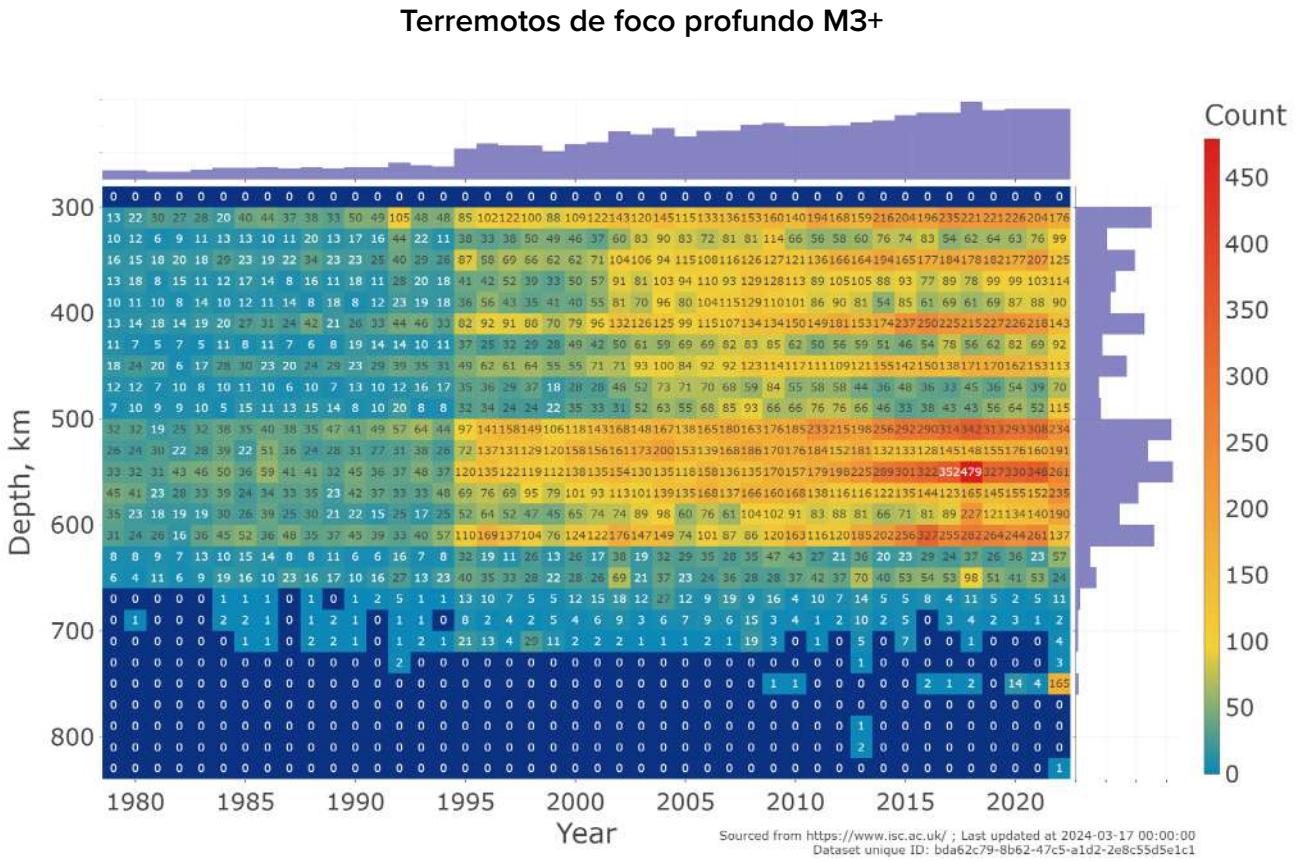


Fig. 8

Distribución de terremotos de foco profundo M3+ por año y profundidad

Fuente: Base de datos del ISC

El aumento de los terremotos de foco profundo indica la fusión del manto, que está siendo calentado por el núcleo. Debido a las fuerzas centrífugas, el magma fundido dentro del manto comienza a ascender bruscamente hacia la superficie terrestre. Este movimiento erosiona y calienta la litosfera desde el interior a un ritmo acelerado. El ascenso del magma es directamente responsable del aumento del flujo geotérmico desde el interior del planeta y de la activación de las plumas magmáticas bajo los glaciares de la Antártida Occidental y Groenlandia central. Este proceso acelera significativamente el derretimiento de los glaciares y el permafrost desde abajo hacia arriba.

Hoy en día, el océano se está calentando como

nunca antes, lo que intensifica significativamente eventos naturales extremos como inundaciones, huracanes y ciclones tropicales. El océano desempeña un papel crucial en la regulación del calor del planeta, ya que puede absorber y redistribuir el exceso de calor, evitando consecuencias catastróficas. Sin embargo, ahora que el calentamiento de la Tierra se está intensificando debido a la actividad geodinámica provocada por ciclos astronómicos, el océano ha perdido su capacidad de disipar el calor de las profundidades. Esto ha ocurrido debido a la contaminación oceánica causada por el ser humano. Los desechos plásticos se descomponen en micro y nanoplasticos, lo que reduce la conductividad térmica del agua (Fig. 9).

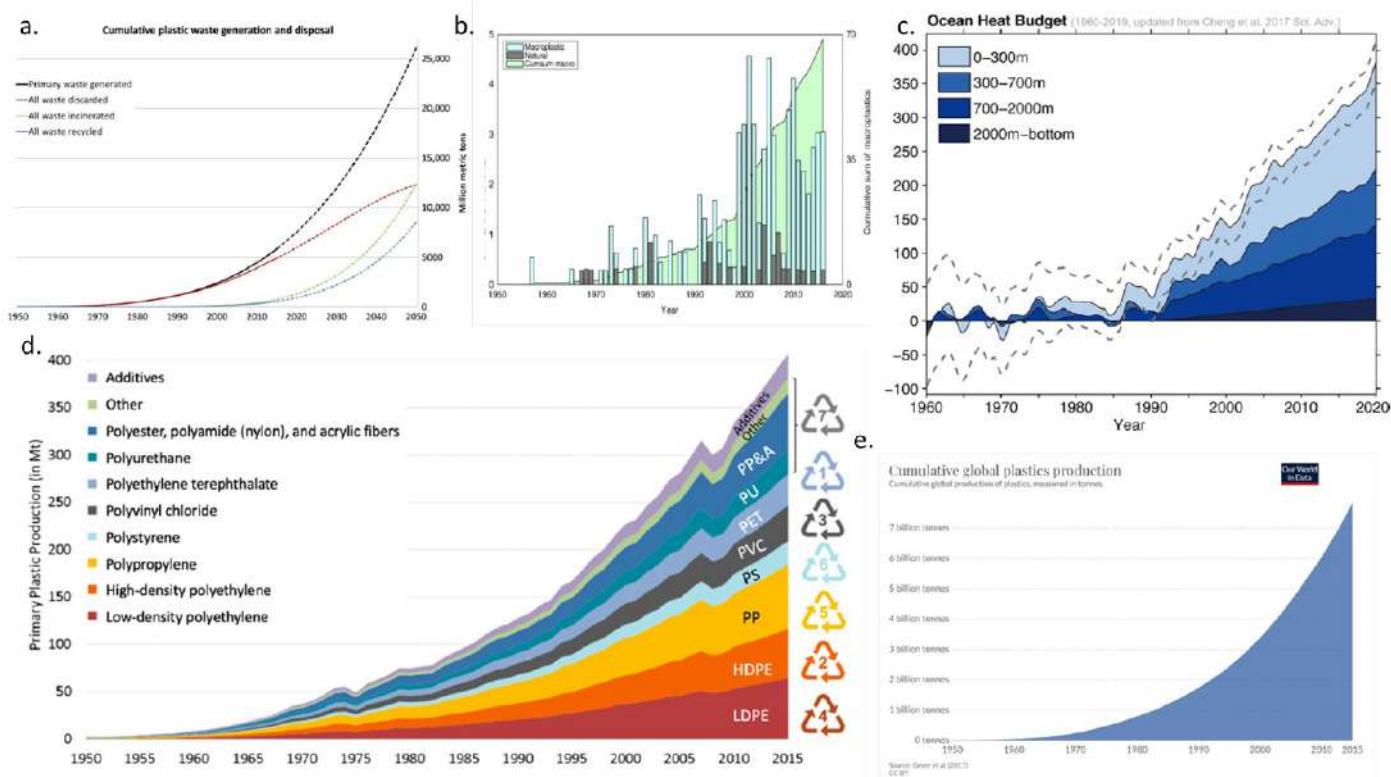


Fig. 9

Diagramas de los cambios en la temperatura del océano de 1960 a 2019 y su comparación con los diagramas del crecimiento en la producción de polímeros sintéticos, su uso en diversos sectores de la economía y la eliminación de desechos plásticos en el océano (de diversas fuentes).

a. Cantidad total de residuos de plástico producidos y reciclados

Fuente: Geyer, R., Jambeck, J. R. y Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made [Producción, uso y destino de todos los plásticos jamás fabricados]. *Science Advances*, 3(7).

<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

b. Cantidad total de microplásticos en el océano y totales anuales

Fuente: Ostle, C., Thompson, R. C., Broughton, D., Gregory, L., Wootton, M. y Johns, D. G. (2019). The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series [El aumento de los plásticos oceánicos evidenciado a partir de una serie temporal de 60 años]. *Nature Communications*, 10(1622)

<https://doi.org/10.1038/s41467-019-10950-6-1>

c. Cambio global de la temperatura oceánica de 1960 a 2019 (Purkey y Johnson, 2010; con una actualización de Cheng et al., 2017)

Fuente: 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. y Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019 [El calentamiento récord de los océanos continúa en 2019]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 137–142.

<https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

d. Producción mundial de plástico primario por tipo de polímero

Fuente: Geyer, R., Jambeck, J. R. y Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made [Producción, uso y destino de todos los plásticos jamás fabricados]. *Science Advances*, 3(7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

e. Cantidad total de plástico producida desde 1950

Fuente de datos: Plastic Marine Pollution Global Dataset

El aumento de la temperatura del agua ocurre no solo en la superficie, sino a lo largo de toda la profundidad del océano y en el fondo marino. El calentamiento del océano es causado por el ascenso del magma, que calienta especialmente la corteza oceánica, la cual es más delgada y vulnerable en comparación con la corteza continental.

Los datos históricos procedentes de núcleos geológicos y de hielo indican que la Tierra se ha enfrentado a ciclos catastróficos similares cada 12 000 años¹⁰. Cada 24 000 años, estas catástrofes planetarias han sido significativamente más intensas, como lo demuestran estudios sobre capas de ceniza volcánica en núcleos de hielo¹¹ (Fig. 10) y otras investigaciones geocronológicas. La Tierra está entrando ahora en este ciclo. Sin embargo, el ciclo actual se ve agravado por factores antropogénicos, como la contaminación oceánica, que ha reducido aún más la capacidad de los océanos para regular el balance energético del planeta.

A medida que los océanos se calientan, los desechos plásticos se descomponen en micro y nanoplásticos, lo que reduce aún más la conductividad térmica de los océanos. Esta pérdida de conductividad térmica es crítica durante períodos de intensa actividad

geodinámica impulsada por ciclos astronómicos. La acumulación de energía en exceso dentro del interior de la Tierra ha provocado un aumento del número de terremotos de foco profundo y la rápida formación de nuevas cámaras magmáticas, lo que intensifica la inestabilidad del planeta. Este ciclo cerrado acelera el calentamiento y la desestabilización del planeta, acercando a la Tierra a una inevitable destrucción.

La proyección matemática indica que los sistemas económicos y sociales globales podrían colapsar en los próximos 4–6 años debido al daño creciente causado por desastres climáticos. El aumento exponencial de eventos catastróficos amenaza con volver la Tierra inhabitable en la próxima década (Fig. 11). A diferencia de ciclos anteriores, el estado actual del planeta se ve agravado por la contaminación generada por la actividad humana, dejando pocas esperanzas para la supervivencia de los ecosistemas o de la Tierra misma. **Es importante entender que solucionar el problema de la contaminación y el calentamiento del océano puede ralentizar el desarrollo de los cataclismos, pero no detenerlos.**

¹⁰Arushanov, M. L. (2023). Climate dynamics: Space factors [Dinámica climática: Factores espaciales]. LAMBERT Academic Publishing.

¹¹Sawyer, D. E., Urgeles, R. y Lo Iacono, C. (2023). 50,000 yr of recurrent volcanoclastic megabed deposition in the Marsili Basin, Tyrrhenian Sea [50 000 años de deposición recurrente de megabases volcanoclasticos en la cuenca de Marsili, Mar Tirreno]. *Geology*, 51(11), 1001-1006. <https://doi.org/10.1130/G51198.1>

Erupciones volcánicas catastróficas que ocurren en un ciclo de 12 000 años

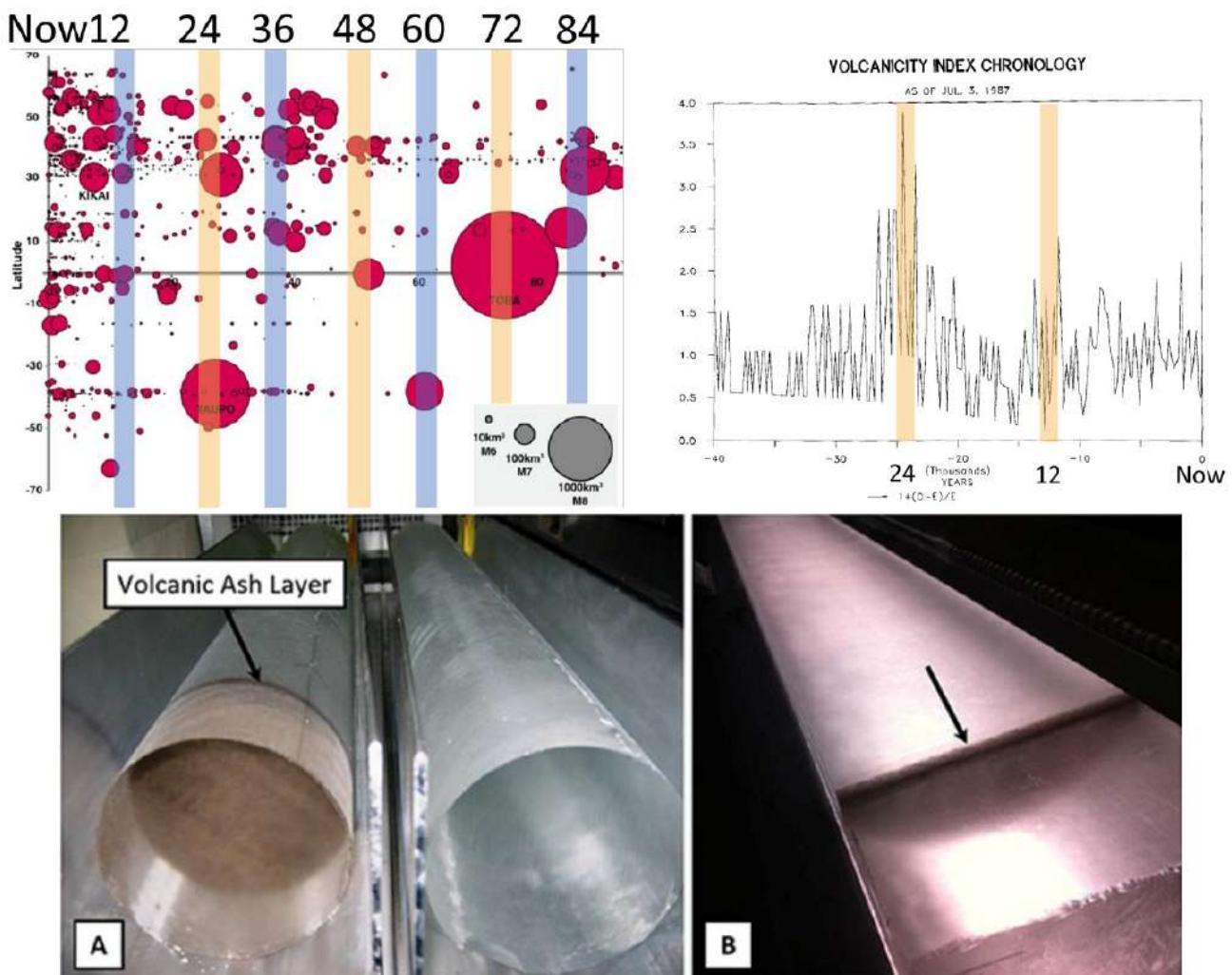


Fig. 10

Datos de investigación sobre capas de ceniza volcánica de erupciones ocurridas en los últimos 100 000 años en núcleos de hielo de la Antártida y el Ártico, compilados a partir de diversos estudios.

Fuente: 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. y Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database [Caracterización del registro de erupciones del Cuaternario: análisis de la base de datos de Erupciones Volcánicas Explosivas de Gran Magnitud (LaMEVE)]. 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 [Modulación volcánica del forzamiento climático de Milankovitch en el Cuaternario tardío]. Theoretical and Applied Climatology, 39, 115–125. <https://doi.org/10.1007/bf00868307>

Los gráficos ilustran que la actividad volcánica catastrófica ocurre cada 12 000 años, con eventos aún más intensos cada 24 000 años (considerando un margen de error en la datación). Estos episodios catastróficos han provocado fluctuaciones abruptas de temperatura, desastres naturales, inviernos volcánicos y extinciones masivas de especies. Muchos supervolcanes que entraron en erupción en ciclos previos han comenzado a mostrar actividad anómala en los últimos años, especialmente desde 1995.

Progresión de desastres crecientes, ilustrada por terremotos

M3+ Earthquakes Globally 1979-2024

volcanodiscovery.com

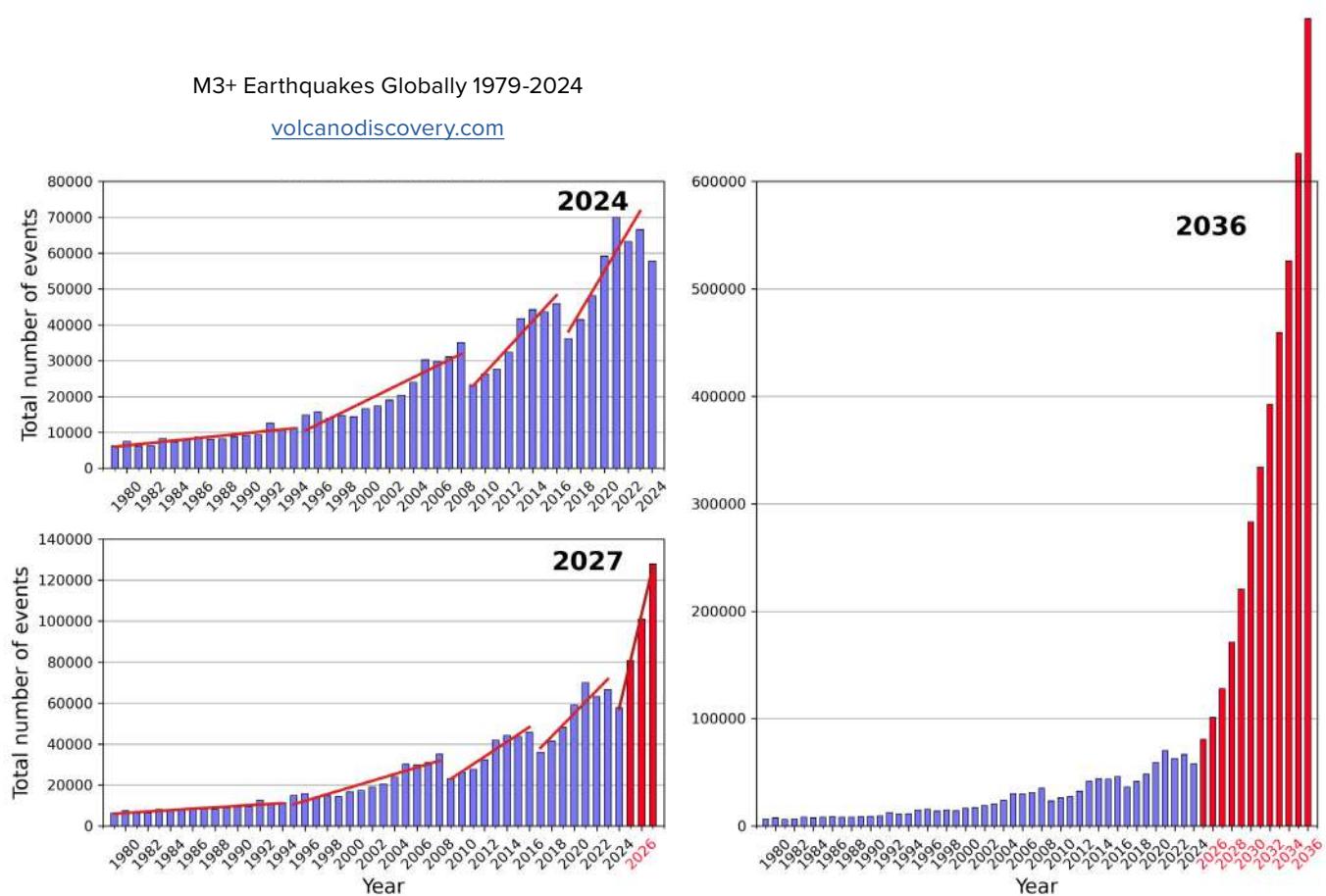


Fig. 11
Modelo del crecimiento exponencial del número de cataclismos naturales tomando como ejemplo los sismos hasta 2036

Los gráficos muestran la progresión geométrica en la frecuencia y magnitud de los sismos a nivel mundial, basada en las tendencias actuales. En cada etapa sucesiva, el número de sismos se triplica. Para 2028,

se proyecta que la Tierra experimentará 1000 sismos diarios con magnitudes superiores a 3,0, mientras que actualmente ya se registran 125 sismos de esta magnitud cada día.

Con alta probabilidad, en 6 años ocurrirán diariamente en la Tierra sismos cuya destructividad será equivalente al terremoto de Turquía y Siria del 6 de febrero de 2023.

Este informe aborda una amenaza adicional derivada de los cambios en el núcleo terrestre causados por un flujo de energía externa. En 1997-1998, los científicos, utilizando datos satelitales del estudio del centro de masas de la Tierra, registraron un fenómeno sin precedentes: un desplazamiento repentino del núcleo interno del planeta. Como resultado, el núcleo se desplazó hacia el norte, a lo largo de la línea que va desde la Antártida Occidental hasta Siberia Oriental y la península de Taimyr en la Federación de Rusia. Este desplazamiento del núcleo provocó un ascenso incontrolado de magma en esa dirección, lo que llevó al rápido ascenso de una gigantesca pluma magmática bajo Siberia.

En la actualidad, la pluma Siberiana ya ha alcanzado la base de la corteza terrestre en la región norte del Cratón de Siberia Oriental

y ha comenzado a elevar la placa. Esto indica que el magma incandescente ha empezado a abrirse camino hacia la superficie. Un avance incontrolado de la pluma Siberiana puede provocar una extinción global, dejando a la humanidad sin ninguna posibilidad de supervivencia. Según los cálculos, tal erupción sería 1000 veces más poderosa que la mayor erupción del supervolcán Yellowstone. Erupciones similares de una pluma magmática en Siberia ocurrieron hace 250 millones de años, causando la Gran Extinción del Pérmico.

Este informe presenta tres posibles escenarios para el desarrollo de esta situación y propone medidas para abordar el ascenso de la pluma Siberiana y mitigar los riesgos de su erupción incontrolada.

Desplazamiento del núcleo hacia Siberia en 1998

En 1997-1998, los científicos, utilizando datos satelitales del estudio del centro de masas de la Tierra, registraron un fenómeno sin precedentes: un desplazamiento del núcleo interno de la Tierra^{12,13}. Como resultado, el

núcleo del planeta se desplazó hacia el norte, a lo largo de la línea que va desde la Antártida Occidental hasta la Península de Taimyr, en el norte de Siberia Oriental (Fig. 12).

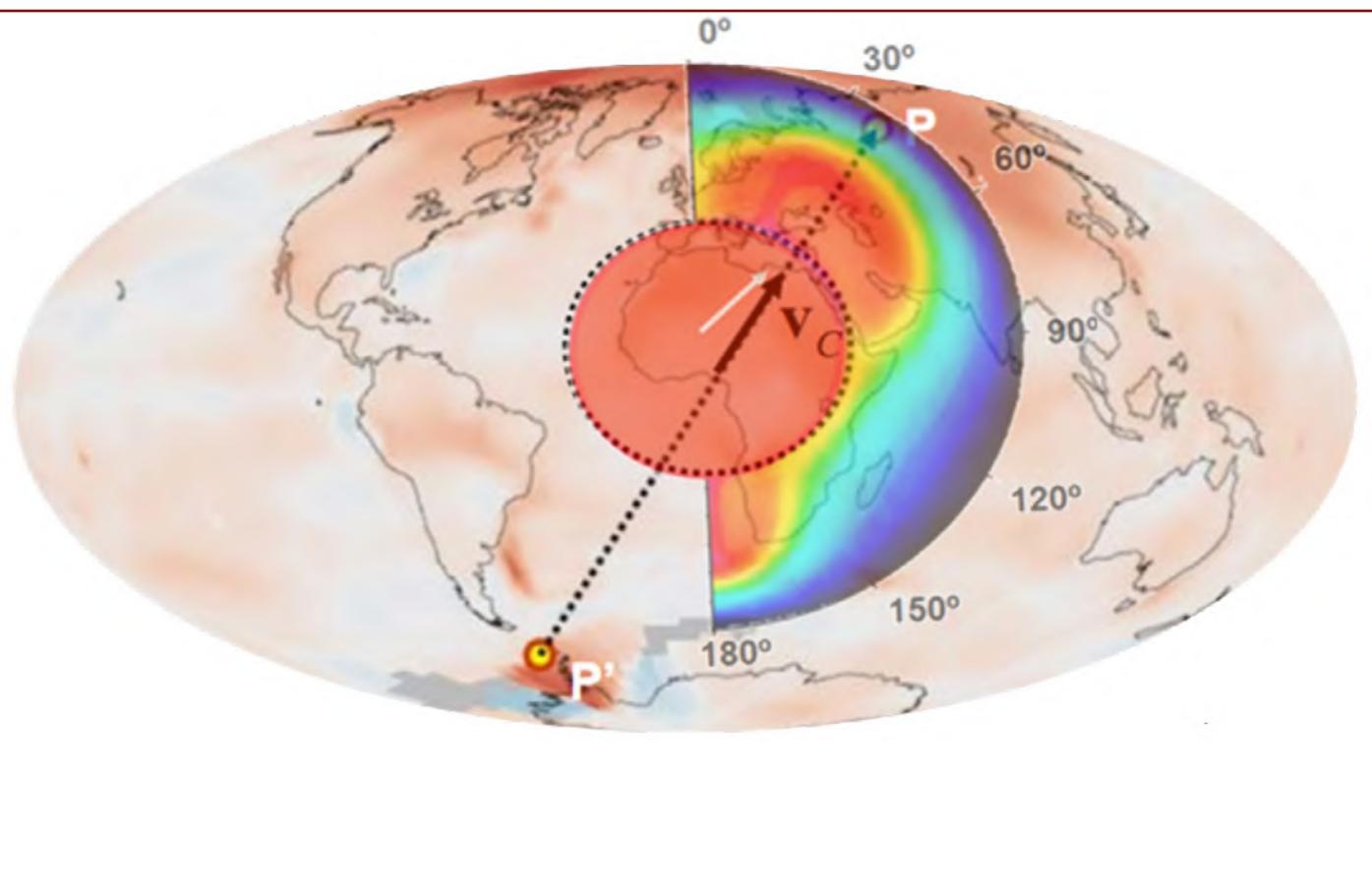


Fig. 12

Desplazamiento del núcleo en 1997-1998 y ondas térmicas en el magma causadas por el desplazamiento del núcleo. (Barkin, Yu. V.)

El mapa muestra el vector de desplazamiento del núcleo interno desde la Antártida Occidental hasta Siberia Oriental, en dirección a la Península de Taimyr. El esquema está superpuesto sobre un mapa de anomalías térmicas atmosféricas.

Fuente: Implicaciones geofísicas de los desplazamientos relativos y oscilaciones del núcleo y el manto terrestre. Presentación de Yu. V. Barkin, Moscú, IFZ, OMTS, 16 de septiembre de 2014.

¹² Barkin, Yu. V. (2011). Synchronous jumps in activity of natural planetary processes in 1997-1998 and their unified mechanism [Saltos sincrónicos en la actividad de los procesos planetarios naturales en 1997-1998 y su mecanismo unificado]. Geologiya morej i okeanov: Materialy XIX Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii po morskoj geologii [Geología de los mares y océanos: Actas de la XIX Conferencia Científica Internacional sobre Geología Marina], 5, 28-32.

¹³ Smolkov, G. Ya. (2018). Exposure of the solar system and the earth to external influences [Exposición del sistema solar y de la Tierra a influencias externas]. Physics & Astronomy International Journal, 2(4), 310-321. <https://doi.org/10.15406/paij.2018.02.00104>

Al mismo tiempo, cuatro equipos de investigación independientes registraron cambios anómalos en diversos parámetros geofísicos de la Tierra. Según los datos satelitales, un equipo de investigadores de la Universidad Estatal de Moscú y del Instituto de Física de la Tierra de la Academia de Ciencias de Rusia registró un desplazamiento del centro de masas de la Tierra en 1998¹⁴ (Fig. 13). Earth Rotation Service (IERS) recorded a sharp acceleration of the planet's rotation.

El Servicio de Rotación Terrestre (IERS) registró una aceleración abrupta en la rotación del planeta. Al mismo tiempo, en la estación Medicina, en Italia, los científicos registraron un desplazamiento repentino en la gravedad¹⁵. Simultáneamente,

se observó un cambio brusco en la forma de la Tierra¹⁶, registrado mediante un sistema de telemetría láser de satélites estadounidenses.

Según el Profesor Yuri Barkin, Doctor en Ciencias Físicas y Matemáticas, Profesor Gennadi Smolkov¹⁷, en Ciencias Técnicas, Profesor Mikhail Arushanov¹⁸, Doctor en Ciencias Geográficas, Victor Khain¹⁹, Doctor en Ciencias Geológicas y Mineralógicas, Académico de la Academia de Ciencias de Rusia y Profesor Honorario de la Universidad Estatal Lomonosov de Moscú, y muchos otros investigadores, el desplazamiento del núcleo provocó cambios en todas las capas de la Tierra.

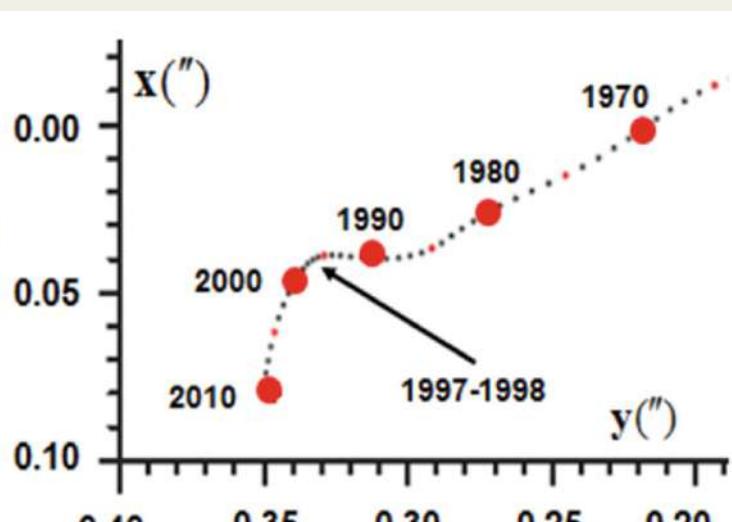
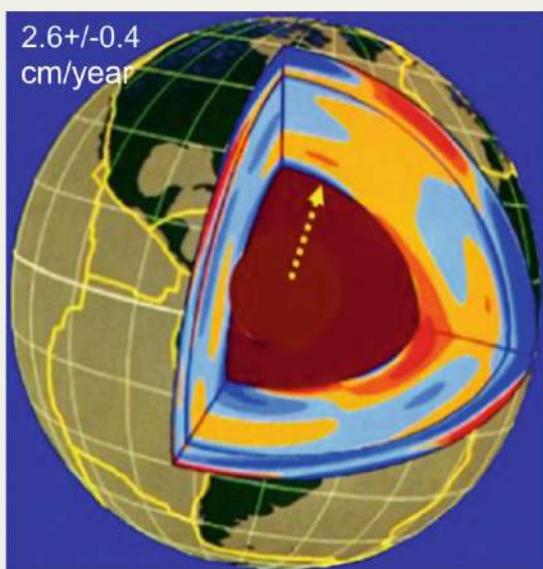


Fig 13

Estructura interna de la Tierra; dirección del desplazamiento secular del centro de masas terrestre y trayectoria de su polo a través de la superficie terrestre entre 1990 y 2010, con un giro de casi 90 grados en 1997-1998 hacia la Península de Taimyr

Fuente: Smolkov, G. Ya. (2020). Geliogeofizicheskie issledovaniya [Investigación heliogeofísica], 25, 14–29.

<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569> Fuente del gráfico: Barkin, Yu. V. y Klige, R. K. (2012)

¹⁴ Zotov, L. V., Barkin, Yu. V. y Lyubushin, A. A. (2009). Dvizhenie geocentra i ego geodinamika [Movimiento del geocentro y su geodinámica]. Trudy konferencii "Kosmicheskaya geodinamika i modelirovaniye global'nyh geodinamicheskikh processov" [Actas de la conferencia "Geodinámica espacial y modelización de procesos geodinámicos globales"], 98-101. Rama siberiana de la RAS.

¹⁵ Romagnoli, C., Zerbini, S., Lago, L., Richter, B., Simon, D., Domenichini, F., Elmí, C. y Ghirotti, M. (2003). Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations [Influencia de la consolidación del suelo y de los efectos de la expansión térmica en las variaciones de altura y gravedad]. 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. y Chao, B. F. (2002). Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998 [Detección de una redistribución de masas a gran escala en el sistema terrestre desde 1998]. Science, 297(5582), 831–833. <https://doi.org/10.1126/science.1072188>

¹⁷ Barkin, Yu. V. y Smolkov, G. Ya. (2013). Skachkoobraznye izmeneniya trendov geodinamicheskikh i geofizicheskikh yavlenij v 1997-1998 gg. [Cambios bruscos en las tendencias de los fenómenos geodinámicos y geofísicos en 1997-1998]. En Actas de la Conferencia Panrusa sobre Física Solar-Terrestre, dedicada al centenario del nacimiento del miembro correspondiente de la Academia de Ciencias de Rusia, V. E. Stepánov, Irkutsk, del 16 al 21 de septiembre.

¹⁸ Arushanov, M. L. (2023). Prichiny izmeneniya klimata Zemli kak rezul'tat kosmicheskogo vozdejstviya, razveivayushchie mif ob antropogennom global'nom poteplenii [Causes del cambio climático de la Tierra como resultado de la influencia cósmica, desmontando el mito del calentamiento global antropogénico]. Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft, 53, 4-14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979>

¹⁹ International Committee GGCE GEOCHANGE. (2010). Global environmental changes: Threat to civilization development [Cambios medioambientales globales: Amenaza para el desarrollo de la civilización], 1, Londres, ISSN 2218-5798

Es importante destacar que esta dirección de desplazamiento coincide con la deriva abrupta del Polo Magnético Norte, que comenzó en 1995. Desde principios del siglo pasado, el polo se movía a una velocidad media de 10 km/año, pero luego su velocidad aumentó repentinamente hasta un máximo de 57 km/año y cambió su trayectoria, dirigiéndose hacia Siberia y la Península de Taimyr²⁰ (Fig. 3, 14).

Esto indica que las condiciones para el desplazamiento del núcleo hacia la Península de Taimyr comenzaron a formarse ya en 1995, impulsadas por la licuefacción del núcleo externo líquido de la Tierra. En 2013, investigadores de la Universidad de Leeds determinaron que estos cambios en el campo magnético fueron causados por el flujo acelerado de hierro líquido en el núcleo externo de la Tierra²¹ (Fig. 15), el cual probablemente se inició en 1995.

Según los datos publicados, existe una correlación entre la frecuencia de las

inversiones del campo magnético y la intensidad del magmatismo del manto.^{22,23,24} Al mismo tiempo, se sabe que las inversiones del campo magnético probablemente están relacionadas con procesos que ocurren en el núcleo externo, cerca de la frontera núcleo-manto.²⁵ La correlación entre los cambios en la intensidad del magmatismo del manto y la frecuencia de las inversiones del campo magnético terrestre indica que las perturbaciones en el campo magnético ocurren en el núcleo externo, debido a cambios en la intensidad de la transferencia de calor en las bases de las plumas magnéticas ubicadas en la frontera núcleo-manto. El incremento de la potencia térmica total de las plumas se produce tanto por la formación de nuevas plumas como por el aumento de la potencia térmica de las plumas ya activas. Se puede suponer que las perturbaciones geodinámicas en el núcleo externo y el manto ocurren durante los períodos de emergencia de una pluma y su salida a la superficie.²⁶

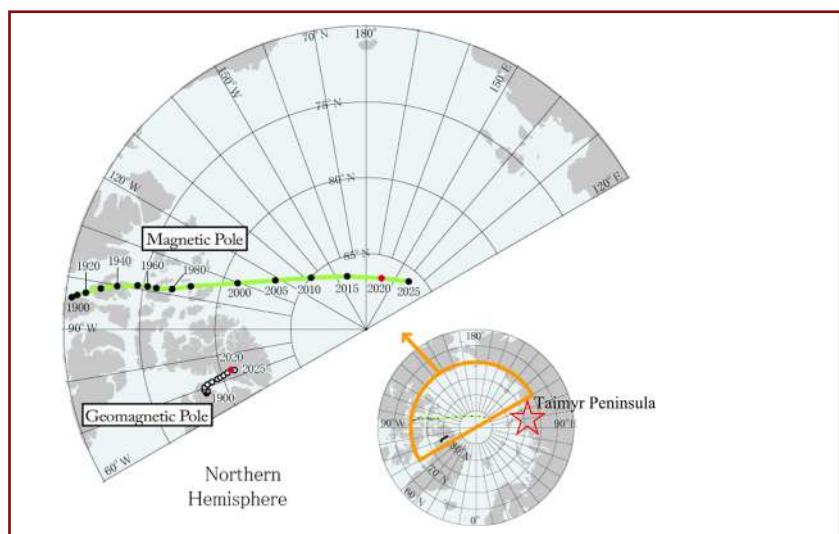


Fig. 14
Ubicación de los polos geomagnéticos y magnéticos, a partir de los datos del IGRF-13 desde 1900 hasta 2015 en intervalos de 5 años, y en 2020 (rojo) y 2025 (predicción).

Fuente: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto

²⁰Dyachenko, A. I. (2003). Magnitnye polyusa Zemli [Polos magnéticos de la Tierra]. MCCME.

²¹Livermore, P. W., Hollerbach, R. y Finlay, C. C. (2017). An accelerating high-latitude jet in Earth's core [Un chorro acelerado de alta latitud en el núcleo de la Tierra]. Nature Geoscience, 10, 62–68. <https://doi.org/10.1038/ngeo2859>

²²Mazaud, A. y Laj, C. (1991). The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test [La periodicidad de la inversión geomagnética de 15 m.a.: una prueba cuantitativa]. Earth and Planetary Science Letters, 107(3–4), 689–696. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90111-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T)

²³Larson, R. L. y Olson, P. (1991). Mantle plumes control magnetic reversal frequency [Las plumas del manto controlan la frecuencia de inversión magnética]. Earth and Planetary Science Letters, 107(3–4), 437–447. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(91\)90091-U](https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90091-U)

²⁴Zonenshain, L. P. y Kuzmin, M. I. (1993). Glubinnaya geodinamika Zemli [Geodinámica profunda de la Tierra]. Geologiya i geofizika, 34(4), 3–13.

²⁵Dobretsov, N. L., Kirdyashkin, A. G. y Kirdyashkin, A. A. (2001). Glubinnaya geodinamika [Geodinámica profunda]. Novosibirsk, Editorial de la Rama Siberiana de la Academia Rusa de Ciencias, Rama GEO, 408 p.

²⁶Kirdyashkin, A. A. y Kirdyashkin, A. G. (2013). Vzaimodejstvie termohimicheskogo plyuma s mantijnymi svobodno-konvektivnymi techeniyami i ego vliyanie na plavlenie i perekristallizaciyu mantii [Interacción de la pluma termoquímica con las corrientes de convección libre del manto y su influencia en la fusión y recristalización del manto]. Geologiya i geofizika, 54(5), 707–721.

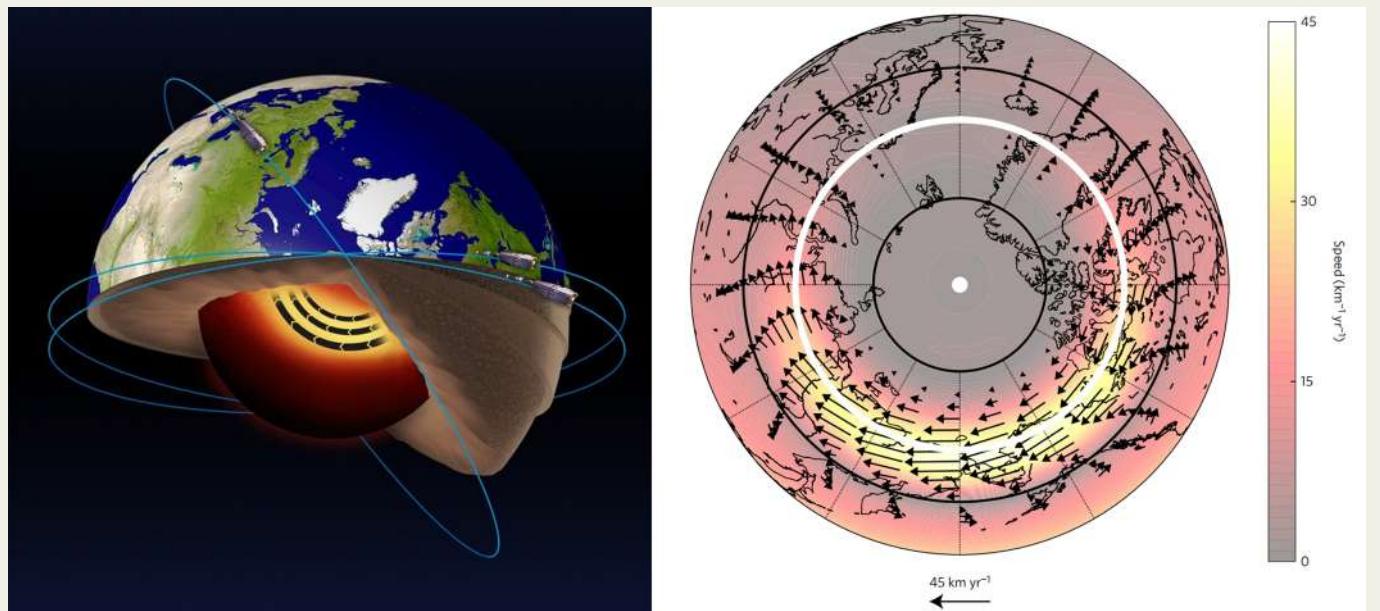


Fig. 15

Análisis de datos del satélite Swarm de la ESA ha revelado la presencia de una corriente en chorro en la parte de hierro líquido del núcleo terrestre a una profundidad de 3000 km bajo la superficie, y también que esta corriente en chorro se está acelerando.

Fuente: ESA

Livermore, P. W., Hollerbach, R. y Finlay, C. C. (2017). An accelerating high-latitude jet in Earth's core [Una corriente de alta latitud en aceleración en el núcleo de la Tierra]. *Nature Geoscience*, 10, 62–68.

<https://doi.org/10.1038/ngeo2859>

Por lo tanto, la deriva actual del Polo Magnético Norte hacia la Península de Taimyr podría ser una evidencia adicional de los cambios en el núcleo externo líquido de la Tierra y del ascenso brusco de una pluma magmática desde la frontera núcleo-manto bajo Siberia.

Así, como resultado de la influencia cósmica externa sobre el núcleo terrestre, en 1995, el núcleo interno comenzó a calentarse y el núcleo externo empezó a fundirse, lo que provocó una aceleración rápida de la deriva del Polo Magnético Norte. La licuefacción del núcleo externo creó las condiciones para el desplazamiento del núcleo hacia Siberia y la

Península de Taimyr en 1997-1998. Según la hipótesis propuesta por el Dr. Yuri V. Barkin, el desplazamiento del núcleo provocó una transferencia de calor asimétrica hacia Siberia (Fig. 16). Es crucial destacar que la transferencia de calor dentro del manto ocurre principalmente a través de la mezcla convectiva. Esto sugiere que el desplazamiento del núcleo fue el principal desencadenante del ascenso del magma hacia Siberia. Posteriormente, se comenzó a observar un calentamiento atmosférico anómalo en esta parte de Siberia, y este calentamiento sigue aumentando cada año.

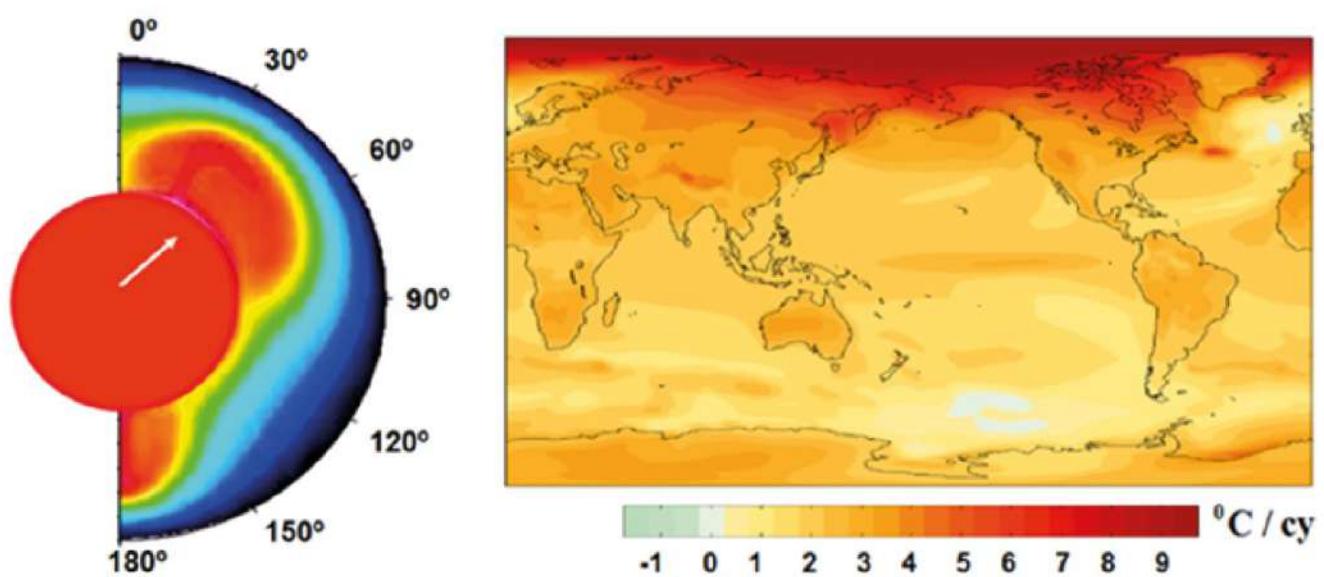


Fig. 16

Desplazamiento relativo forzado del núcleo y el manto, y esquema de suministro asimétrico de calor a las capas superiores del manto (izquierda). Tendencias lineales del calentamiento de la superficie (en °C por siglo), a partir de los datos del NCAR CCSM3, promediados según un escenario especial http://www.realclimate.org/bitz_fig3.png (derecha).

Fuente: Barkin, Yu. V. (2009). Ciklicheskie inversionnye izmenenija klimata v severnom i juzhnom polusharijah Zemli [Cambios climáticos cíclicos de carácter inverso en los hemisferios Norte y Sur de la Tierra]. Geologiya morej i okeanov: Materialy XVIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (Shkoly) po morskoj geologii [Geología de mares y océanos: Actas de la XVIII Conferencia Científica Internacional (Escuela) de Geología Marina], III, pp. 4-8.

Siberia y el Ártico Siberiano se están calentando 3-4 veces más rápido que el resto del mundo

Según diversas organizaciones, el territorio de Rusia, en particular la región del Ártico, está experimentando un calentamiento extremo.

De acuerdo con los datos proporcionados por los científicos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 2021, Rusia se está calentando tres veces más rápido que el resto del mundo, mientras que sus regiones Árticas y Siberianas se están calentando cuatro veces más rápido que el promedio global.

En 2022, Igor Shumakov, jefe de Roshydromet, citó datos de la Organización Meteorológica Mundial²⁷ indicando que el territorio de Rusia se está calentando 2,5 veces más rápido que el resto del planeta, siendo la región polar septentrional del país la que experimenta el aumento más

acelerado de temperatura, especialmente en las últimas décadas. Siberia es una de las regiones con mayor calentamiento a nivel global (Fig. 17), una tendencia sin precedentes en los últimos 7000 años, según reconstrucciones basadas en estudios dendroclimáticos²⁸.

El Centro de Investigación Climática Woodwell (WCRC) de EE. UU.²⁹ llevó a cabo un estudio a gran escala para evaluar cómo el cambio climático ha afectado parámetros clave como la temperatura, la humedad del suelo, el grosor de la capa de nieve, los niveles de precipitación y otros parámetros climáticos significativos en diversas regiones del Ártico. Para ello, los científicos combinaron y sistematizaron datos recopilados a través de satélites, aviones, drones y estaciones meteorológicas terrestres durante los últimos 40 años.

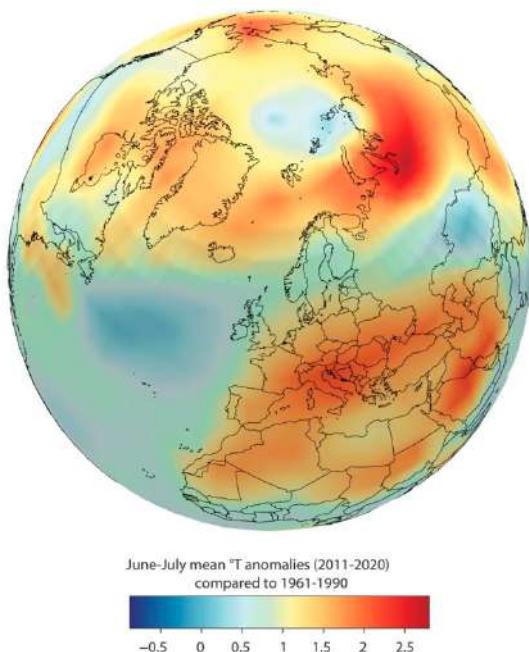


Fig. 17

Anomalías de temperaturas medias en junio-julio para el hemisferio norte (Penínsulas de Yamal y Taimyr) durante la última década de observaciones (2011–2020). Las temperaturas se expresan como anomalías en relación con el clima de referencia de 1961–1990, utilizando el conjunto de datos HadCRUT.5.

Fuente: Hantemirov, R. M., Corona, C., Guillet, S., et al. (2022). Current Siberian heating is unprecedented during the past seven millennia [El actual calentamiento de Siberia no tiene precedentes en los últimos siete milenios]. *Nature Communications*, 13, 4968. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x>

²⁷TASS. (Enero de 2024). Territoriya Rossii tepleet v 2,5 raza bystree ostal'noj planety [El territorio ruso se calienta 2,5 veces más rápido que el resto del planeta]. Agencia rusa de noticias 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 [El actual calentamiento de Siberia no tiene precedentes en los últimos siete milenios]. *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 [Puntos calientes regionales de cambio en latitudes altas septentrionales a partir de observaciones espaciales]. *Geophysical Research Letters*, 52, e2023GL108081. <https://doi.org/10.1029/2023GL108081>

El análisis de estos datos permitió a los investigadores identificar unas dos docenas de puntos críticos climáticos. El calentamiento más intenso ha afectado las regiones polares y centrales de Siberia Oriental, donde las temperaturas anuales medias aumentaron 1,1 °C cada década, lo que es varias veces superior a la tasa de calentamiento global. El aumento de temperatura ha sido aún mayor en la Península de Taimyr, alcanzando 1,7 °C por década. Asimismo, en la taiga siberiana, las temperaturas han aumentado a un ritmo de 0,6 °C por década desde finales de la década de 1980.

Las olas de calor en Siberia han alcanzado nuevos niveles alarmantes en los últimos años, especialmente en 2020, cuando las temperaturas

aumentaron bruscamente en toda la región (Fig. 18).

Las temperaturas en Siberia fueron de más de 5 °C por encima del promedio de enero a junio, con anomalías que alcanzaron hasta 10 °C por encima del promedio en junio (en relación con el período base 1981–2010). Este período excepcionalmente caluroso batió récords locales de temperatura, incluyendo la estación meteorológica de Verjoyansk, que registró un máximo histórico de +38 °C el 20 de junio (Fig. 19). El servicio meteorológico ruso declaró que esta temperatura es la más alta jamás registrada por encima del Círculo Polar Ártico.

Anomalía de la temperatura del aire en la superficie, 2020
Período de referencia: 1981-2010

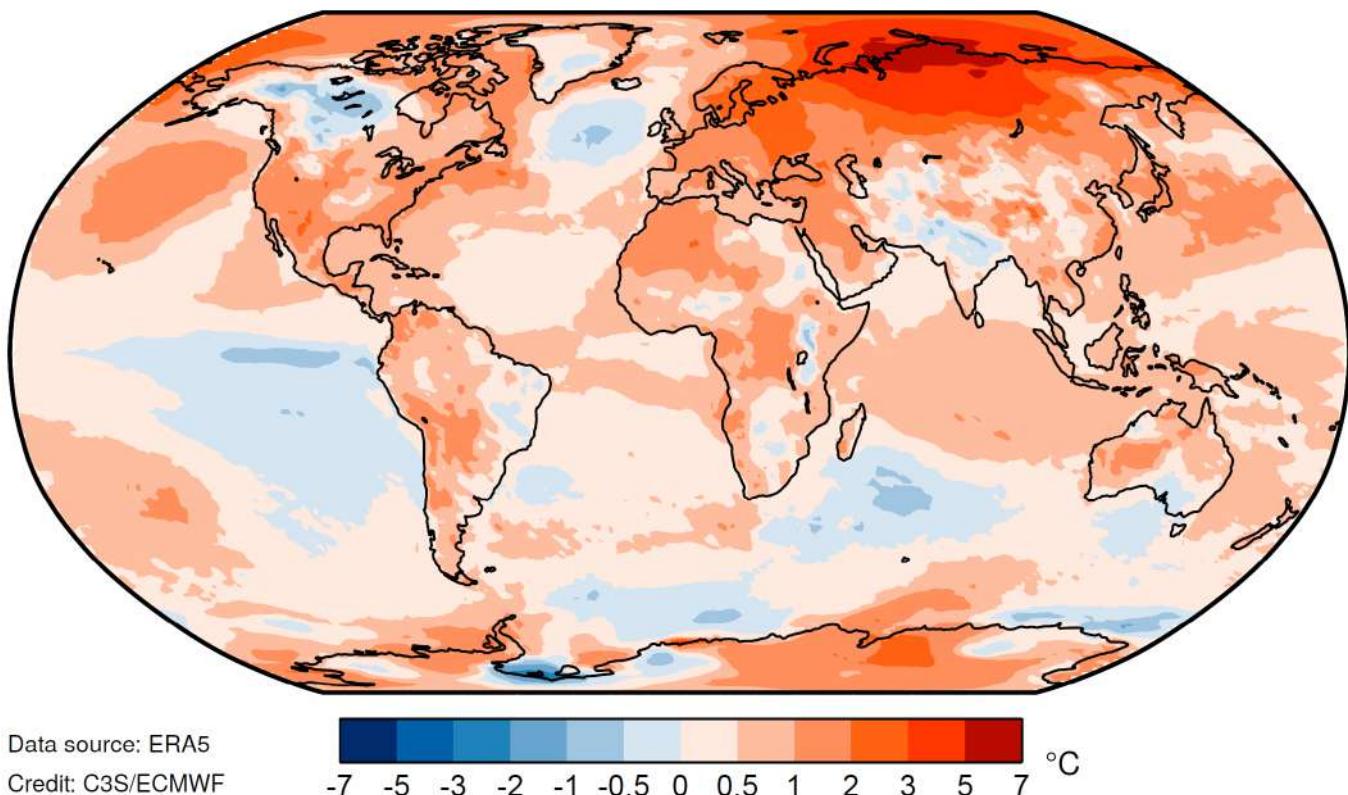


Fig. 18

Desviación de las temperaturas de 2020 con respecto al promedio de 1981-2010

Fuente: Servicio de Cambio Climático de Copernicus en el Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF)

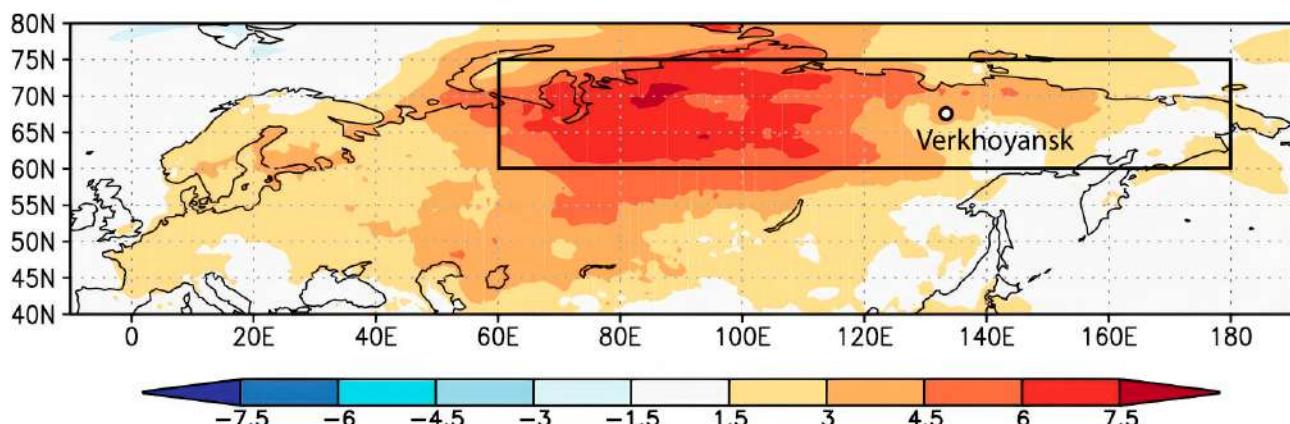


Fig. 19

Ola de calor prolongada en Siberia: temperaturas medias de enero a junio de 2020 en comparación con la norma (1981–2010) en la región siberiana, y ubicación de Verjovansk, donde se registró la temperatura récord de +38 °C por encima del Círculo Polar Ártico en junio.

Fuente: Ciavarella, A., Cotterill, D., Stott, P., et al. (2021). Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence [El prolongado calor siberiano de 2020 es casi imposible sin la influencia humana]. *Climatic Change*, 166, 9. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>

Estas olas de calor no persisten de manera continua en Siberia, sino que ocurren en un patrón pulsante, ya que las intrusiones de magma que las causan tienen un comportamiento ondulatorio. En la atmósfera, donde las masas de aire se mueven y se mezclan libremente, las olas de calor pueden disiparse en pocos meses, como ocurrió en 2020, a diferencia de las olas de calor en los entornos acuáticos.

Según una investigación de 2022, el Ártico Siberiano se está calentando casi cuatro veces más rápido que el promedio global, una proporción superior a la que se había considerado previamente en los modelos climáticos y que ha

sorprendido a los científicos³⁰ (Fig. 20).

Cabe destacar que este calentamiento del Ártico ocurre precisamente en la región de la Península de Taimyr. Esta anomalía en la zona oceánica de Siberia puede explicarse por la corteza oceánica más delgada, que conduce el calor de manera más eficiente, y la mayor capacidad calorífica del agua en comparación con la atmósfera. El agua del océano, por lo tanto, absorbe y retiene intensamente el calor proveniente del magma ascendente, aunque la pluma está subiendo por debajo de la corteza continental a una distancia relativa de la línea costera.

³⁰Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T. y Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 [El Ártico se ha calentado casi cuatro veces más rápido que el globo desde 1979]. *Communications Earth & Environment*, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

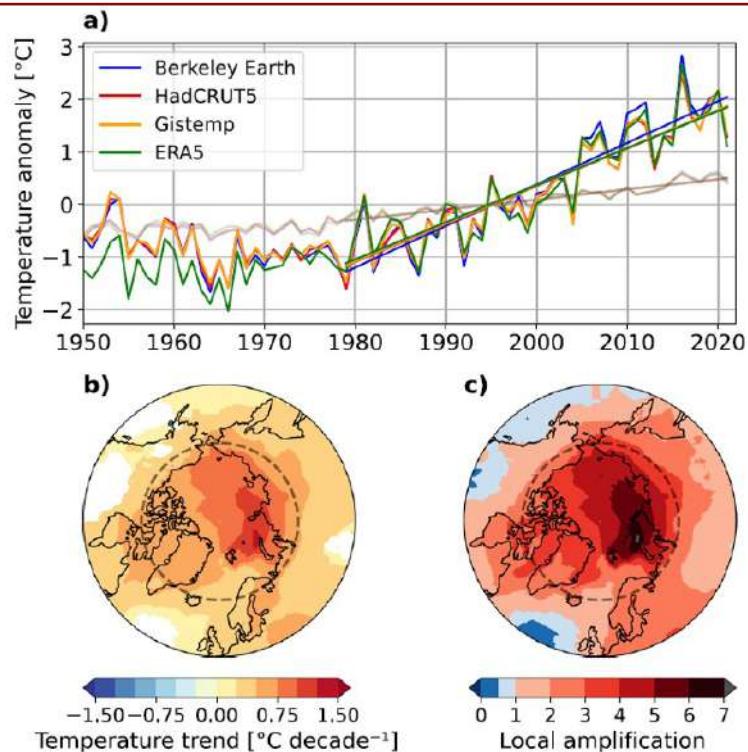


Fig. 20

Evolución de la temperatura media anual en el Ártico. a) Anomalías de temperatura media anual en el Ártico (66.5–90°N) (colores oscuros) y a nivel global (colores claros) durante 1950–2021 derivadas de varios conjuntos de datos de observación. Las anomalías de temperatura se han calculado en relación con el período estándar de 30 años de 1981–2010. La línea discontinua en (b) y (c) representa el Círculo Polar Ártico (latitud 66.5°N).

Fuente: Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T. y Laaksonen, A. (2022). El Ártico se ha calentado casi cuatro veces más rápido que el mundo desde 1979 [El Ártico se ha calentado casi cuatro veces más rápido que el globo desde 1979]. Communications Earth & Environment, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

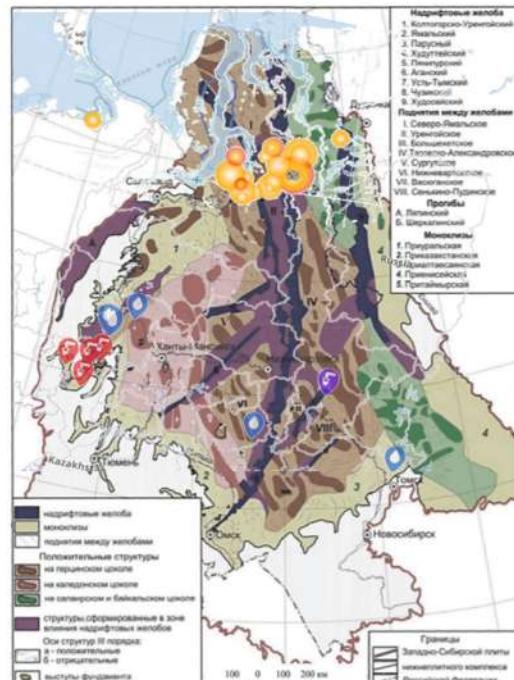
Signos indirectos del ascenso de la pluma Siberiana

La intrusión de la pluma magmática en la corteza terrestre debajo de Siberia está causando no solo un calentamiento atmosférico, sino también una serie de otras anomalías: el permafrost se está derritiendo de abajo hacia arriba; la actividad sísmica en la región está aumentando; el agua caliente está ascendiendo hacia la superficie, lo que provoca que el agua en los pozos hierva, y se han desatado incendios forestales sin precedentes en toda

Siberia, incluidos bajo la nieve. La máxima localización de incendios forestales bajo nieve ha comenzado a manifestarse en los últimos años en el sur de las penínsulas de Taimyr, Yamal y Guida en la región polar. Un factor importante es que los incendios forestales bajo nieve (“incendios zombis”) y el agua hirviendo en pozos ocurren sobre las áreas de fallas profundas (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

Mapa que muestra la localización de los incendios forestales invernales bajo la nieve por encima del Círculo Ártico en 2021



Fotografías de incendios bajo la nieve en la región de Sverdlovsk

En las latitudes del norte, las emisiones de metano e hidrógeno del subsuelo están aumentando, el número de cráteres por explosiones de gas natural está creciendo y el vulcanismo de barro se está intensificando en la plataforma Ártica. El calentamiento desde abajo causa la degradación del permafrost y la destrucción de los hidratos de gas, lo que lleva

a la liberación de gases, cráteres de explosión y un aumento del vulcanismo de barro. El gas liberado desde el interior del planeta afecta el estado de la atmósfera, causando anomalías térmicas, geoquímicas y electromagnéticas adicionales. Vamos a considerar estos procesos con más detalle.

Deshielo del permafrost

Otro indicador de un calor geotérmico adicional proveniente de la pluma del manto es el estado del permafrost. Los autores del informe analizaron datos sobre la profundidad del deshielo estacional del permafrost en Rusia desde 1994 hasta 2023. La base de datos se elaboró a partir de mediciones realizadas en el marco del programa de Monitoreo Circumpolar de la Capa Activa (CALM), que observa la respuesta de la capa activa y del permafrost cercano a la superficie. La base de datos está disponible en el sitio web permafrost.su.

Actualmente, en Rusia hay 58 sitios que monitorean el permafrost mediante una

metodología estandarizada, y 46 de ellos han estado realizando mediciones durante más de 10 años, lo que permite identificar tendencias a largo plazo. El análisis del conjunto de datos permitió a los investigadores identificar sitios donde existe una tendencia constante al aumento de la profundidad del deshielo, lo que indica un calentamiento adicional en esta área.

Se identificaron dos grupos de datos: sitios con una tendencia más pronunciada de aumento del deshielo a profundidades de entre 40 cm y 200 cm (Fig. 22, a), y sitios con una tasa de deshielo del permafrost menos intensa, a profundidades de entre 40 cm y 140 cm (Fig. 22, b).

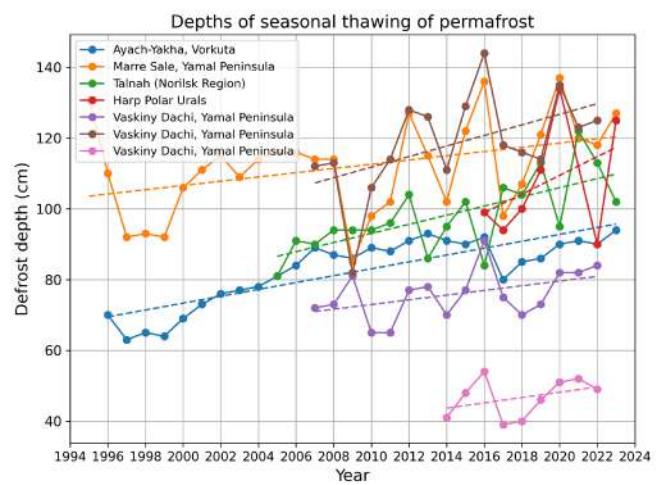
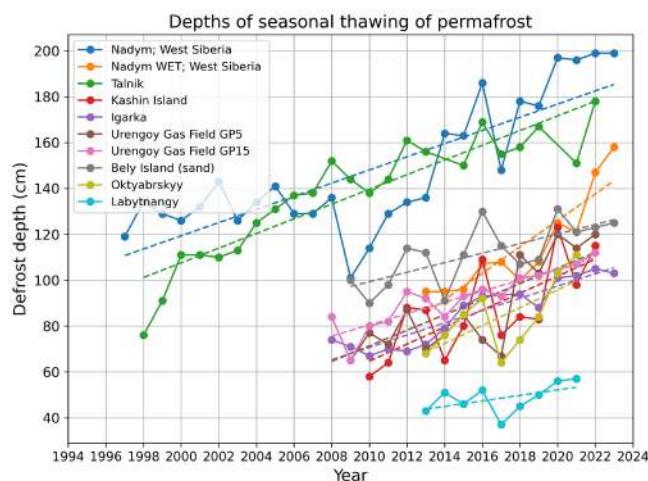


Fig. 22

Cambio en las profundidades del deshielo estacional del permafrost en varias regiones con diferente intensidad: a) con un aumento más pronunciado en las profundidades del deshielo; b) con un aumento menos pronunciado en las profundidades del deshielo.

Fuente de datos: <https://permafrost.su>

Las mediciones se llevan a cabo en el marco del programa de Monitoreo Circumpolar de la Capa Activa (CALM): <https://www2.gwu.edu/~calm>

Para mayor claridad, todos los puntos monitoreados fueron mapeados y marcados en naranja y amarillo, respectivamente (Fig. 23). Es importante destacar que estos puntos están principalmente concentrados en una región específica: en el norte de Siberia Occidental, en la península de Yamal y al sur de las penínsulas de Guida y Taimyr.

Esta localización de las áreas con el máximo deshielo del permafrost corresponde a la zona con velocidades de las ondas sísmicas reducidas en el manto, dentro de la supuesta zona de propagación de la cabeza de la pluma magmática. Esto, a su vez, es la causa del aumento de las temperaturas del suelo, incluso dentro de la capa congelada.

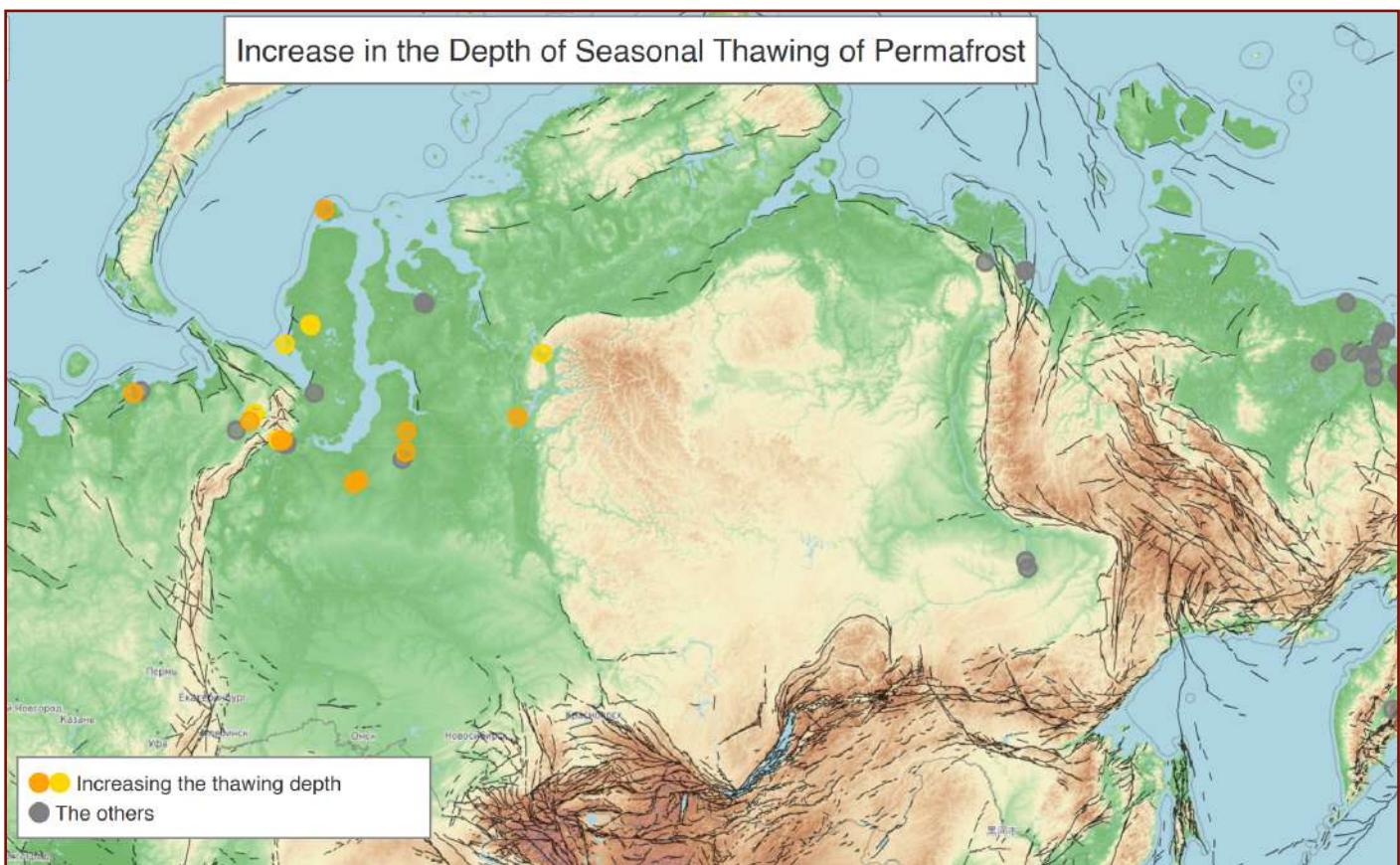


Fig. 23

Lugares con aumento en la profundidad del deshielo estacional del permafrost. Los sitios de medición están marcados con puntos: gris: lugares sin un aumento notable en el deshielo estacional; amarillo: lugares donde la profundidad del deshielo está aumentando.

Fuente de datos: <https://permafrost.su>

Las mediciones se llevan a cabo en el marco del programa de Monitoreo Circumpolar de la Capa Activa (CALM): <https://www2.gwu.edu/~calm>

Manifestaciones del vulcanismo de lodo

El calentamiento adicional provocado por el ascenso del magma ocasiona la degradación del permafrost y afecta los hidratos de gas preservados en los suelos, liberando grandes volúmenes de gases contenidos en ellos. Además, el gas migra desde los yacimientos de gas y las aguas de formación altamente saturadas de gas, lo que reduce las propiedades elásticas y de resistencia de los suelos, favorece la licuefacción de las arcillas y puede dar lugar a procesos de vulcanismo de lodo. El vulcanismo de lodo es un proceso geológico en el que una mezcla de gas, agua y material clástico es expulsada a través de

grietas en la corteza terrestre bajo la influencia de la presión geostática interna.

Estos procesos han sido descubiertos por investigadores de la Academia de Ciencias de Rusia (RAS) en la península ártica de Yamal.³¹ Como resultado de un complejo de estudios geológicos y geofísicos, utilizando datos de teledetección de la Tierra entre 2014 y 2022, se identificaron más de 3000 áreas de potentes emisiones de gas con la formación de cráteres en el fondo de lagos termokársticos, ríos y en la parte costera del mar de Kara (Fig. 24).

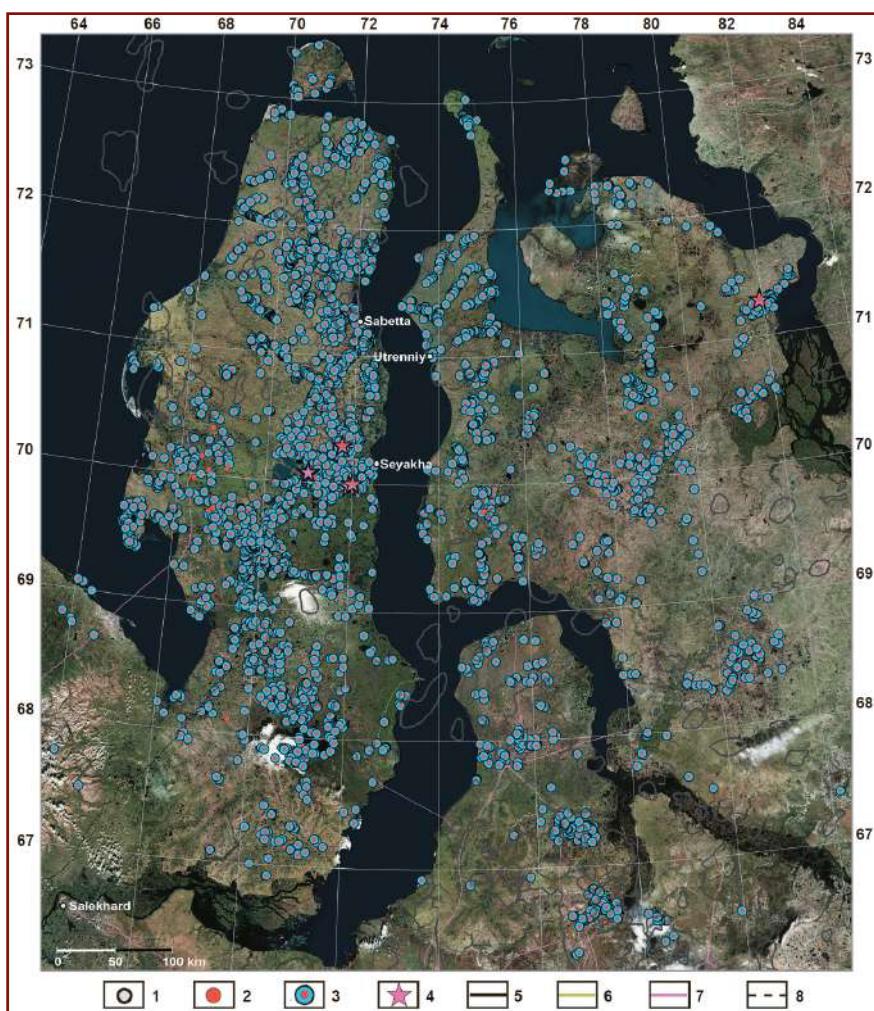


Fig. 24

Distribución de las zonas de potentes emisiones de gas en el norte de Siberia Occidental. Leyenda: 1 – asentamientos, 2 – cráteres aislados de emisiones de gas, 3 – cráteres de emisiones de gas en el fondo de las masas de agua, 4 – manifestaciones de vulcanismo de lodo, 5 – contornos de yacimientos de petróleo y gas, 6 – oleoductos, 7 – gasoductos, 8 – ferrocarril. El mapa se basa en un mosaico de imágenes satelitales de ESRI.

Source: Bogoyavlensky, V. I., Nikonov, R. A. & Bogoyavlensky, I. V. New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: thermokarst lakes with gas blowout craters and mud volcanoes. AEE 13, 353–368 (2023).

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

³¹ Bogoyavlensky, V. I., Nikonov, R. A. y Bogoyavlensky, I. V. (2023). Novye dannye ob intensivnoj degazacii zemli v Arktike na severe Zapadnoj Sibiri: termokarstovye ozera s kraterami vybrossov gaza i gryazevymi vulkanami [Nuevos datos sobre una intensa desgasificación terrestre en el Ártico en el norte de Siberia Occidental: lagos termokársticos con cráteres de emisión de gases y volcanes de lodo]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 13, 353–368. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

En 2022–2023, los datos de teledetección revelaron por primera vez la presencia de grandes estructuras volcánicas de lodo en los fondos de los lagos termokársticos Labvarto y Yambuto, que manifiestan periódicamente actividad volcánica de lodo³² (Fig. 25). Un lago termokárstico es un cuerpo de agua formado por el deshielo del permafrost. Por lo tanto, no solo el deshielo del lago, sino también la licuefacción de la arcilla en

las profundidades bajo él, indican la presencia de una fuente de calor profunda.

Según los autores del estudio, anteriormente no se conocían estructuras volcánicas de lodo tan evidentes en el fondo de lagos termokársticos en toda la región circumpolar ártica.

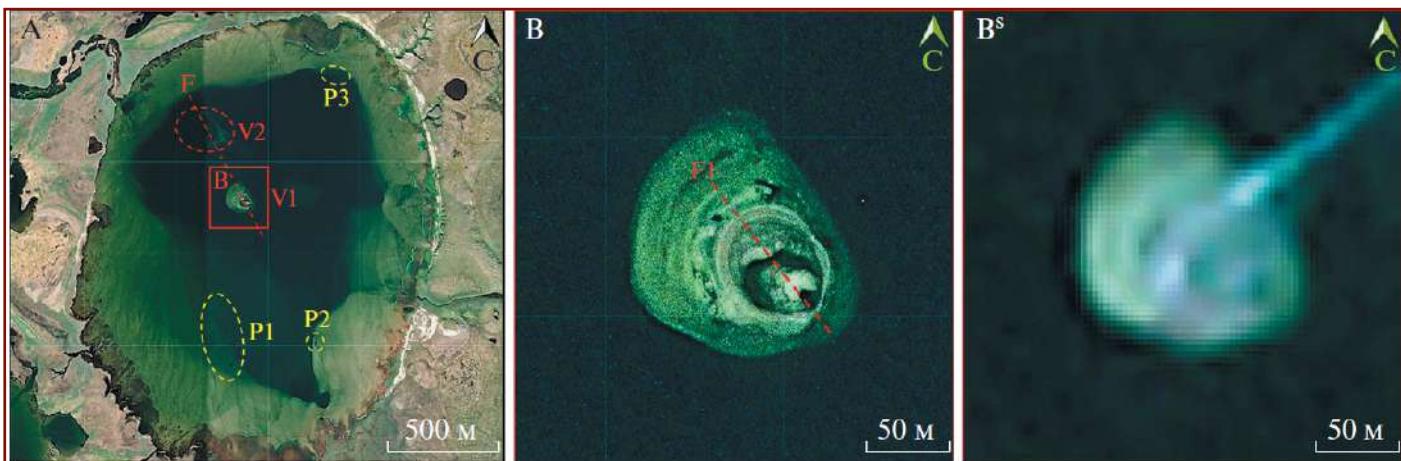


Fig. 25

Imagen satelital WorldView-2 del lago termokárstico Labvarto (A) y su fragmento ampliado (B), complementado con un fragmento de la imagen satelital Sentinel-2 (BS). Leyenda: P1, P2 y P3 – pockmarks, V1 y V2 – volcanes de lodo, F y F1 – fallas previstas.

Fuente: Bogoyavlensky, V. I. (2023). Novye dannye o gryazevom vulkanizme v Arktike na poluostrove Yamal [Nuevos datos sobre el vulcanismo de lodo en el Ártico, en la península de Yamal]. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle 512, 92–99. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

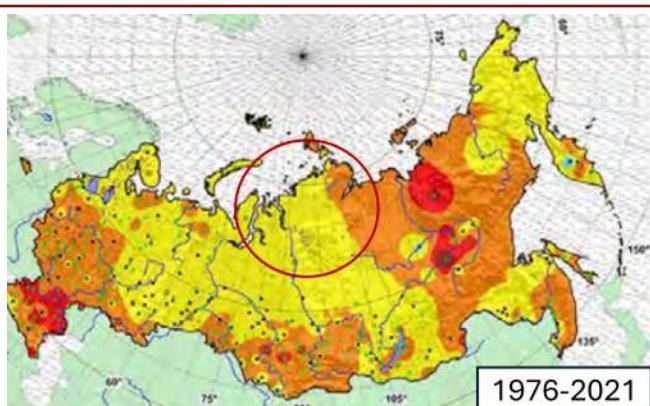
³² BBogoyavlensky, V. I. (2023). Novye dannye o gryazevom vulkanizme v Arktike na poluostrove Yamal [Nuevos datos sobre el vulcanismo de lodo en el Ártico, en la península de Yamal]. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle 512, 92–99. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

Calentamiento del suelo

Según los datos de Roshydromet de 2021–2023, se analizaron mapas de temperatura del suelo a profundidades de 80 cm, 160 cm y 320 cm. La comparación más informativa fue la de las tendencias de temperatura en los períodos 1976–2021 y 1976–2023 (Fig. 26). Entre 2021 y 2023, en el mapa de tendencias apareció una anomalía claramente distinguible en el área al sur de las penínsulas de Guida y Taimyr. Esta anomalía coincide geográficamente con la región

de velocidades reducidas de las ondas sísmicas en el manto, identificada mediante tomografía sísmica bajo la litosfera de la región Siberiana.

Dada la significativa profundidad de las mediciones (320 cm) y la amplia cobertura de observaciones (466 estaciones meteorológicas en toda Rusia), se puede inferir que la anomalía de temperatura detectada está asociada con un aumento del calor geotérmico debido al ascenso de la pluma magmática.



■	0.81 ÷ 1.5
■	0.61 ÷ 0.8
■	0.41 ÷ 0.6
■	0.21 ÷ 0.4
■	0.01 ÷ 0.2
■	-0.2 ÷ -0.01
■	-0.4 ÷ -0.21
■	-0.8 ÷ -0.41

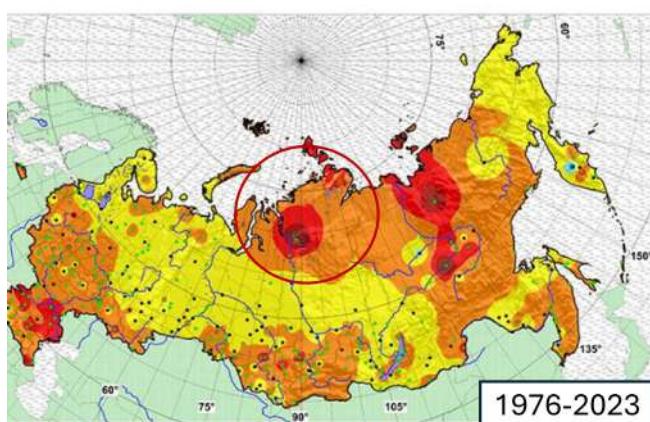


Fig. 26
Mapas de las tendencias de calentamiento del suelo según los informes de Roshydromet.

Arriba: 1976–2021

Abajo: 1976–2023

Fuente:

Roshydromet. (2022). Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2021 god [Informe sobre las peculiaridades climáticas en la Federación de Rusia para 2021]. Servicio Federal de Hidrometeorología y Monitoreo Ambiental.

Roshydromet. (2024). Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2023 god [Informe sobre las peculiaridades climáticas en la Federación de Rusia para 2023]. Servicio Federal de Hidrometeorología y Monitoreo Ambiental.

Temperatura del aire cerca de la superficie

Los datos de las observaciones de temperatura durante el invierno de 2023–2024 también reflejan el carácter anómalo de las temperaturas del aire cerca de la superficie (Fig. 27). El mapa de anomalías de temperaturas medias entre diciembre de 2023 y febrero de 2024 muestra un aumento de 2,0–4,5 °C por

encima de la norma en la zona de las penínsulas de Guida y Taimyr.

Dada la ubicación septentrional de esta región, un aumento tan significativo de la temperatura durante el período invernal podría estar relacionado con la influencia térmica de la pluma del manto.

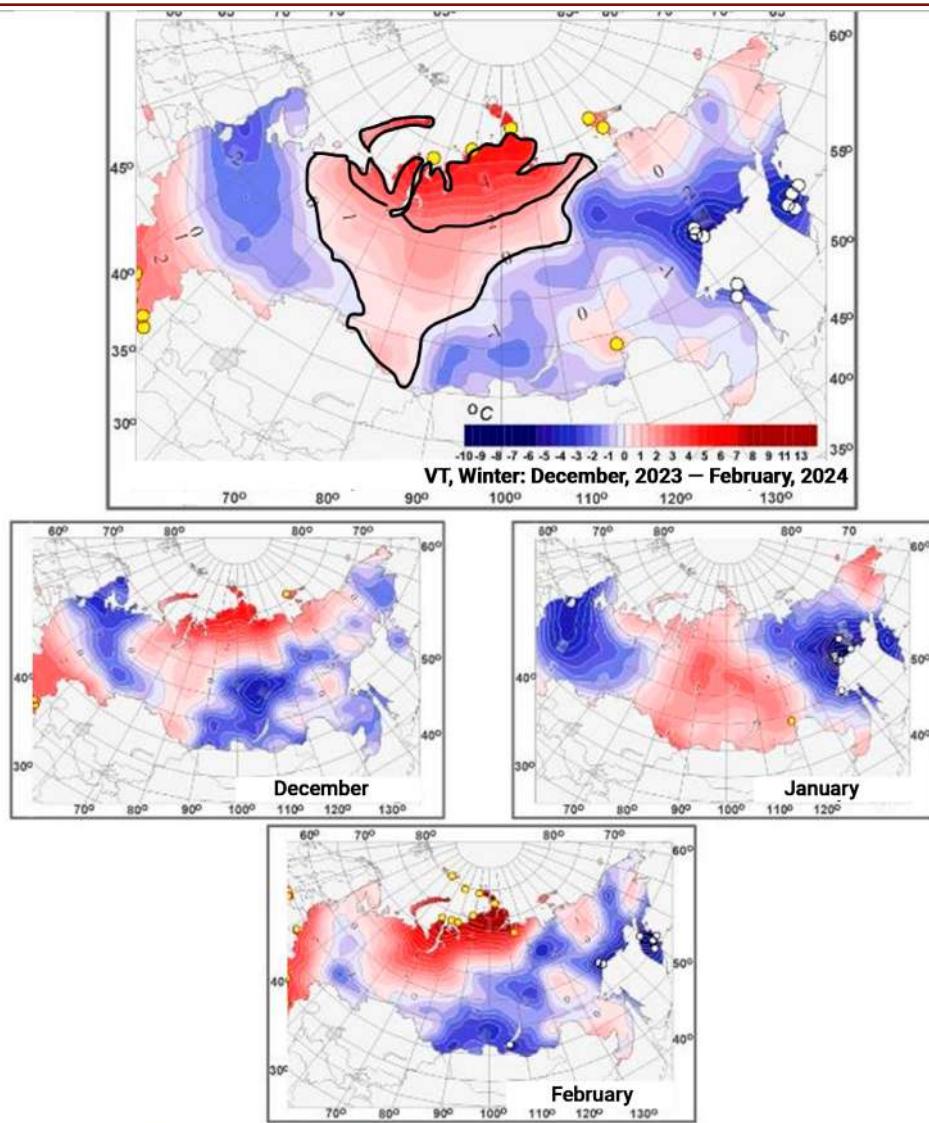


Fig. 27

Campos de anomalías de temperatura media estacional y mensual del aire cerca de la superficie (°C) en Rusia durante el invierno de 2023/24.

Fuente: Roshydromet. (2024). Doklad ob osobennostyah klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2023 god [Informe sobre las peculiaridades climáticas en la Federación de Rusia para 2023]. Servicio Federal de Hidrometeorología y Monitoreo Ambiental.

Un análisis de los mapas de temperatura media mensual³³ para enero y julio durante el período 2001–2022 muestra una anomalía de temperatura constante en la región estudiada (Figs. 28, 29). Esto indica que la anomalía no solo se ha observado en los últimos dos años, sino

que ha persistido a lo largo de todo el período de 23 años de observación, lo que confirma aún más la conclusión de que la intrusión de la pluma está influyendo en las temperaturas cercanas a la superficie.

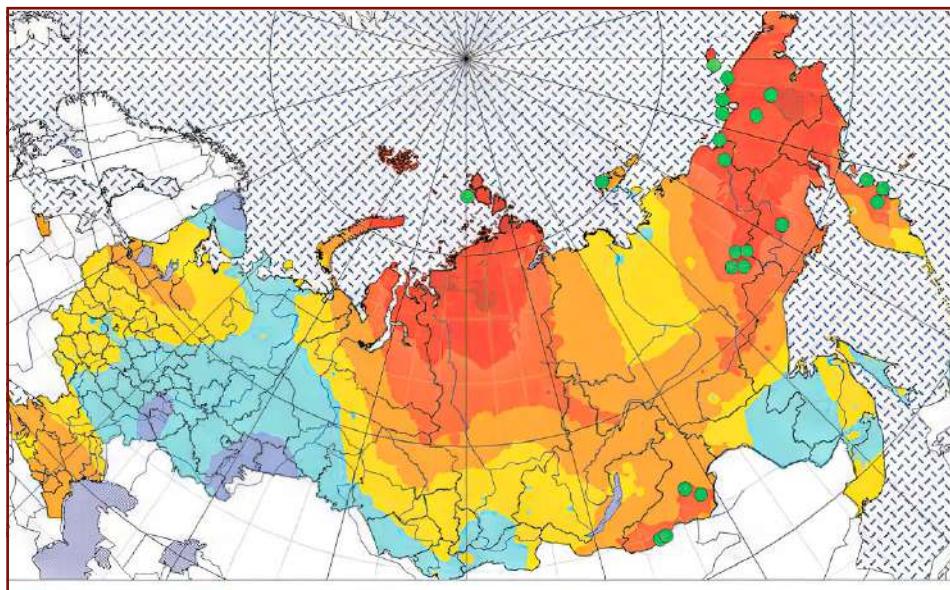


Fig. 28

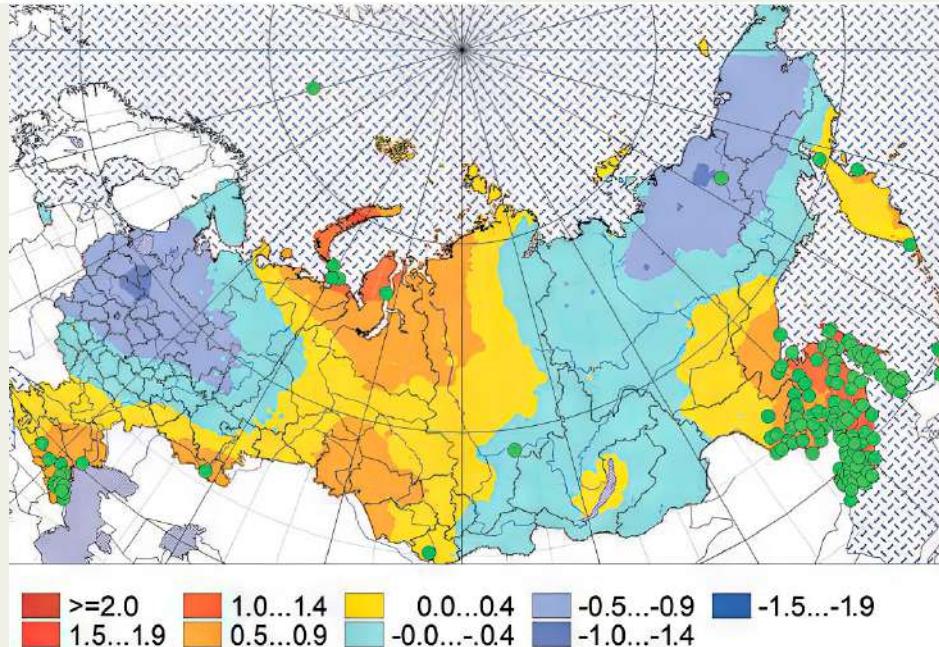
Coeficientes de tendencia lineal (°C/10 años) para las temperaturas medias mensuales del aire en el período 2001–2022 (dentro de las fronteras de Rusia a febrero de 2022), enero.

Fuente: Sherstyukov, B. G. Global'noe poteplenie i ego vozmozhnye prichiny [Calentamiento global y sus posibles causas]. Gidrometeorologiya i ekologiya, 70, 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

Fig. 29

Coeficientes de tendencia lineal (°C/10 años) para las temperaturas medias mensuales del aire en Moscú durante el período 2001–2022 (dentro de las fronteras de Rusia a febrero de 2022), julio.

Fuente: Sherstyukov, B. G. Global'noe poteplenie i ego vozmozhnye prichiny [Calentamiento global y sus posibles causas]. Gidrometeorologiya i ekologiya, 70, 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>



³³ Sherstyukov, B. G. Global'noe poteplenie i ego vozmozhnye prichiny [Calentamiento global y sus posibles causas]. Gidrometeorologiya i ekologiya, 70, 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

Aumento del número de rayos

La comunidad científica está cada vez más preocupada por el aumento de las tormentas eléctricas y los rayos en el Ártico. El número de rayos al norte de los 65° de latitud norte se ha triplicado entre 2010 y 2020³⁴ (Fig. 30). Es especialmente notable que la mayoría de estos rayos se concentran en el norte de Siberia, mientras que están prácticamente ausentes en el norte de Canadá y Groenlandia (Figs. 31, 32). La actividad de los rayos está avanzando hacia

el Polo Norte. En agosto de 2019, se informó de que se habían detectado varios rayos a sólo unos cientos de kilómetros del Polo Norte³⁵. La mayoría de los eventos de rayos en el Ártico alto (al norte de los 80° de latitud norte) ocurren durante unos pocos días de tormentas intensas cada verano. Sin embargo, estas tormentas representan un fenómeno nuevo para la región, ya que las tormentas eléctricas eran raras en años anteriores.

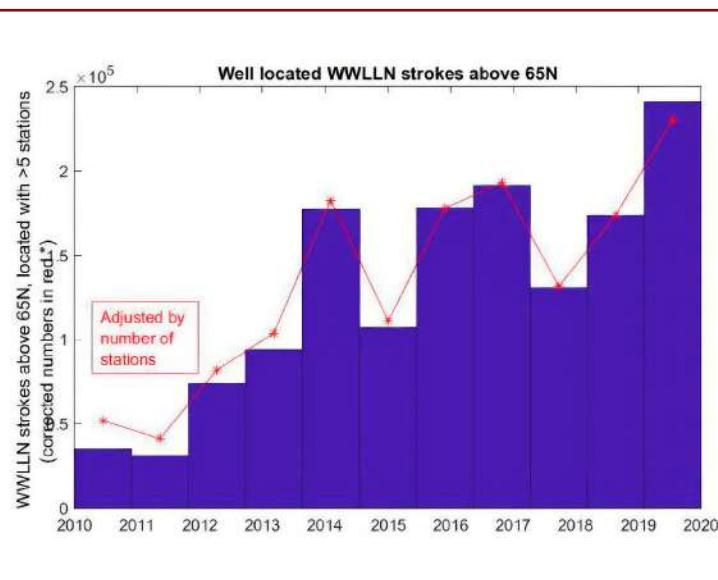


Fig. 30

Descargas bien localizadas por WWLLN por encima de 65°N (azul); la curva roja muestra el ajuste basado en el número total de estaciones WWLLN. WWLLN: Red Mundial de Localización de Rayos (World Wide Lightning Location Network).

Fuente: Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J. y Anderson, T. S. (2021). Lightning in the Arctic [Rayos en el Ártico]. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL091366.

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

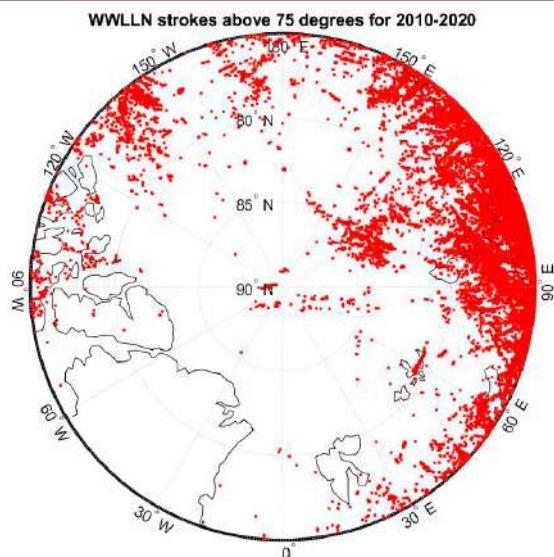


Fig. 31

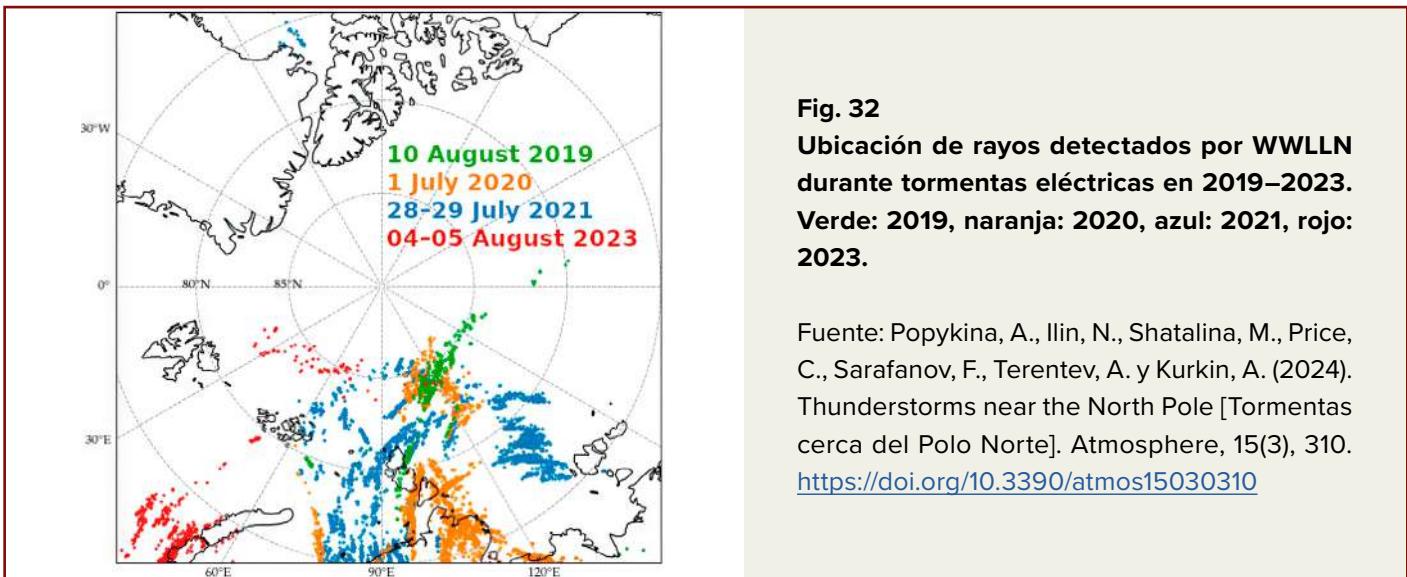
Distribución global de descargas de rayos detectadas por WWLLN en junio, julio y agosto durante el período 2010–2020 por encima de 75°N. WWLLN: Red Mundial de Localización de Rayos (World Wide Lightning Location Network).

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

³⁵Samenow, J. (12 de agosto de 2019). Lightning struck near the North Pole 48 times on Saturday, as rapid Arctic warming continues [El sábado cayeron 48 rayos cerca del Polo Norte, mientras continúa el rápido calentamiento del Ártico]. The Washington Post. <https://www.washingtonpost.com/weather/2019/08/12/lightning-struck-within-miles-north-pole-saturday-rapid-arctic-warming-continues/>



La localización persistente de estas tormentas en los últimos años se atribuye al calor extremo del verano observado en el norte de Siberia, con temperaturas que alcanzan hasta 35 °C durante los meses de verano. Además, se hipotetiza que un aumento general de la ionización atmosférica en esta región, debido a la intrusión de la pluma magmática, es también un factor significativo que contribuye al incremento en la actividad de los rayos. Esto ocurre como resultado de la conversión de energía térmica en energía eléctrica por el efecto Yutkin durante las explosiones dentro del manto, que suceden cuando entran en contacto flujos de magma con diferentes temperaturas. Como resultado, se liberan enormes cantidades de energía desde el interior de la Tierra, lo que provoca un aumento de la carga estática en la superficie, alteraciones en el potencial de

la superficie, mayor ionización atmosférica y, en consecuencia, un aumento del número de rayos.

Además, se liberan volúmenes significativos de gas a través de fracturas en la corteza terrestre. Este proceso puede influir en la formación de nubes y en las condiciones meteorológicas locales. La intrusión de magma es un factor clave en el calentamiento de la superficie, el aumento de la humedad atmosférica y el desarrollo de anomalías térmicas, que contribuyen a la formación de nubes de tormenta y rayos.

Dado que la formación de tormentas eléctricas y rayos requiere una combinación de aire frío, aire cálido e inestabilidad convectiva, la ubicación de la pluma del manto Siberiana proporciona condiciones óptimas para su desarrollo.

Agotamiento de la capa de ozono

La actividad magmática en el interior de la Tierra va acompañada de la liberación de grandes cantidades de gases volcánicos, incluidos hidrógeno, metano y dióxido de carbono. Según la investigación de V. L. Syvorotkin,³⁶ las emisiones de hidrógeno contribuyen a la degradación de la capa de ozono. Dado que el ascenso del magma ocurre de manera pulsátil, la desgasificación y la posterior destrucción de la capa de ozono también se manifestarán de forma esporádica, es decir, como eventos ocasionales.

Se han observado anomalías en la capa de ozono sobre el norte de Siberia desde 1997–1998, coincidiendo con el desplazamiento

del núcleo de la Tierra hacia la península de Taimyr. Se registraron episodios de agotamiento del ozono en 2011, 2016 y 2020,³⁷ siendo el más severo en 2016.³⁸ A finales de enero de 2016, por primera vez desde que comenzó el monitoreo en 1973, se detectó una anomalía en la capa de ozono sobre los Urales del Norte y Siberia, con un contenido total de ozono de 190–200 DU, es decir, 40–45 % por debajo del promedio a largo plazo. Esta anomalía persistió hasta una semana (Fig. 33).

También se registró una reducción significativa en el contenido total de ozono mediante el Instrumento de Monitoreo de Ozono (OMI) a bordo del satélite Aura de la NASA (Fig. 34).

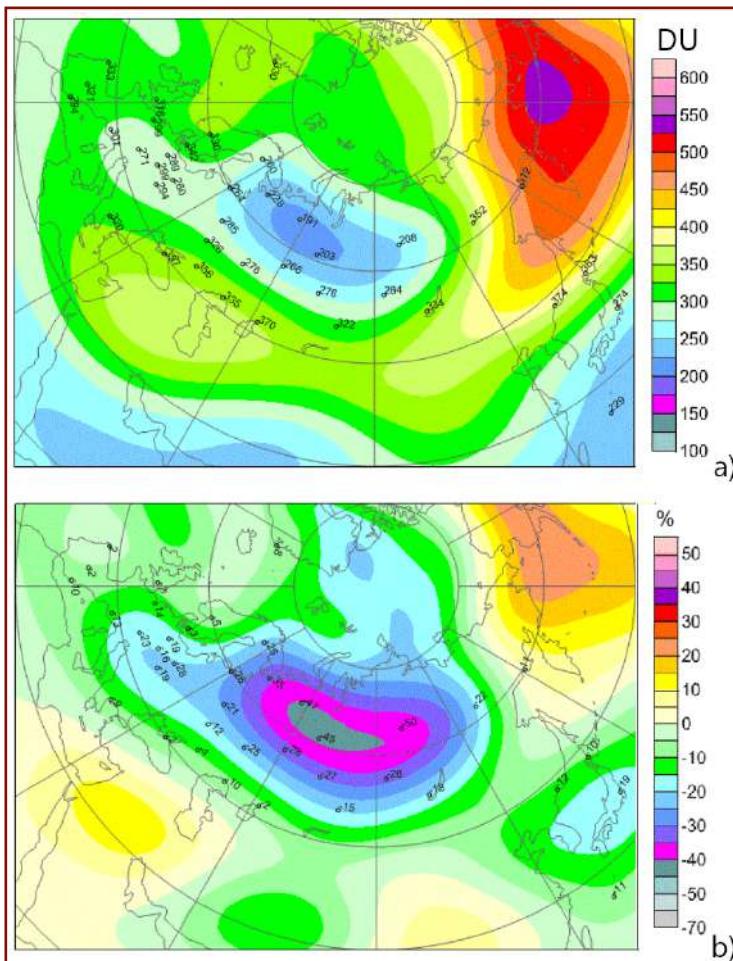


Fig. 33

Contenido total de ozono (a) y sus desviaciones de la norma (b) el 28 de enero de 2016, según datos satelitales de WOUDC [<http://woudc.org/>]. Los números en el mapa representan mediciones del ozono total en las estaciones terrestres de monitoreo del ozono.

Fuente: Nikiforova, M. P., Vargin, P. N., Zvyagintsev, A. M., Ivanova, N. S., Kuznetsova, I. N. y Luk'yanov, A. N. (2016). Ozonovaya mini-dyra nad Severnym Uralom i Sibir'yu [Minaguero de ozono sobre los Urales septentrionales y Siberia]. Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii [Actas del Centro de Investigación Hidrometeorológica de la Federación Rusa], 360, 168–180. V materialah Gidrometeorologicheskoj konferencii, 9–10 fevralya [En Actas de la Conferencia Hidrometeorológica, 9-10 de febrero], 4, 91–96.

³⁶Syvorotkin, V. L. (2018). Glubinnaya degazaciya v polyarnykh regionakh planety i izmenenie klimata [Desgasificación profunda en las regiones polares del planeta y cambio climático]. Aktual'nye problemy nefti i gaza, 23. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art48>

³⁷Xia, Y. et al. Significant Contribution of Severe Ozone Loss to the Siberian Arctic Surface Warming in Spring 2020 [Contribución significativa de la pérdida severa de ozono al calentamiento de la superficie Siberiano-Ártica en la primavera de 2020]. Geophysical Research Letters, 48, e2021GL092509 (2021). <https://doi.org/10.1029/2021GL092509>

³⁸Nikiforova, M. P. (2017). Ekstremal'no nizkie znacheniya obshchego soderzhaniya ozona nad severnym Uralom i Sibir'yu v kone yanvarya 2016 goda [Valores extremadamente bajos de ozono total sobre el norte de los Urales y Siberia a finales de enero de 2016]. Atmosfera i okean. Optika. 30(1). <https://doi.org/10.15372/AOO20170102>

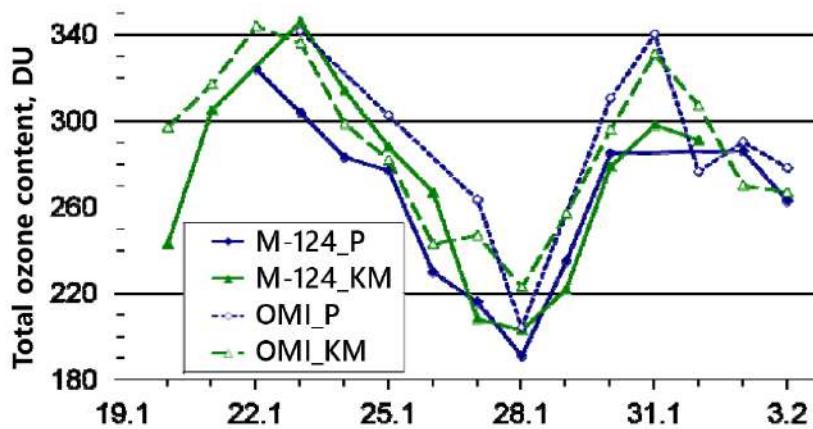


Fig. 34

Contenido total de ozono medido mediante el ozonómetro terrestre M-124 y el instrumento OMI a bordo del satélite Aura (EE. UU.) en las estaciones de Pechora (P) y Janti-Mansisk (KM) desde el 20 de enero hasta el 3 de febrero de 2016.

Fuente: Nikiforova, M. P., Vargin, P. N., Zvyagintsev, A. M., Ivanova, N. S., Kuznetsova, I. N. и Luk'yanov, A. N. (2016). Ozonovaya mini-dyra nad Severnym Uralom i Sibir'yu [Minagujero de ozono sobre los Urales septentrionales y Siberia]. Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii [Actas del Centro de Investigación Hidrometeorológica de la Federación Rusa], 360, 168–180. V materialah Gidrometeorologicheskoy konferencii, 9–10 fevralya [En Actas de la Conferencia Hidrometeorológica, 9-10 de febrero], 4, 91–96.

Es importante destacar que el ciclo estacional a largo plazo del contenido total de ozono en las latitudes extratropicales del hemisferio norte alcanza típicamente su mínimo en septiembre y su máximo en marzo-abril. Sin embargo, en 2016, la degradación del ozono ocurrió de manera inusualmente temprana, en enero, alcanzando los niveles más bajos jamás registrados en la historia de las observaciones instrumentales.

Por lo tanto, el debilitamiento de la capa de ozono sobre la región Siberiana puede servir como un indicador adicional de la liberación de gases a través de fracturas en la corteza terrestre, provocadas por el ascenso de la pluma magmática hacia la superficie.

Estructura, posibles dimensiones y localización de la pluma magnética, según los datos publicados y los observados

La estructura de la pluma puede visualizarse aproximadamente como un hongo. Posee una cola (tallos) que transporta material calentado desde el límite núcleo-manto hacia arriba. La parte superior de la pluma, que se expande a medida que asciende, forma la cabeza de la

pluma. Cuando la pluma alcanza la base de la litósfera, se encuentra con una capa refractaria de rocas solidificadas, lo que provoca que la cabeza de la pluma se extienda horizontalmente bajo la litósfera, de manera similar al sombrero de un hongo (Fig. 35).

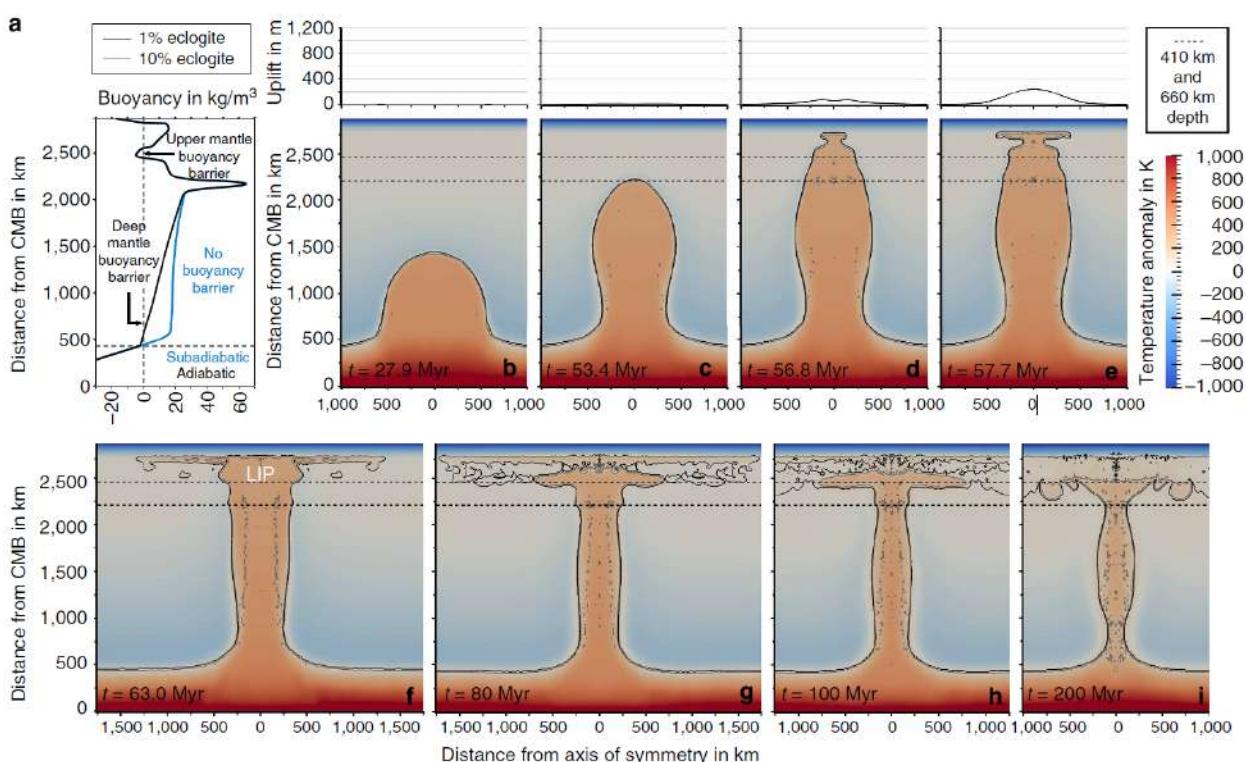


Fig. 35

La ilustración presenta un modelo de evolución de una pluma magnética, similar a la que formó los Traps Siberianos hace 250 millones de años.

El gráfico a la izquierda (a) muestra como el magma asciende a través de las diferentes capas del manto terrestre. La sección principal de la imagen (b–i) actúa como una “línea de tiempo”, representando las etapas de desarrollo de la pluma: Inicialmente, una “columna” de magma caliente asciende desde la base del manto. Gradualmente, esta columna alcanza el manto superior, donde se expande y forma una cabeza

en forma de hongo. Con el tiempo, la pluma se adelgaza y comienza a fragmentarse en estructuras separadas.

Los colores en el diagrama representan la temperatura: Áreas rojas y naranjas → Regiones más calientes. Áreas azules → Regiones más frías.

Fuente: Dannberg, J., & Sobolev, S. (2015). Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept [Las plumas termoquímicas de baja flotabilidad resuelven la controversia del concepto clásico de pluma del manto]. Nature Communications, 6, 6960.

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

Según los datos de investigación, a medida que la pluma se aproxima a la litósfera, su radio se duplica al fluir, y su velocidad de ascenso disminuye significativamente³⁹. El material caliente en ascenso desde la cola de la pluma ejerce presión y quema la litósfera, formando grietas. En áreas estructuralmente débiles, se generan plumas secundarias: cámaras magmáticas superiores dentro de la corteza terrestre. Ejemplos de estas cámaras se encuentran bajo Yellowstone, Campi Flegrei y otros supervolcanes. Estas cámaras magmáticas son los lugares donde pueden ocurrir rupturas en la corteza y erupciones masivas de magma.

Es importante señalar que, según los modelos existentes, el ascenso de una pluma hasta la superficie podría tardar decenas de millones de años. Sin embargo, estos cálculos se basan en suposiciones teóricas, mientras que las observaciones prácticas de la intensificación actual de los procesos geodinámicos sugieren lo contrario. Las observaciones en Siberia indican que el ascenso de la pluma podría

ocurrir en varias décadas.

Según la literatura⁴⁰, se sabe que una superpluma magmática similar, que provocó numerosas erupciones basálticas en Eurasia (Siberia) en el límite entre los períodos Pérmico y Triásico (hace 250 millones de años), tenía las siguientes dimensiones: 4000 km de oeste a este y 3000 km de norte a sur. Se estima que la cabeza de la pluma tenía un diámetro de 1000 a 2000 km.

Se sabe que la Placa de Siberia Occidental es más joven y delgada, con un espesor de 35 a 40 kilómetros. Por el contrario, la Placa de Siberia Oriental (o plataforma), conocida como el Cratón Siberiano, es más antigua, gruesa y fría, con un espesor de 40 a 45 kilómetros. Según los datos de tomografía sísmica,⁴¹ los científicos suponen que actualmente se observan pequeños focos magmáticos bajo la Plataforma de Siberia Oriental. Estos focos se expanden lateralmente bajo el Cratón Siberiano (Fig. 36) debido a la naturaleza más fría de la placa.

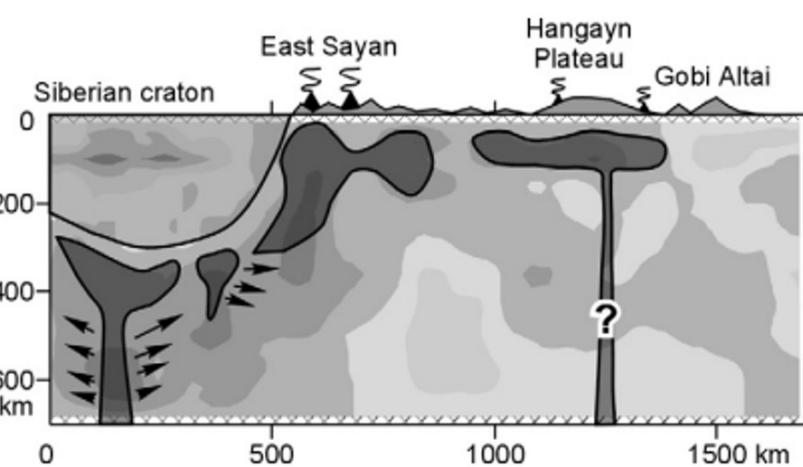


Fig. 36

Diagrama del artículo que ilustra cómo los pequeños focos magmáticos (indicados con flechas a la izquierda) fluyen alrededor del Cratón Siberiano.

Fuente:

Koulakov, I. Y. (2008). Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia from regional seismic tomography [Estructura del manto superior bajo el sur de Siberia y Mongolia a partir de tomografía sísmica regional]. Russian Geology and Geophysics, 49(3), 187-196.

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

³⁹Ernst, R. E., & Buchan, K. L. (2002). Maximum size and distribution in time and space of mantle plumes: evidence from large igneous provinces. [Tamaño y distribución máximos en el tiempo y el espacio de las plumas del manto: evidencias de las grandes provincias ígneas] Journal of Geodynamics, 34, 309-342.⁴⁰Lvova, E. V. (2010). Tectonics of mantle plumes: Evolution of basic concepts. Moscow University Geology Bulletin, 5, 21-29.

⁴¹Lvova, E. V. (2010). Tectonics of mantle plumes: Evolution of basic concepts [Tectónica de las plumas del manto: Evolución de los conceptos básicos]. Moscow University Geology Bulletin, 5, 21-29.

⁴¹Koulakov, I. Y. (2008). Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia from regional seismic tomography [Estructura del manto superior bajo el sur de Siberia y Mongolia a partir de tomografía sísmica regional]. Russian Geology and Geophysics, 49(3), 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012>

Según la hipótesis, la pluma Siberiana moderna se está expandiendo actualmente bajo la base de la Placa de Siberia Oriental y parcialmente bajo la Placa de Siberia Occidental. Se cree que esta expansión ocurre a profundidades de 50–60 km, mientras que la “cola” de la pluma se observa con mayor claridad a profundidades de aproximadamente 100 km. Es probable que ya estén ocurriendo intrusiones secundarias de la pluma a profundidades de alrededor de 40 km.

Algunos modelos de sismotomografía revelan anomalías de baja velocidad⁴²

(indicativas de un entorno más fundido) a profundidades de 110–150 km, lo que es consistente con una región de manto líquido bajo las áreas al sur de las penínsulas de Gyda y Taimyr (Fig. 37). Estas anomalías, observadas en mapas de velocidad de un estudio de agosto de 2024, se presume que corresponden a dos flujos de material magmático, denominados “colas” de la pluma (Fig. 38).

Si este modelo es preciso, el diámetro de cada cola de la pluma que asciende bajo el Cráton Siberiano Oriental es de aproximadamente 600–700 km.

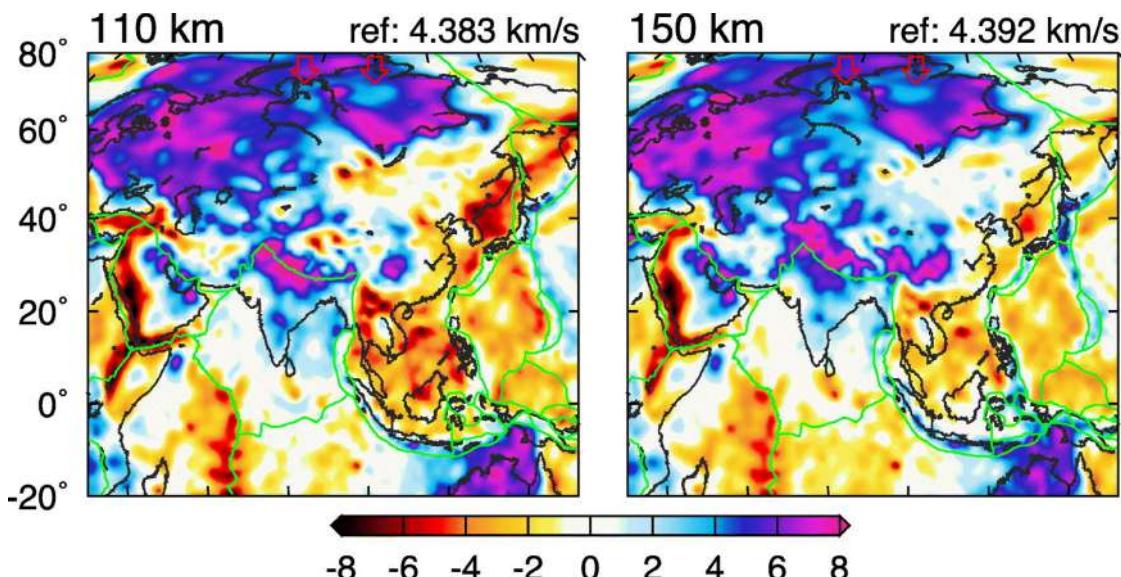


Fig. 37

El mapa muestra regiones con altas velocidades de propagación de ondas sísmicas, representadas en morado, que corresponden a rocas más duras y densas, mientras que las áreas azules indican zonas de velocidades reducidas, lo que sugiere la presencia de material más dúctil o fundido. Las anomalías de baja velocidad sísmica, que corresponden a zonas con mayor contenido de manto líquido, están resaltadas con dos flechas rojas.

Fuente:

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 [Manto superior bajo Asia a partir de la tomografía sísmica, con inferencias para los mecanismos de la tectónica, la sismicidad y el magmatismo]. Earth-Science Reviews, 255, 104841. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>

⁴²Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism [El manto superior bajo Asia a partir de la tomografía sísmica, con inferencias para los mecanismos de la tectónica, la sismicidad y el magmatismo]. Earth-Science Reviews, 247, 104595. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>

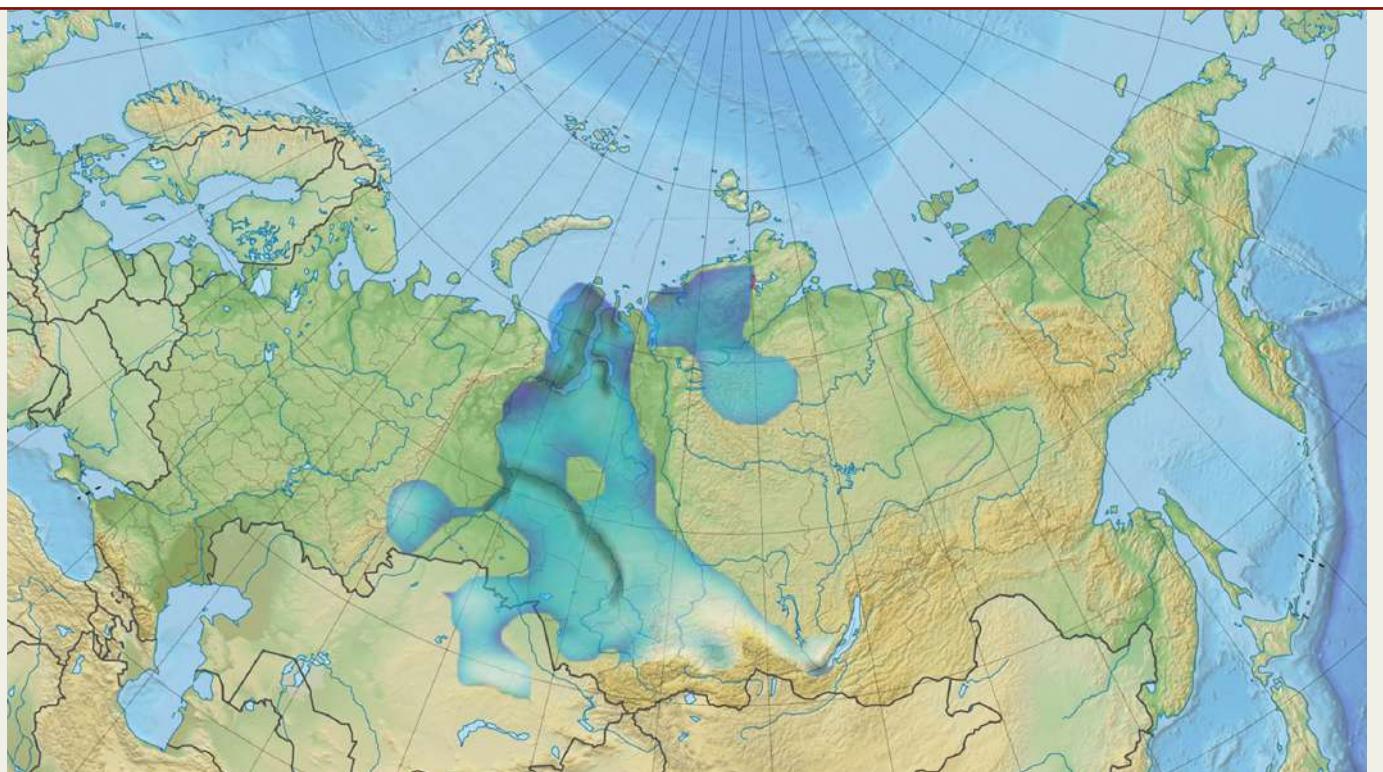


Fig. 38

Mapa físico de Rusia que muestra y adapta las anomalías de ondas sísmicas de baja velocidad, basado en los datos de Dou et al., 2024.

Es importante señalar que el análisis sismotomográfico presentado en el estudio de Dou et al. (2024) para Siberia se basó en datos de menos de 10 sensores sísmicos (Fig. 39), todos ellos ubicados a lo largo de los límites de placas, con casi ninguna cobertura dentro de Siberia Occidental y Oriental. El análisis utilizó datos de

todas las grabaciones de sismos de amplio rango disponibles públicamente desde 1994 hasta el 4 de septiembre de 2023. Para comparación, los triángulos rojos en el mapa indican los sensores utilizados en el análisis para Asia, cuyo número asciende a miles.

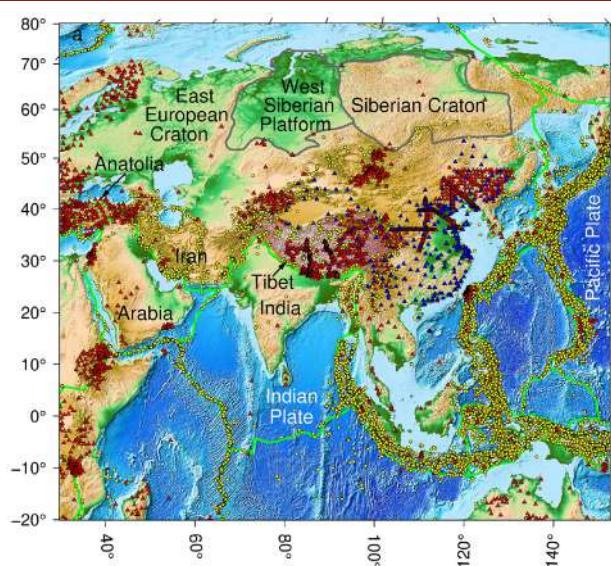


Fig. 39

Ubicación de los sensores (triángulos rojos) utilizados en el análisis sismotomográfico.

Fuente: 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 [Manto superior bajo Asia a partir de la tomografía sísmica, con inferencias para los mecanismos de la tectónica, la sismicidad y el magmatismo]. *Earth-Science Reviews*, 247, 104595.

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

Un estudio de 2023 realizado por investigadores chinos confirma que la actividad magmática está actualmente fundiendo y adelgazando la corteza bajo Siberia⁴³ (Fig. 40). Este proceso en curso reduce la solidez de la placa litosférica. Los autores presentan un modelo de conductividad eléctrica del manto en el norte de Asia, derivado de datos geomagnéticos, que destaca una importante anomalía de conductividad en la zona de transición del manto bajo los Traps Siberianos durante su erupción. Esta anomalía se interpreta como una irregularidad térmica con rastros de fusión, vinculada a la anomalía Pérmica en la región (Fig. 41).

En general, los modelos sismotomográficos que investigan profundidades de 40 a 110 km en el Cratón Siberiano Oriental muestran

resultados divergentes. Existe una clara escasez de datos sismológicos para Siberia, lo que limita la precisión de estos modelos.

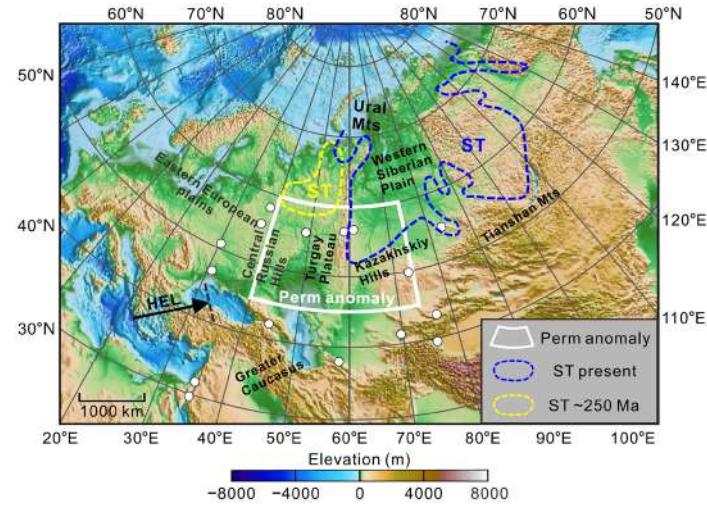
Los modelos tomográficos modernos se basan en datos sísmicos recopilados durante un período prolongado, aproximadamente 30 años. Desde la perspectiva de los conceptos clásicos sobre la evolución de las plumas del manto, que abarcan millones de años, un período de 30 años se considera extremadamente corto. Sin embargo, los datos actuales indican que se han producido cambios estructurales significativos en la pluma Siberiana durante este tiempo.

Estas observaciones resaltan la necesidad de revisar las concepciones actuales sobre la velocidad de desarrollo de las plumas del manto y las metodologías utilizadas para su estudio.

Fig. 40

Los puntos blancos indican las estaciones cuyas C-respuestas se utilizaron en este estudio. La anomalía Pérmica se muestra como una zona delimitada por líneas blancas. La ubicación actual de los Traps Siberianos está marcada en azul. Las posiciones anteriores están marcadas en amarillo, con líneas discontinuas.

Fuente: 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 [Restos de la superpluma de finales del Pérmico que generó los Traps Siberianos inferidos a partir de datos geomagnéticos]. 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 [Restos de la superpluma de finales del Pérmico que generó los Traps Siberianos inferidos a partir de datos geomagnéticos]. Nature Communications, 14, 1311. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37053-3>

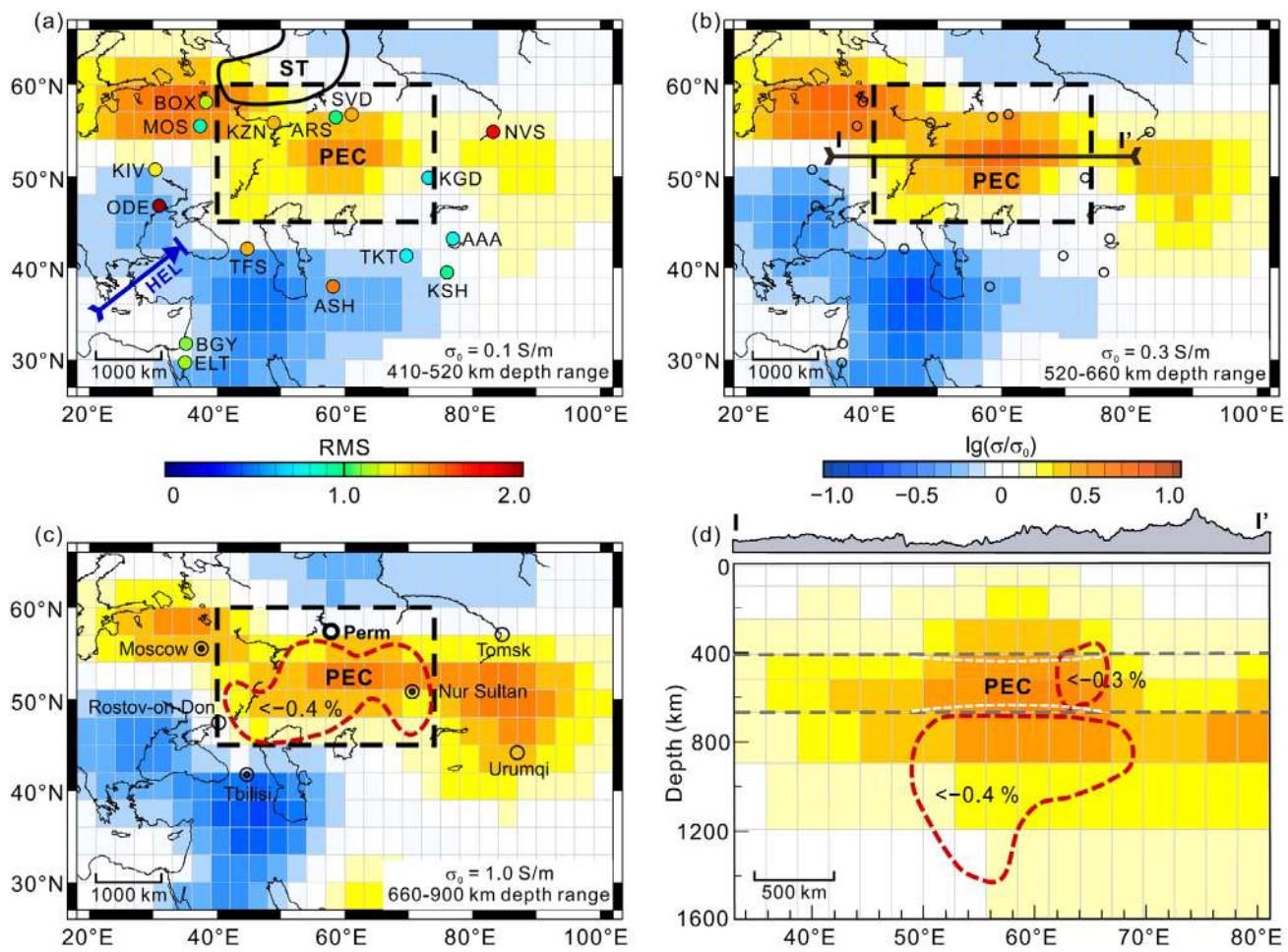


Fig. 41

Científicos de la Universidad de Jilin y la Universidad Shijiazhuang Tiedao utilizaron datos del campo geomagnético de 16 estaciones en el norte de Asia para calcular la conductividad eléctrica del manto a diversas profundidades. Descubrieron un aumento notable en la conductividad en comparación con la conductividad promedio mundial, específicamente en la región bajo los Traps Siberianos (áreas amarillas y marrones en los diagramas). Los investigadores determinaron que estas áreas, a profundidades de 400 a 900 km, son en promedio 250 grados más calientes que el manto circundante. En estas zonas,

existe una fracción de manto fundido.

Fuente: 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 [Restos de la superpluma de finales del Pérmico que generó los Traps Siberianos inferidos a partir de datos geomagnéticos]. *Nature Communications*, 14, 1311.

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

Cabe destacar que erupciones previas ocurridas hace 250 millones de años, en el límite entre los períodos Pérmico y Triásico, también tuvieron lugar en esta región. El epicentro se ubicó bajo el Cratón Siberiano

Oriental (debajo de la meseta de Putorana), con efusiones de magma que se extendieron tanto en Siberia Occidental como en Siberia Oriental (Fig. 42).

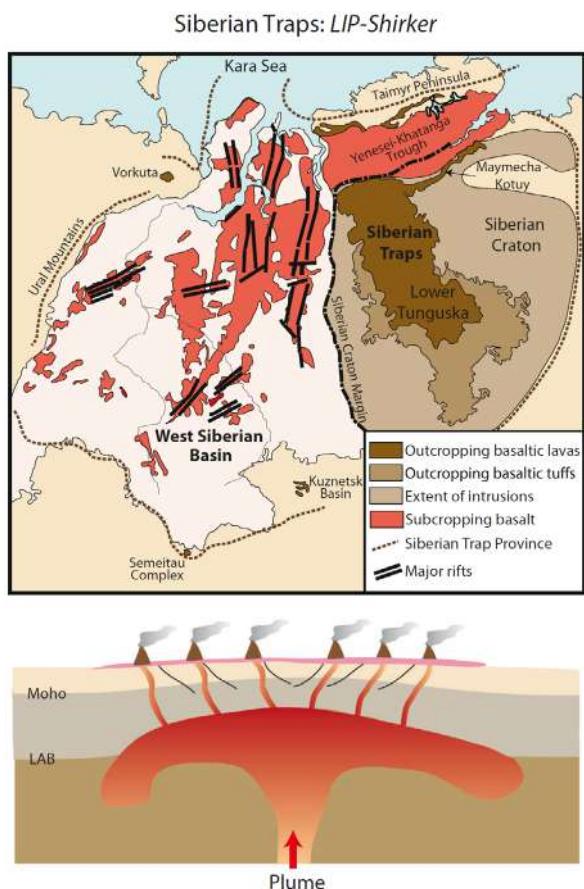


Fig. 42

Los Traps Siberianos como ejemplo de una Gran Provincia Ígnea.

El mapa muestra: Erupciones en Siberia Occidental (rojo). Traps en Siberia Oriental (marrón), que entraron en erupción hace 250 millones de años. El material caliente de la pluma del manto ascendió y se expandió bajo el borde litósfera-astenósfera, creando una estructura en forma de hongo. Esto dio lugar a una actividad magnética extensa sobre un área de aproximadamente 5 millones de km². La influencia de la pluma resultó en la formación del Sistema de Rift de Siberia Occidental, cuya actividad cesó aproximadamente 10 millones de años después, durante el Triásico Medio.

Fuente: Koptev, A., & Cloetingh, S. (2024). Role of Large Igneous Provinces in continental break-up varying from “Shirker” to “Producer” [Rol de las grandes provincias ígneas en la disagregación continental variando de “Shirker” a “Producer”]. Communications Earth & Environment, 5, 27.

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

Localización de la pluma magmática

Si se resume el análisis mencionado de las anomalías de temperatura del suelo, la profundidad de deshielo del permafrost, las temperaturas cercanas a la superficie, las

anomalías de velocidad sísmica reducida en el manto y los datos de anomalías magnéticas, se puede determinar la posición actual y el tamaño de la pluma Siberiana (Fig. 43).

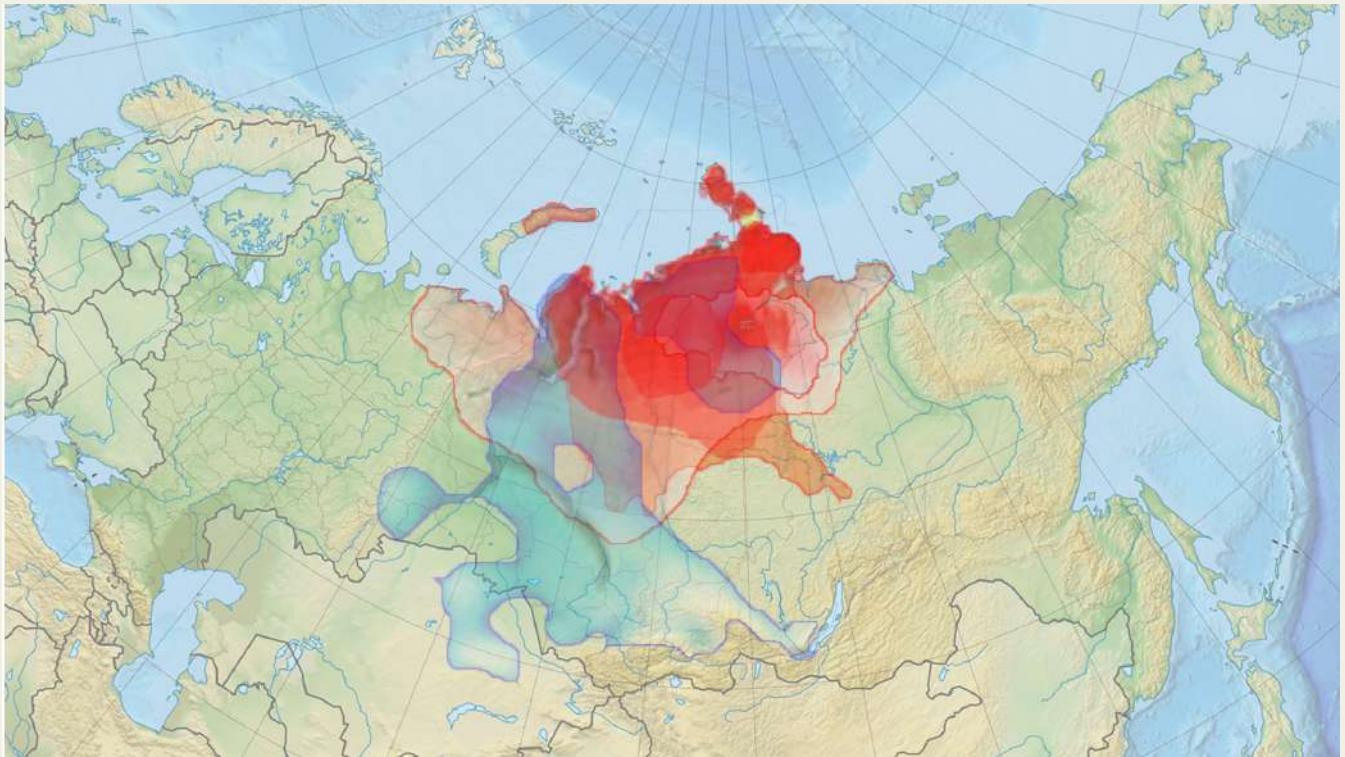
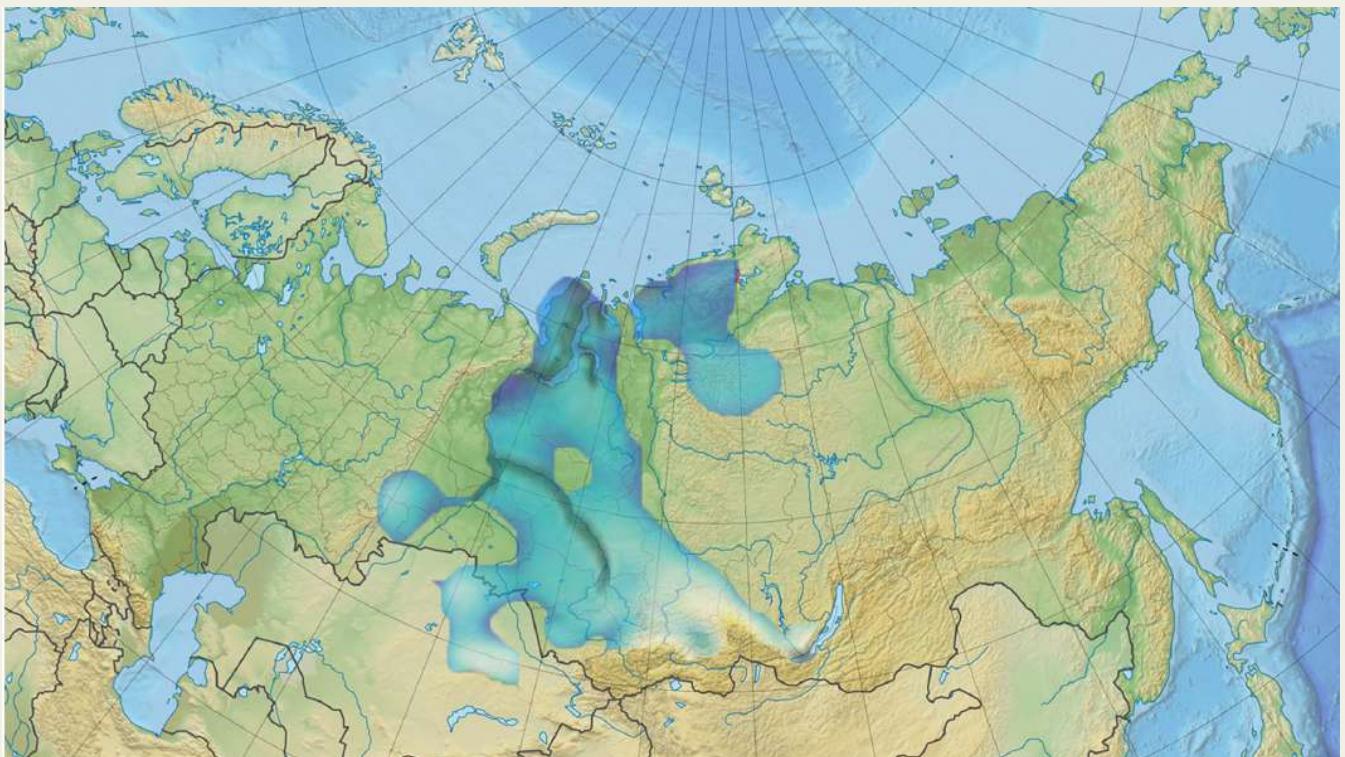


Fig. 43

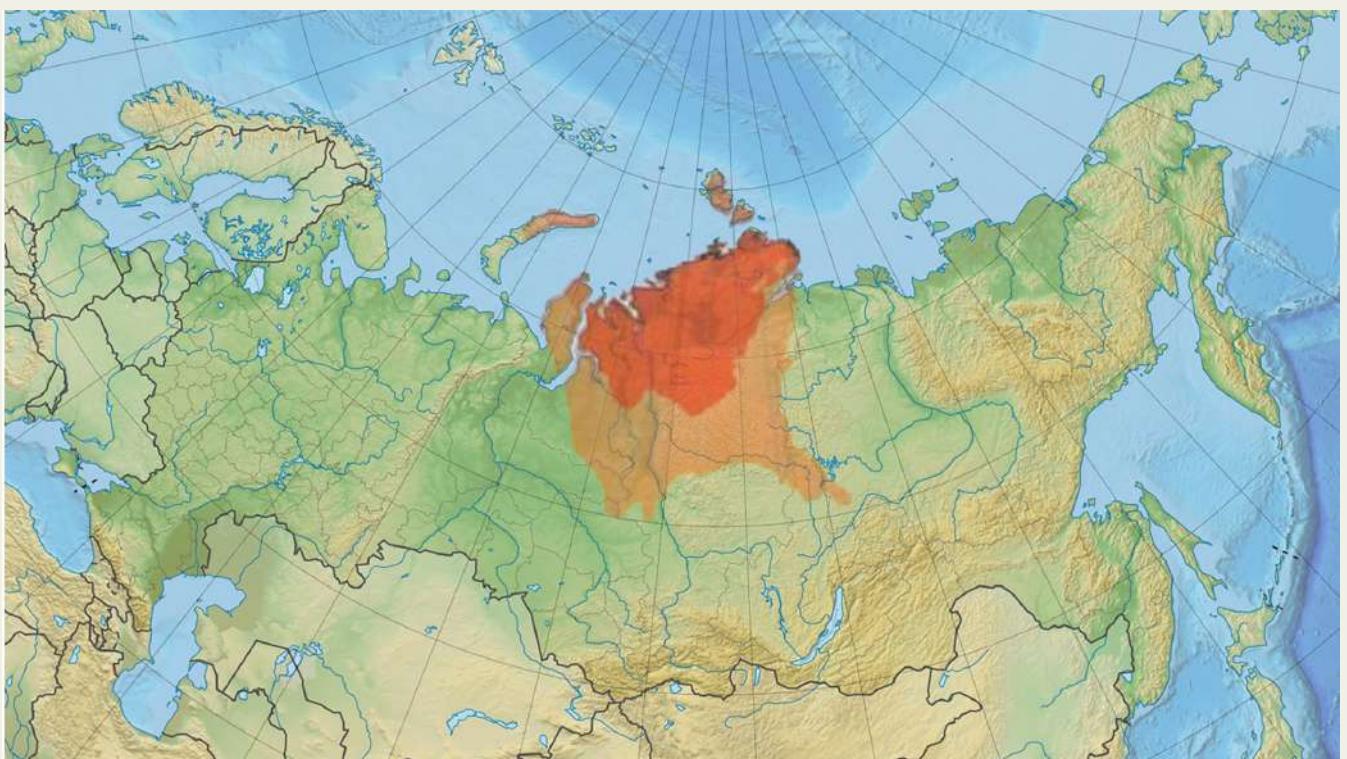
A. Mapa compuesto que superpone las principales anomalías en múltiples parámetros, detallados a continuación:



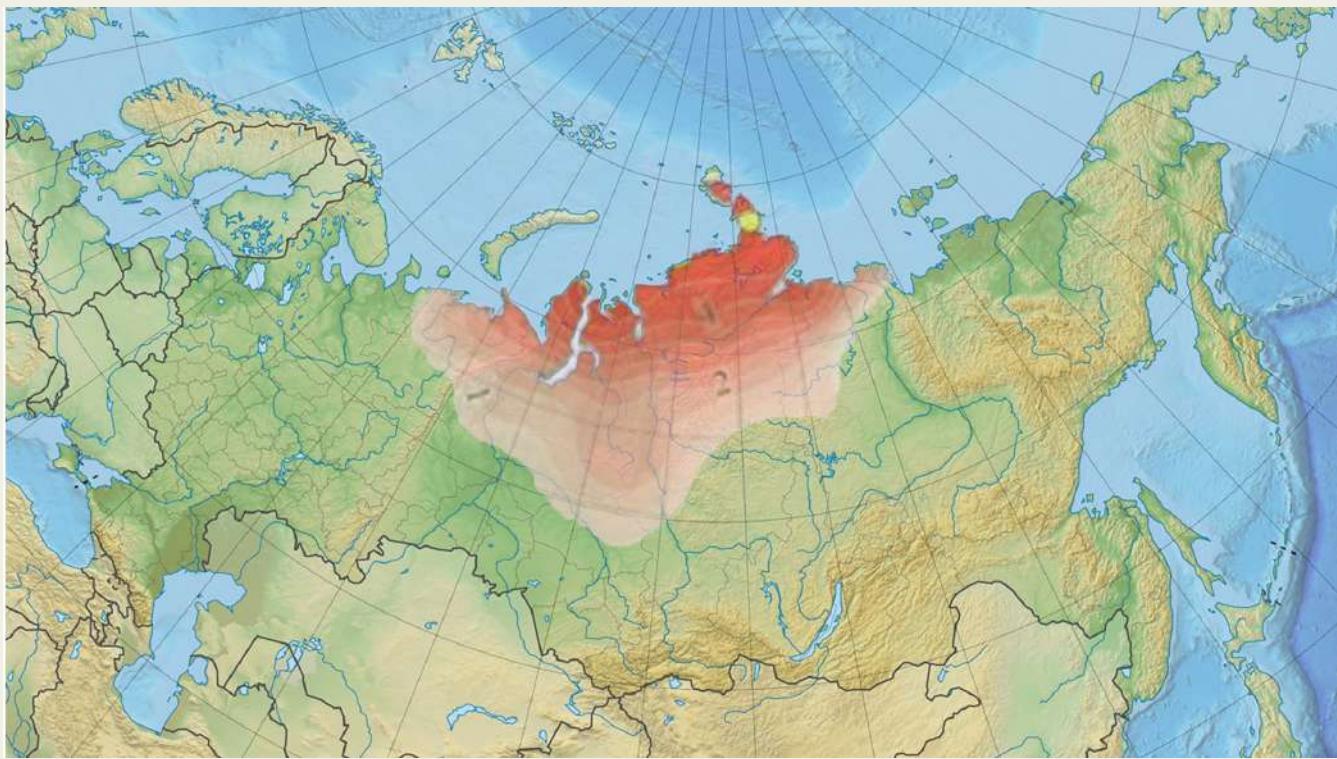
B. Mapa de anomalías de baja velocidad (indicativas de material más fundido) a una profundidad de 110 km, basado en la sismotomografía de Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023).



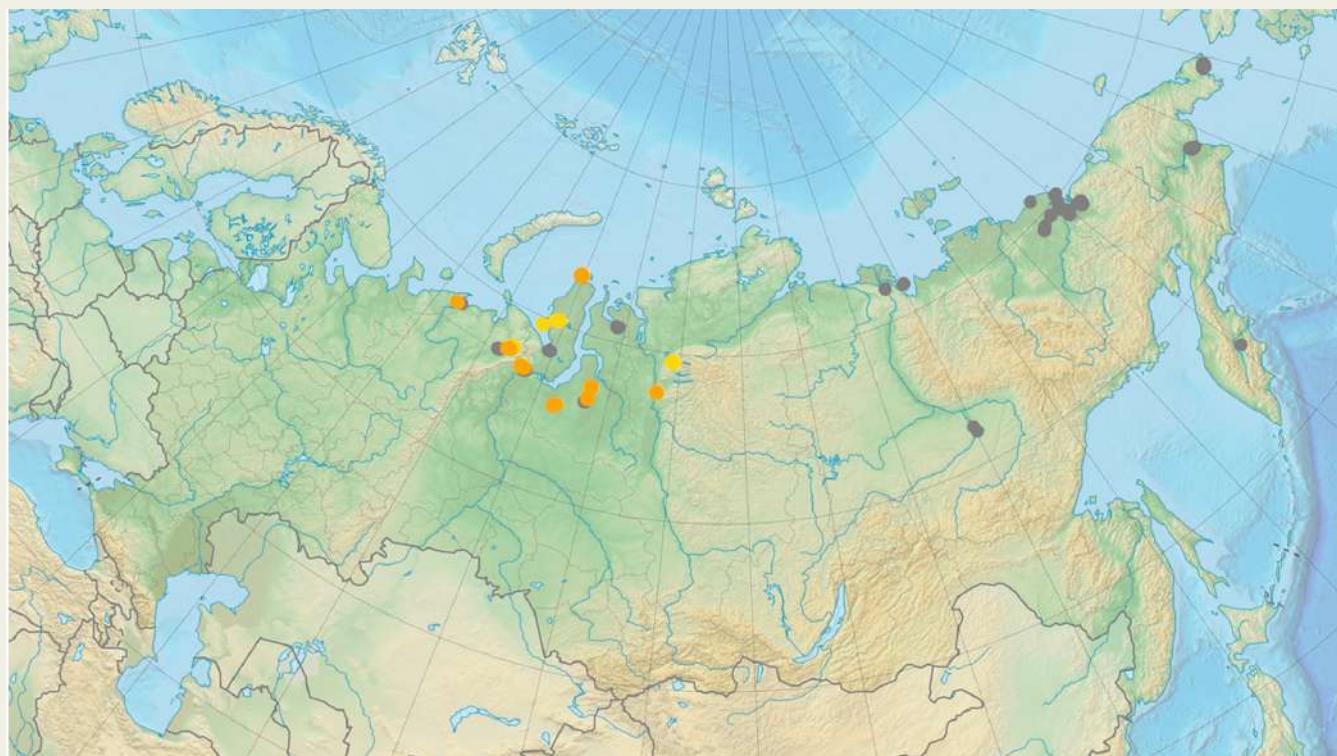
C. Nueva anomalía de calentamiento del suelo, según la comparación de tendencias entre los períodos 1976–2021 y 1976–2023, basada en los datos de Roshydromet (2021, 2023).



D. Tendencia de la temperatura media mensual del aire en enero durante el período 2001–2021, según los datos de Sherstyukov (2023).



E. Temperatura media estacional de diciembre de 2023 a febrero de 2024, según los datos de Roshydromet (2024)



F. Lugares con aumento en la profundidad del deshielo estacional del permafrost. Fuente de datos: <https://permafrost.su/>

Según la hipótesis, la sección ascendente de la pluma se encuentra al sur de las penínsulas de Gyda y Taimyr y presenta varias ramificaciones. El diámetro de la cabeza de la pluma se estima entre 1200 y 1500 km, mientras que la zona de dispersión de los flujos magmáticos podría alcanzar entre 2500 y 3000 km. Esta región abarca las estructuras tectónicas de la Placa de Siberia Occidental y el Cratón Siberiano Oriental. Actualmente, la cabeza de la pluma está afectando la base del Cratón Siberiano Oriental, extendiendo flujos magmáticos bajo su territorio. Este proceso

probablemente contribuye al aumento de la actividad sísmica en las zonas marginales de la placa, como en la región de Baikal e incluso en los Urales. La causa de estas anomalías específicamente en las partes marginales de las placas es la desestabilización de estas debido al ablandamiento de la astenosfera subyacente y a un leve levantamiento de la parte central del bloque siberiano de la corteza terrestre, es decir, las estructuras tectónicas de la Placa de Siberia Occidental y el Cratón Siberiano Oriental, junto con la estructura tectónica del sistema de plegamiento Verjoyansk-Chukotka.

Aumento de la actividad sísmica como indicador de la desestabilización de las placas debido a la actividad de la pluma magmática Siberiana

La metodología de análisis de la actividad sísmica incluyó la descarga y el procesamiento especializado de datos obtenidos del sitio web del Centro Sismológico Internacional (International Seismological Centre — ISC). Dado que los datos provienen de diversas fuentes de distintos países e institutos de investigación, y contienen diferentes tipos de magnitudes (Mw, Ms, Mb, ML, MD, etc.), se aplicó un algoritmo específico de procesamiento para seleccionar el tipo de magnitud más adecuado de entre las distintas fuentes (ver Apéndice 1). La idea principal del algoritmo de procesamiento fue seleccionar el valor mediano entre los tipos de magnitudes más comunes para cada evento sísmico, ya que diferentes fuentes reportaban valores y tipos de magnitud distintos en la base de datos del ISC. Este procesamiento generalmente conduce a una ligera reducción del valor de magnitud en comparación con el valor máximo reportado. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que el

algoritmo basado en la mediana proporciona un ajuste adecuado a la Ley de Gutenberg-Richter y otras correlaciones, además de coincidir de manera satisfactoria con los datos de otras bases sismológicas, como IRIS y USGS.

Los datos obtenidos mediante el algoritmo fueron filtrados según los tipos de eventos en la base de datos del ISC (ver Apéndice 1) para excluir eventos provocados por actividades humanas en operaciones mineras, como explosiones, posibles explosiones y golpes de roca, entre otros. Dado que en el territorio de Rusia existen numerosas empresas mineras, la base de datos del ISC fue comparada con los datos del Servicio Geofísico Unificado de la Academia de Ciencias de Rusia⁴⁴, actualizados a enero de 2025, en los que se enumera todas las explosiones e impactos de rocas registrados en Rusia. Estos eventos también fueron excluidos del análisis para garantizar que los datos finales no contengan eventos atribuibles a explosiones.

⁴⁴ Centro de Investigación Federal del Servicio Geofísico Unido de la Academia de Ciencias de Rusia <http://www.ceme.gsras.ru/zr/contents.html>

Consideremos los resultados del análisis de datos en la región de ascenso de la pluma magmática y en las partes marginales de los grandes bloques tectónicos sobre los cuales ejerce una influencia directa. Dado que el Cráton Siberiano se considera una plataforma relativamente estable y asísmica, la aparición incluso de un pequeño número de sismos dentro de sus límites se consideraría una anomalía.

En la fig. 44 se muestra la densidad de distribución de los sismos en el territorio de Rusia. En la región de Siberia, la mayor concentración

de sismos se observa, como era de esperar, en áreas plegadas, tales como: Cresta de Verjoyansk en el este, Dorsal de Gakkel en el norte, Montes Urales en el oeste, Región de Altái-Sayán en el sur. Además, se han registrado eventos aislados en el interior de Siberia: varios sismos de magnitud aproximada de 4,0 han sido detectados al sur de la península de Taimyr. Analicemos con más detalle la dinámica de los sismos en zonas locales dentro del área de la pluma Siberiana y regiones adyacentes.

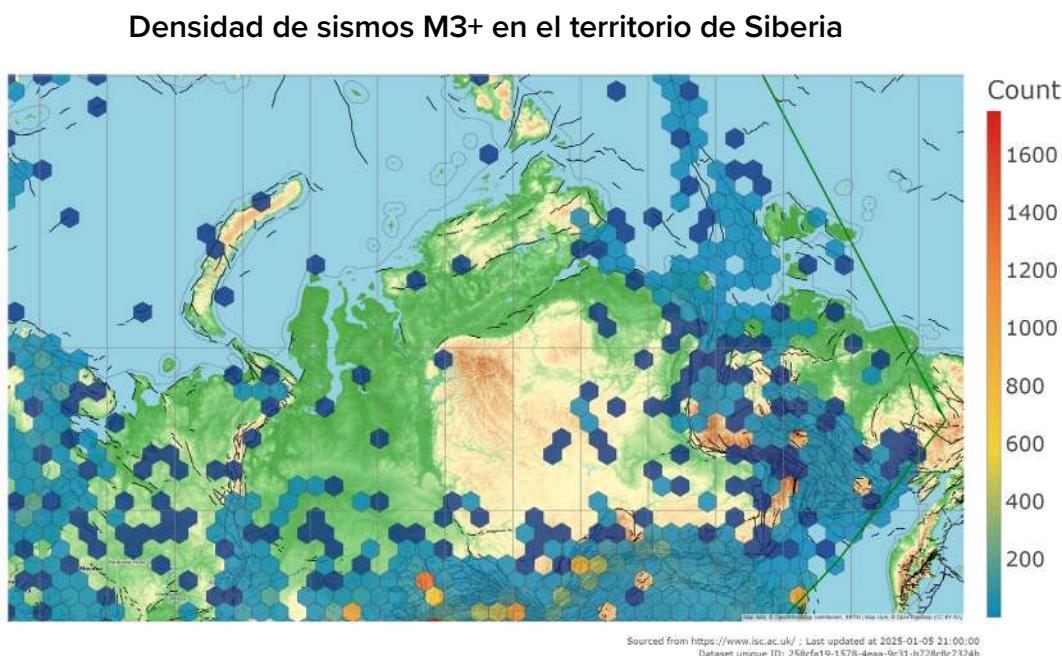


Fig. 44

Densidad de sismos de magnitud 3,0 o superior en el territorio de Siberia desde 1990 hasta 2024.

Fuente de datos: ISC

Según las estructuras geológicas, se han identificado regiones donde la pluma mantélica puede ejercer diferentes influencias (Fig. 45). Se ha seleccionado: El área principal de la pluma, donde su impacto puede estar relacionado con la intrusión y presión del magma, así como con

la influencia de la fase fluida (gases magmáticos). En las áreas que se encuentran al margen de la Plataforma de Siberia Oriental y la Placa de Siberia Occidental, donde es más probable que la pluma afecte la sismicidad debido a la desestabilización de los bloques densos de la corteza terrestre.

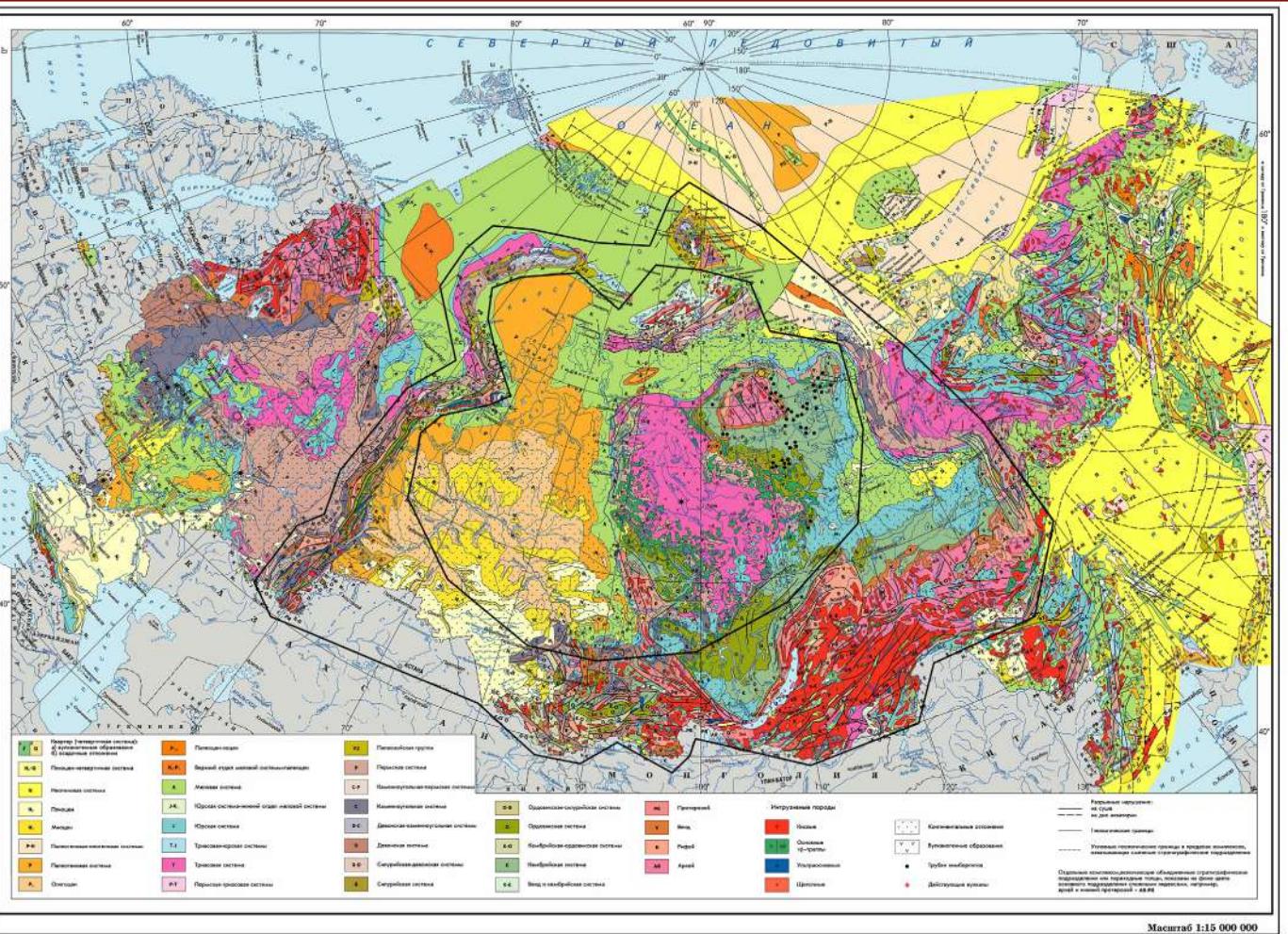


Fig. 45

Polígono delimitado según las estructuras geológicas en el área de intrusión y dispersión de la pluma Siberiana (polígono negro interno) para el análisis de la sismicidad. El polígono negro externo corresponde a la zona de efectos marginales de la presión de la pluma Siberiana sobre las placas.

Analicemos los sismos en la región central de la pluma Siberiana. En la fig. 46 se muestra un mapa de la ubicación de los sismos de magnitud 3,0 o superior. Se han registrado sismos en el sur de la península de Taimyr. Especialmente preocupante es el hecho de que recientemente, en agosto y septiembre de 2024, en esta región ocurrieron dos sismos de magnitud 3,5 y 3,8,

respectivamente. Además, se han detectado sismos de magnitudes similares en otras zonas dentro de la localización de la cabeza de la pluma Siberiana, lo que representa una tendencia alarmante: sur de la península de Gyda (M 3,5) y península de Yamal (M 3,7 y M 4,2) a una profundidad de 10 km. Esta situación será analizada en detalle más adelante.

Sismos M3+, región de la pluma Siberiana

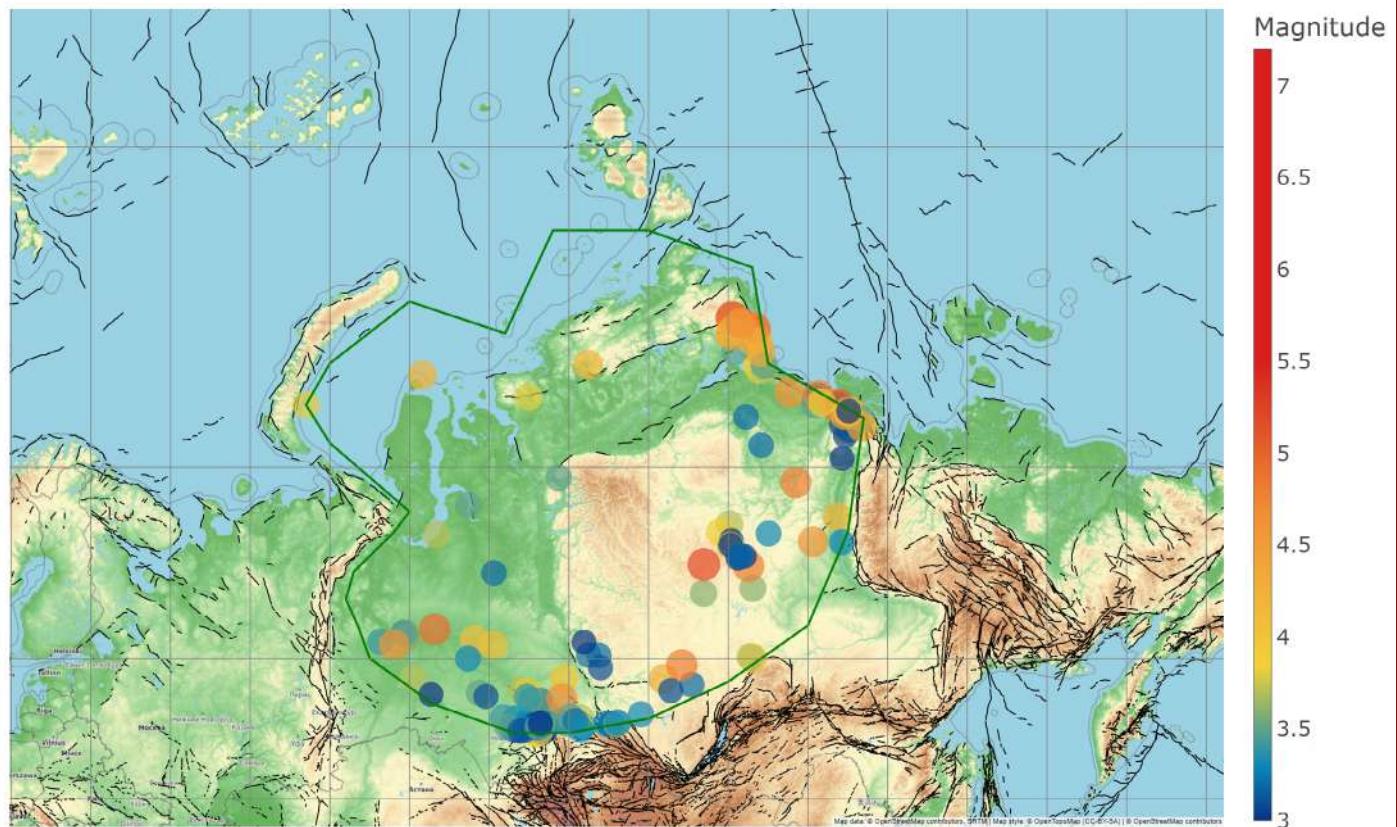


Fig. 46

Mapa de sismos con una magnitud de 3,0+ en la región de la pluma Siberiana desde 1990 hasta 2024.

Fuente de datos: ISC

En la región delimitada de la pluma Siberiana, entre 1990 y 2024, se han registrado un total de 205 sismos con una magnitud de 3,0 o superior. En 1995, se observó un aumento en la cantidad de sismos (Fig. 47), lo que coincide con la tendencia global de aumento de la sismicidad en 1995, asociada con una activación magmática. Desde 2007, se ha registrado un incremento significativo en la cantidad de sismos, seguido de una disminución gradual de

la actividad sísmica. A partir de 2021, el número de sismos volvió a aumentar bruscamente, superando los valores anuales previos. Por lo tanto, en la región de la pluma Siberiana, se observa un patrón oscilatorio en el aumento de la actividad sísmica. En los últimos años, la cantidad de eventos sísmicos registrados es notablemente mayor en comparación con los valores históricamente típicos para esta área.

Sismos M3+, región de la pluma Siberiana

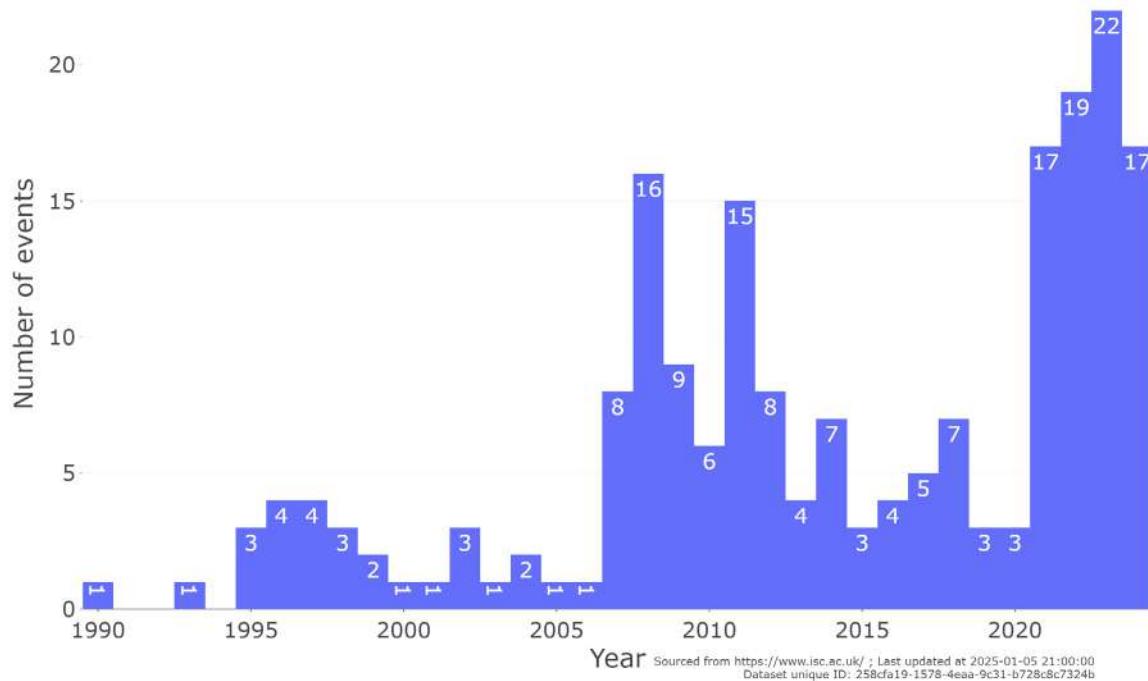


Fig. 47

Número de sismos con una magnitud de 3,0 o superior en la región de la pluma Siberiana desde 1990 hasta 2024.

Fuente de datos: ISC

Después del terremoto de magnitud 5,0 en 1990, se observó una disminución gradual tanto en la magnitud como en la cantidad de sismos (Fig. 48). Entre 1990 y 2007, solo se registraron tres sismos con una magnitud superior a 4,5. A partir de 2007, se ha detectado un aumento progresivo en la magnitud de los sismos. Por

primera vez en la historia de las observaciones, a partir de 2019, han aparecido terremotos de magnitud 5,1 y 5,2. Todos los sismos de magnitud 4,5 o superior están ubicados en el borde de la pluma (Fig. 49), y algunos de ellos se encuentran en áreas estables, donde no existen fallas conocidas.

Sismos M3+, región de la pluma Siberiana

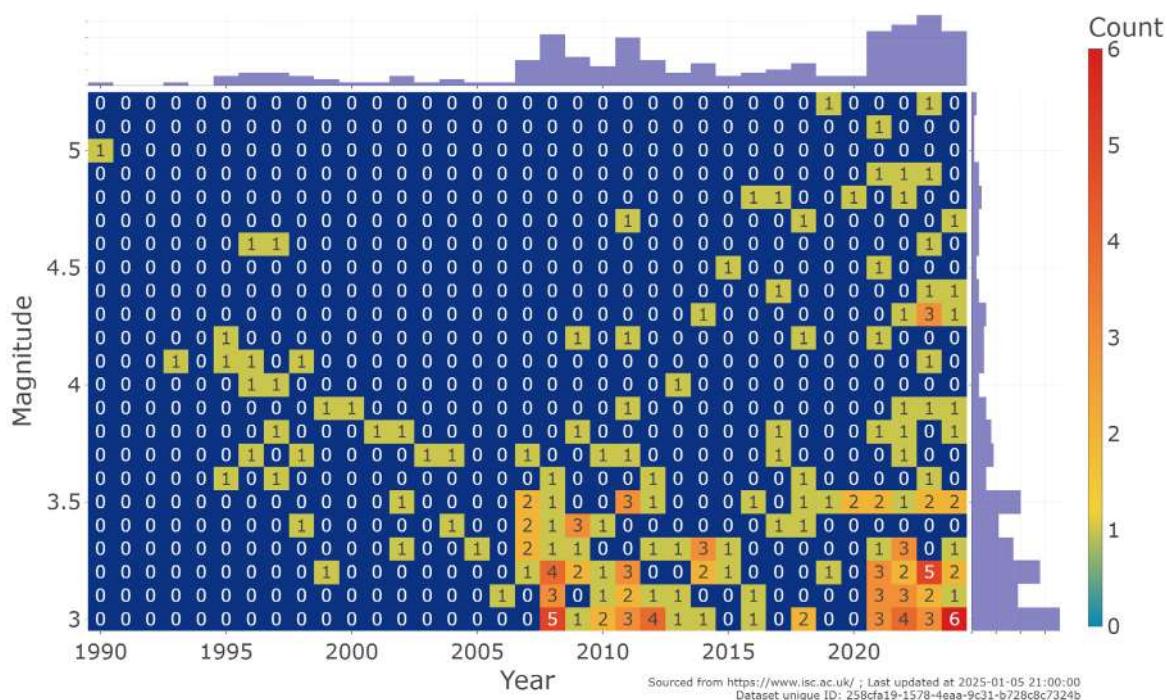


Fig. 48

Distribución de los sismos ocurridos en la región de la pluma Siberiana entre 1990 y 2024, según su magnitud.

Fuente de datos: ISC

Sismos M4.5+, región de la pluma Siberiana

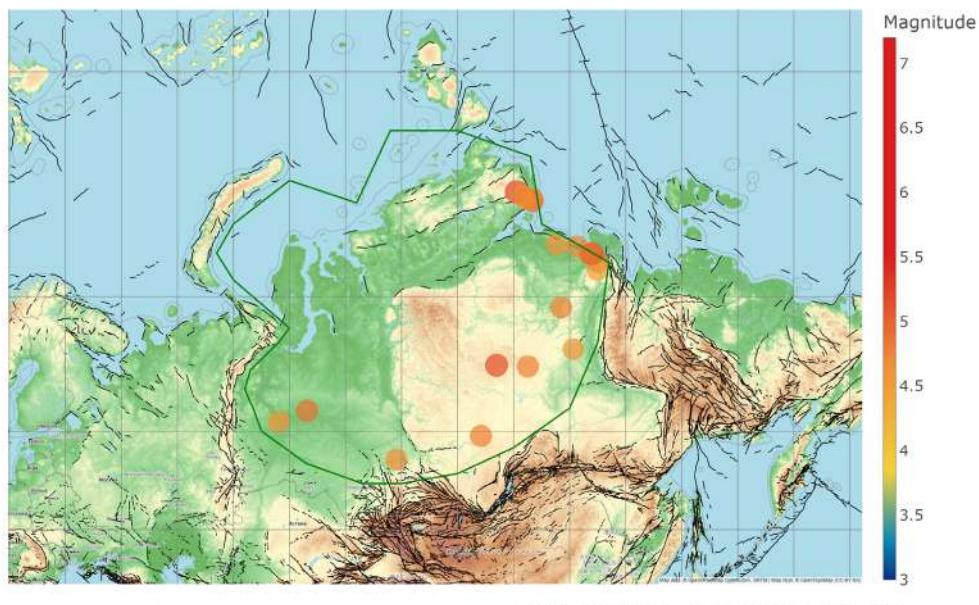


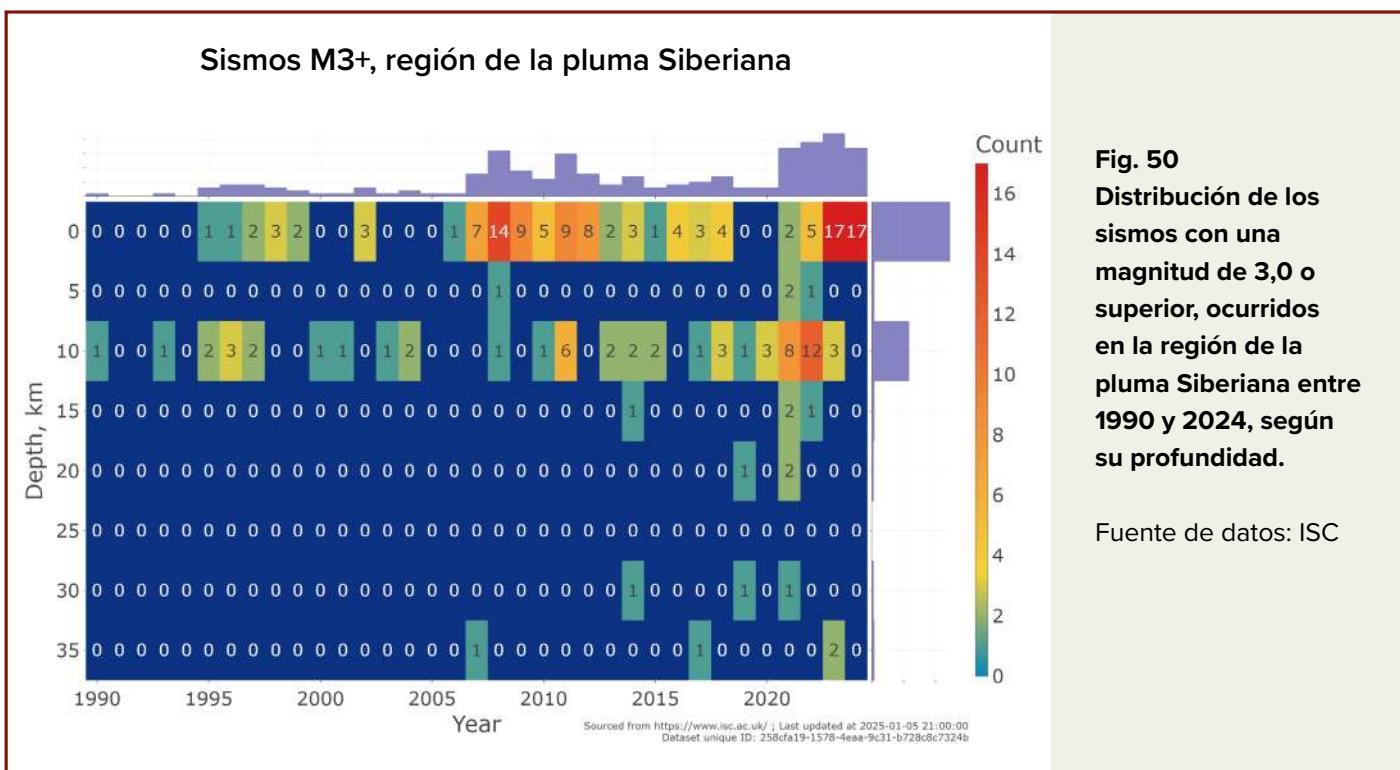
Fig. 49

Mapa de sismos con una magnitud de 4,5 o superior en la región de la pluma Siberiana desde 1990 hasta 2024.

Fuente de datos: ISC

También en 2007 se registró por primera vez un sismo de magnitud 3,7 a una profundidad de 33 km, cerca del límite de la discontinuidad Mohorovičić (Moho) (Fig. 50). A partir de 2014, los sismos en la base de la corteza terrestre,

a profundidades de 30–35 km, comenzaron a ocurrir con mayor frecuencia, alcanzando magnitudes de hasta 5,0. Todos estos eventos sísmicos se ubicaron en la periferia del presunto foco de la pluma.



El análisis de los sismos en la región donde se presume la existencia de la pluma Siberiana muestra un aumento oscilatorio de la sismicidad: Incremento en la cantidad de sismos. Aumento en sus magnitudes. Aparición de sismos a mayores profundidades. Esto indica que la placa tectónica está experimentando deformaciones bajo la influencia de una colossal presión magmática desde abajo. La progresión de estos procesos conducirá inevitablemente en un futuro próximo a la erupción de la pluma Siberiana por las siguientes razones.

El basamento del Cráton Siberiano Oriental está cementado por rocas magmáticas y metamórficas, que han creado una corteza densa y monolítica, formada como resultado de las erupciones ocurridas hace 250 millones de años. La aparición de terremotos fuertes, con

magnitudes de 7,0 o superiores, en esta región indicaría que las estructuras de la plataforma del Cráton Siberiano están experimentando deformaciones que superan el límite de resistencia de las rocas. Para comprender cómo el monolítico Cráton Siberiano podría fracturarse bajo la presión de la pluma, se puede hacer una analogía con el vidrio que comienza a agrietarse justo antes de estallar en fragmentos.

En este momento, para comprender con mayor precisión la situación real del avance de la pluma y el estado de resistencia de la corteza terrestre en la región de la pluma magmática Siberiana, es crucial la instalación de sensores sísmicos adicionales, preferiblemente en perforaciones a varios kilómetros de profundidad.

Esto permitiría realizar un análisis sismotomográfico detallado de la corteza terrestre y el manto, además de posibilitar un monitoreo continuo de la posición y actividad de la pluma (ver sección «Escenario 3. Desgasificación planificada y controlada»).

Se debe prestar especial atención a la distribución de los sismos según su profundidad en la región de la pluma Siberiana y sus zonas

marginales (Fig. 51). Los sismos a profundidades cercanas al límite de la discontinuidad Mohorovičić (Moho), es decir, más de 30 km, así como dentro del manto, ocurren principalmente en regiones plegadas. Sin embargo, es notable que estos eventos rodean la zona donde se presume la presencia de la pluma Siberiana, lo que sugiere su posible influencia en la actividad sísmica de la región.

Sismos M3.5+, región de la pluma Siberiana

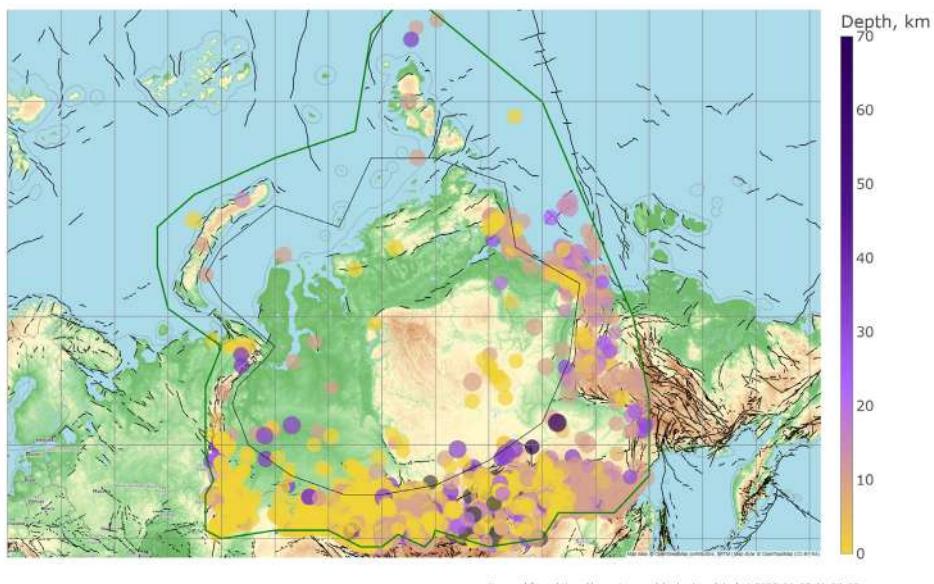


Fig. 51
Mapa de sismos con una magnitud de 3,5 o superior en la región de la pluma Siberiana desde 1990 hasta 2024. La escala de colores representa la profundidad de los eventos sísmicos.

Fuente de datos: ISC

Analicemos la actividad sísmica exclusivamente en las áreas que se encuentran al margen de la pluma Siberiana. Geológicamente, estas áreas corresponden a cinturones plegados, que son regiones sísmicamente activas, donde la sismicidad puede estar causada tanto por movimientos tectónicos como por la influencia de la pluma magmática. El gráfico de la cantidad de sismos muestra un patrón mixto, resultado de la superposición de distintos factores sísmicos (Fig. 52). En ciertos años, se observan aumentos significativos de actividad sísmica. Para una comprensión más precisa de la naturaleza de estos procesos, es necesario analizar cada región por separado.

Al analizar la zona de las estructuras plegadas de Verjoyansk y las fallas en el fondo del mar de Láptev (Fig. 53), se observa que hubo fuertes aumentos de actividad sísmica con sismos de magnitud 3,0 o superior en 2013 y en 2021–2022 (Fig. 54). Estos aumentos son característicos de etapas de intrusión magmática, que provocan rupturas significativas en la continuidad de la corteza terrestre y la liberación de la fase fluida (gases magmáticos) a través de fracturas y fallas cercanas. Este tipo de actividad suele ir acompañado de: aumento en la cantidad de sismos de baja magnitud, aparición de enjambres sísmicos, y a veces series de enjambres sísmicos en algunos casos.

Sismos M3+ en las regiones periféricas de la pluma Siberiana

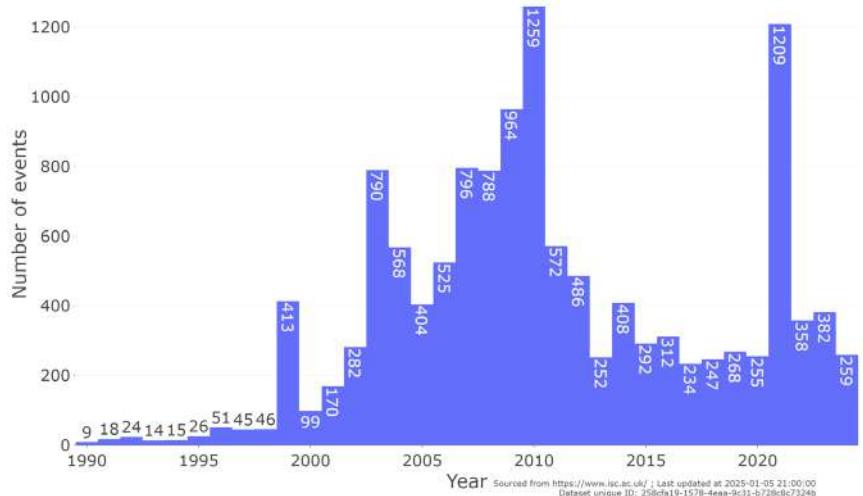


Fig. 52

Número de sismos con una magnitud de 3,0 o superior en las zonas marginales de la pluma Siberiana desde 1990 hasta 2024. Se excluyeron los sismos dentro del polígono (ver Fig. 47).

Fuente de datos: ISC

Densidad de sismos M3+, parte noreste

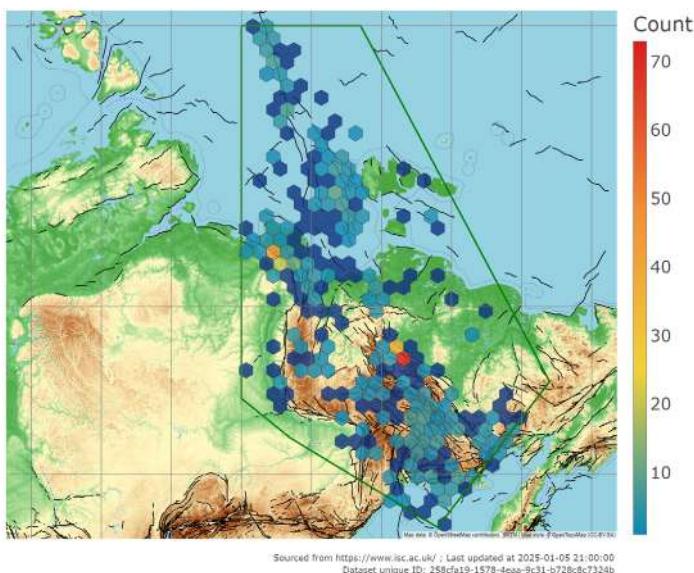


Fig. 53

Densidad de los sismos de magnitud a partir de 3,0 en el área seleccionada del borde noreste del bloque siberiano de la corteza terrestre desde 1990 hasta 2024. Las líneas negras indican las fallas.

Fuente de datos: ISC

Densidad de sismos M3+, parte noreste

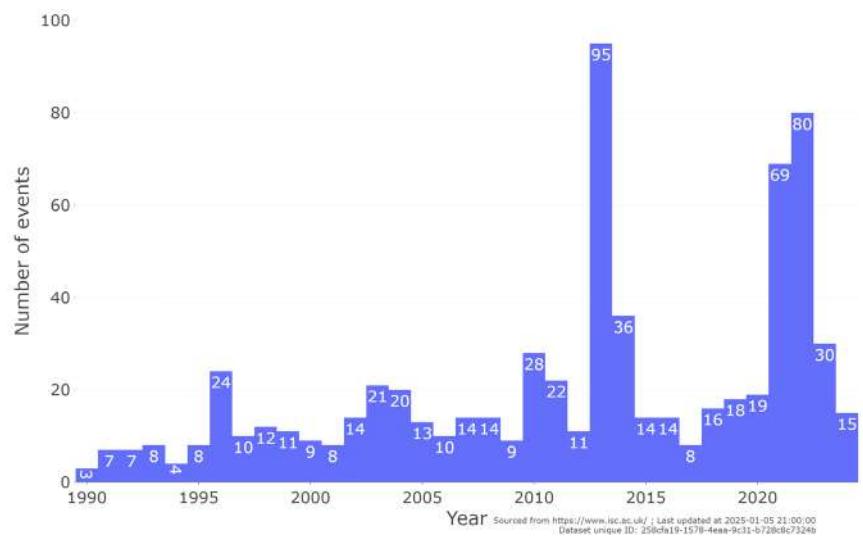


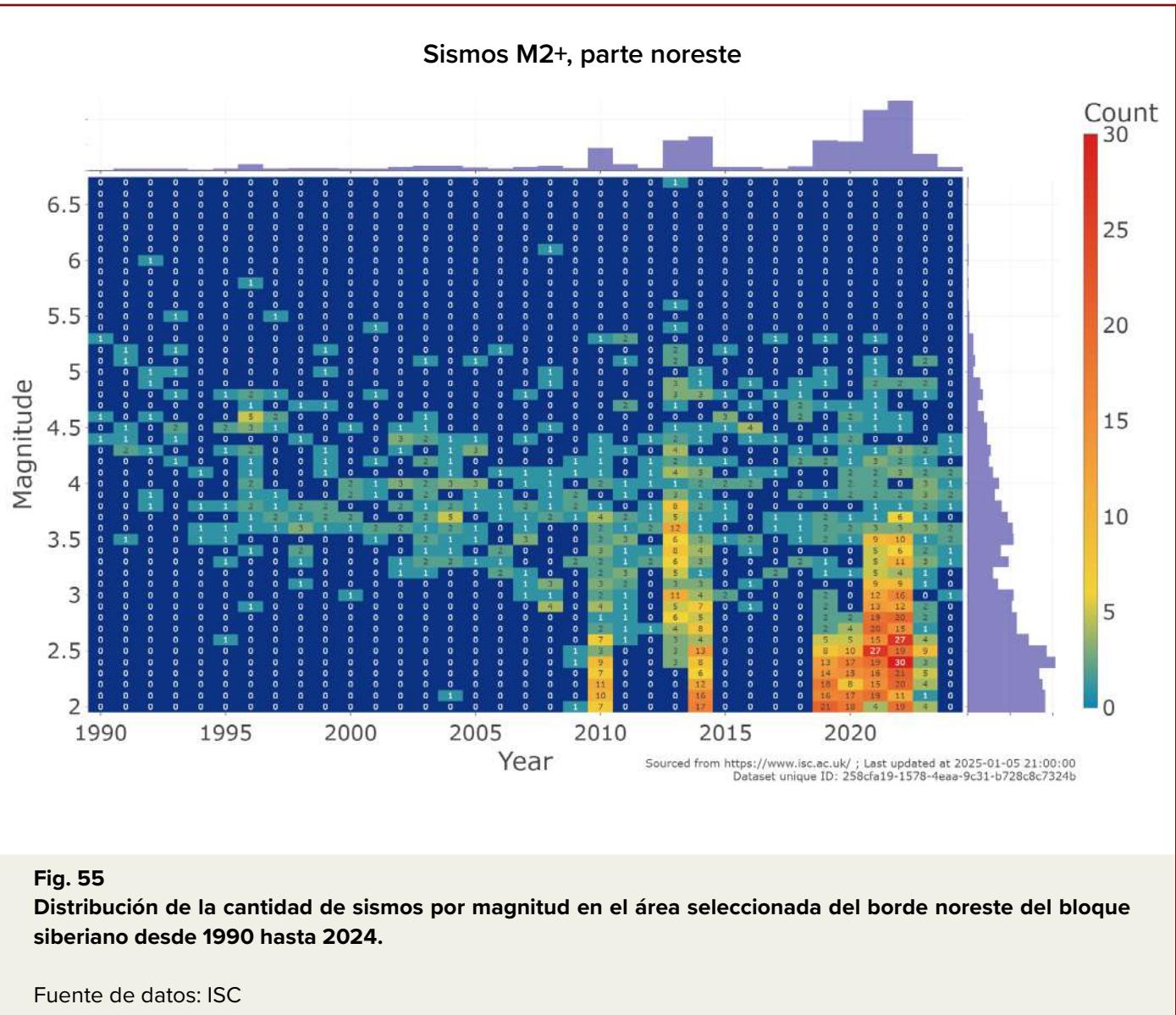
Fig. 54

Gráfico del número de sismos de magnitud 3,0 y superior en el área seleccionada del borde noreste del bloque siberiano desde 1990 hasta 2024.

Fuente de datos: ISC

El estudio de las magnitudes de los sismos en esta zona muestra un aumento en la cantidad de sismos con magnitudes de 2,0 a 3,5 en 2010, 2013-2014 y un incremento significativo de su número desde 2019 (fig. 55). A partir de 2019, también se observa un aumento considerable en la cantidad de sismos que

afectan la corteza terrestre casi hasta su base, alcanzando profundidades de hasta 35 km (fig. 56). En 2013, por primera vez en esta región, se registra un terremoto de magnitud 6,7, lo que indica claramente una fase prolongada de acumulación de tensión o la liberación de fluidos magmáticos acumulados.



Analicemos por separado un grupo de sismos en dirección sureste de la península de Taimyr (fig. 57).

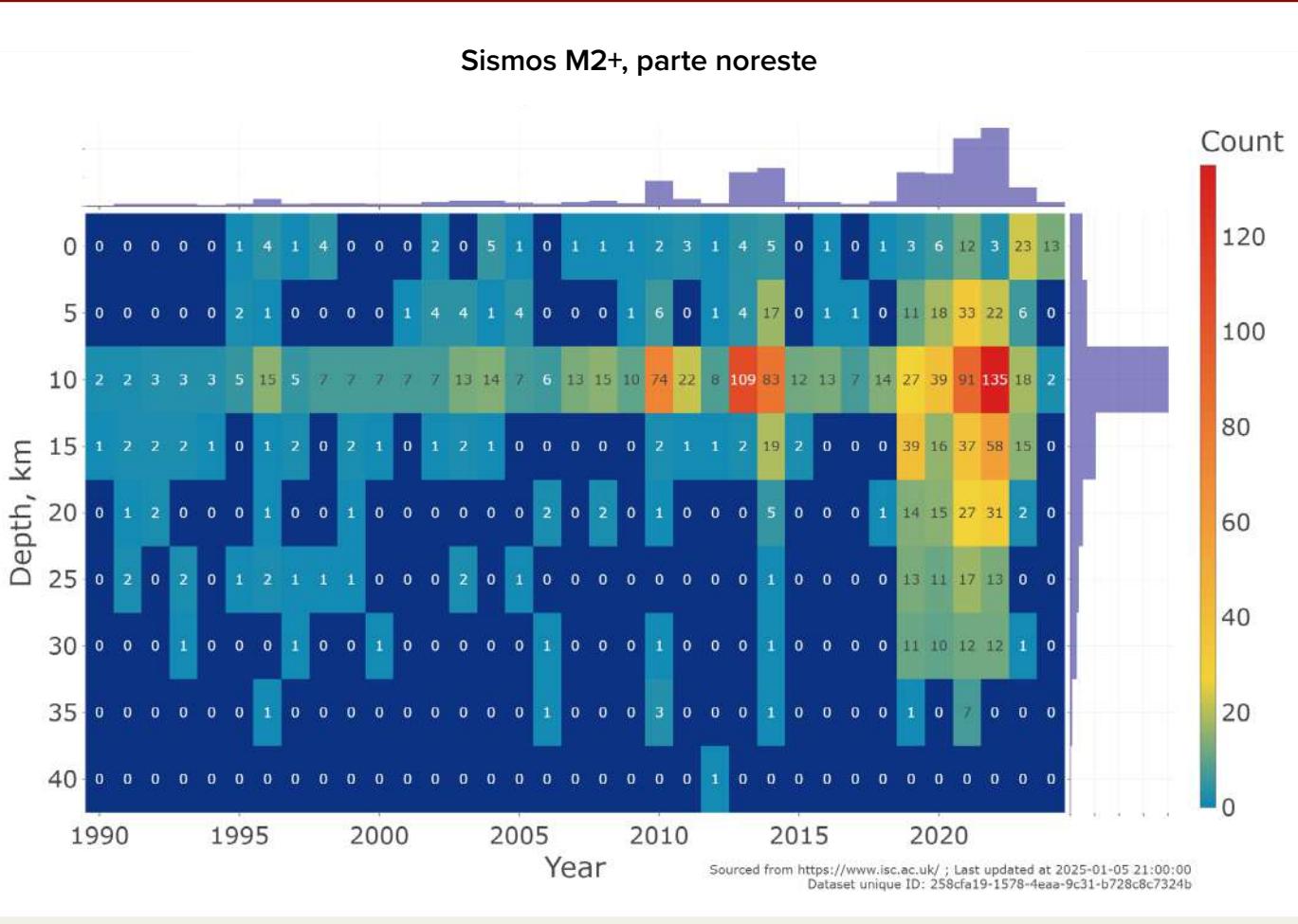


Fig. 56

Distribución de la cantidad de sismos de magnitud 2,0 y superior por profundidad en el área seleccionada del borde noreste del bloque siberiano desde 1990 hasta 2024.

Fuente de datos: ISC

Sismos de M2+, noreste de la península de Taimyr

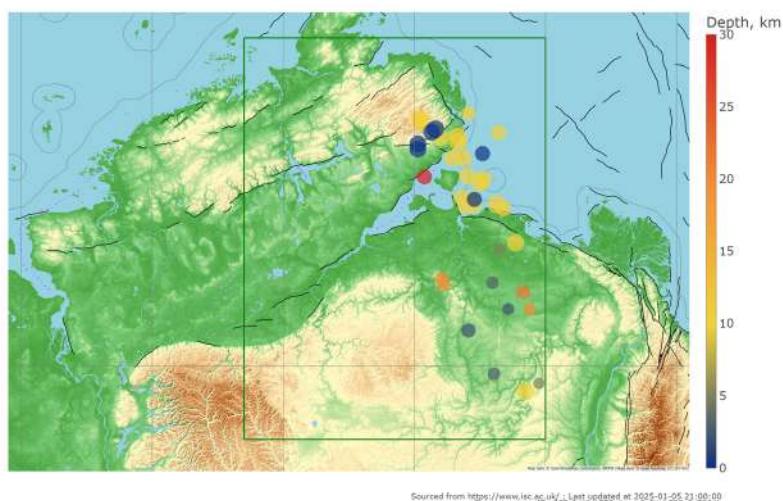


Fig. 57

Mapa de distribución de los sismos de magnitud a partir de 2,0 en el área seleccionada, al noreste de la península de Taimyr, desde 1990 hasta 2024.

Fuente de datos: ISC

En 2019-2020, también se observó un aumento en la actividad sísmica de magnitudes pequeñas y medias en esta zona (fig. 58, 59).

Sismos de M3+, noreste de la península de Taimyr

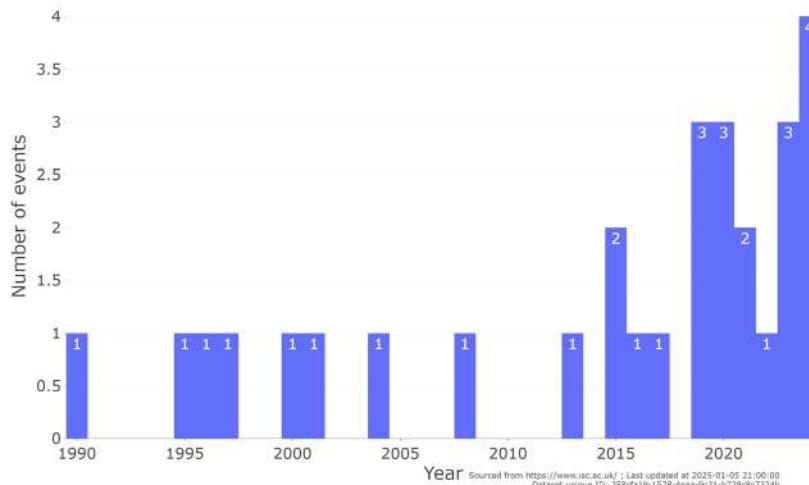


Fig. 58

Gráfico del número de sismos de magnitud 3,0 y superior en el área seleccionada, al noreste de la península de Taimyr.

Fuente de datos: ISC

Sismos de M2+, noreste de la península de Taimyr

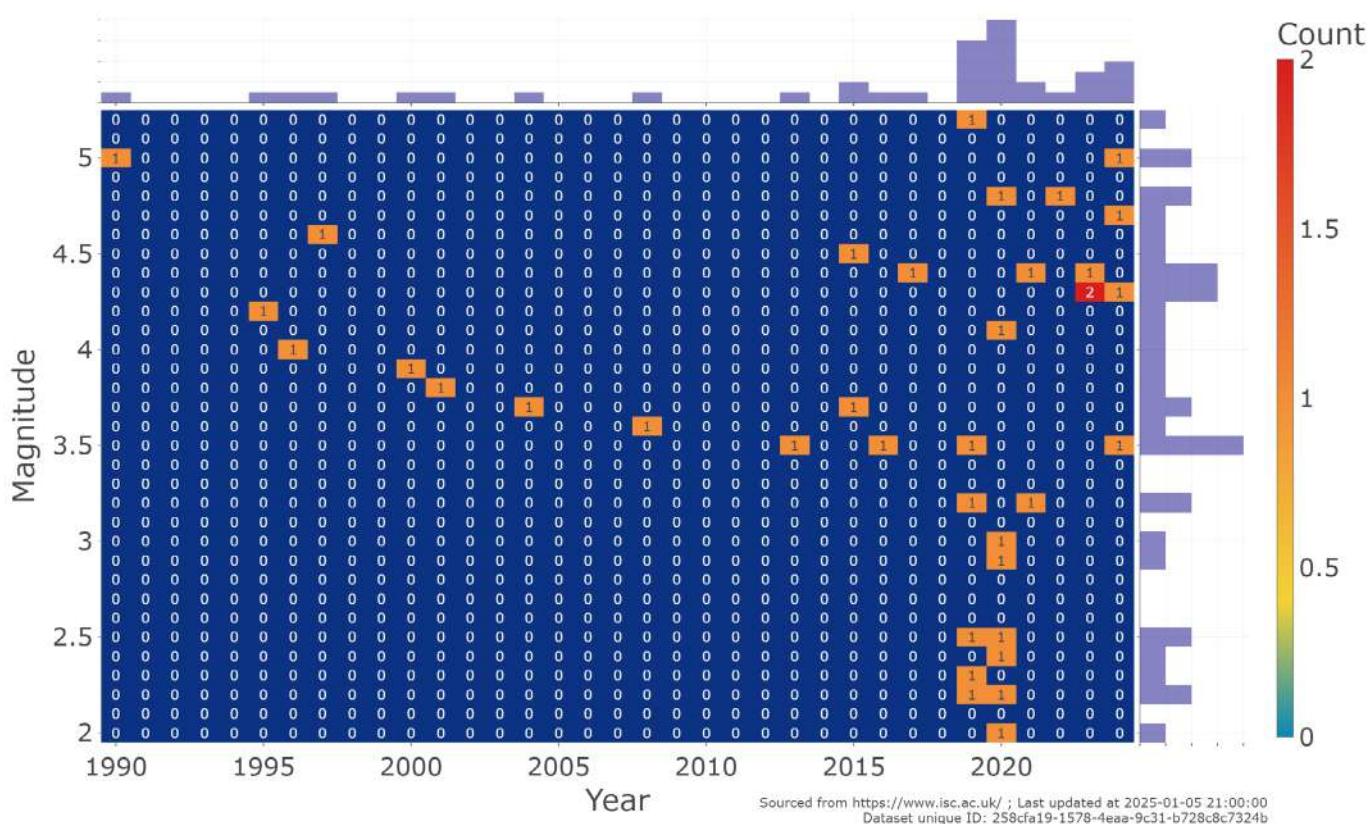


Fig. 59

Distribución de la cantidad de sismos por magnitud en el área seleccionada, al noreste de la península de Taimyr, desde 1990 hasta 2024.

Fuente de datos: ISC

También en 2019-2020 se observa un aumento en la profundidad de los sismos, alcanzando la base de la corteza terrestre (fig. 60), en los mismos períodos de tiempo que en la zona de la estructura plegada de Verjoyansk. Cabe destacar que esta zona se encuentra bajo la influencia de la cabeza de la pluma siberiana y, a pesar del reducido número de sismos, presenta una tendencia similar al aumento en la profundidad y la cantidad de eventos sísmicos, al igual que en las estructuras plegadas de Verjoyansk, pero solo a partir de 2019.

La parte sur del área en estudio incluye la estructura plegada de Altái-Sayán y la región del Baikal (fig. 61). Se trata de una zona tectónicamente activa y sísmicamente dinámica. Aquí se observa un aumento en la cantidad de sismos en 1999 y 2021 (fig. 62). A partir de 2007, la magnitud de los sismos comienza a aumentar, alcanzando incluso una magnitud de 6,8 en 2021 (fig. 63).

Sismos de M2+, noreste de la península de Taimyr

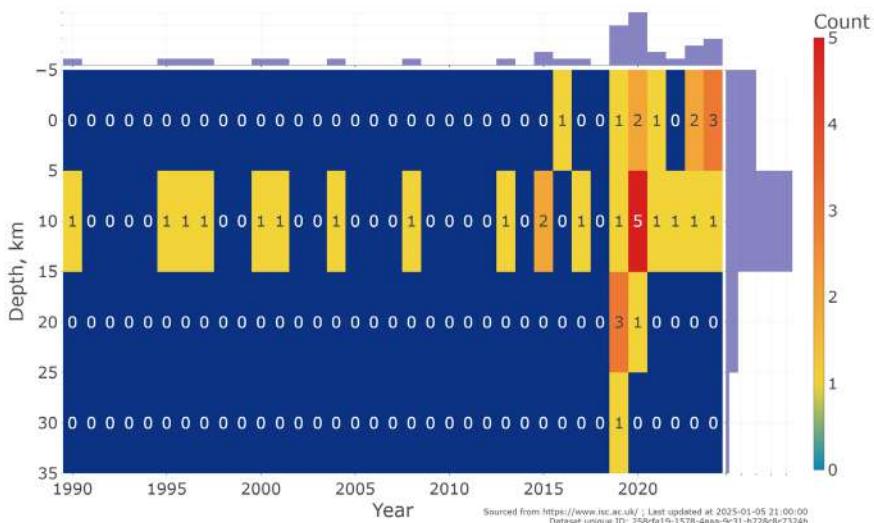


Fig. 60

Distribución de la cantidad de sismos de magnitud 2,0 y superior por profundidad en el área seleccionada, al noreste de la península de Taimyr.

Fuente de datos: ISC

Sismos M3+, parte sur de Siberia Oriental

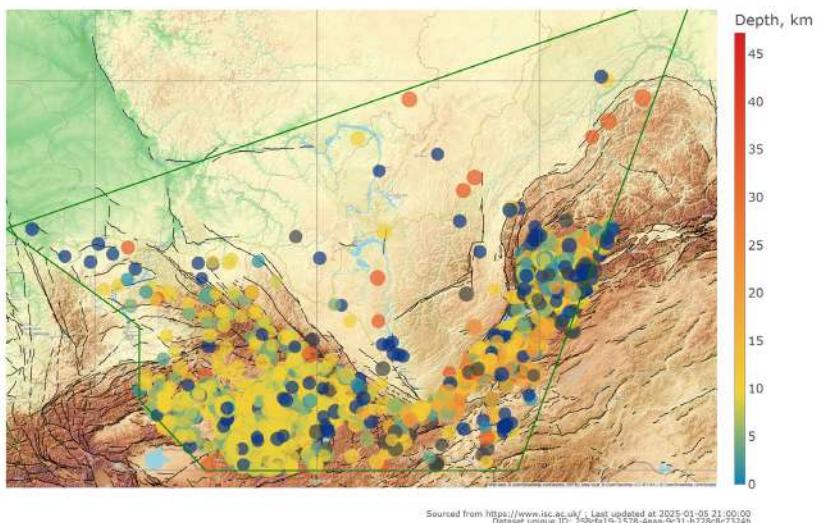


Fig. 61

Mapa de las ubicaciones de los epicentros de sismos de magnitud 3,0 y superior registrados desde 1990 hasta 2024 en el área seleccionada, en la parte sur de Siberia Oriental.

Fuente de datos: ISC

Sismos M3+, parte sur de Siberia Oriental

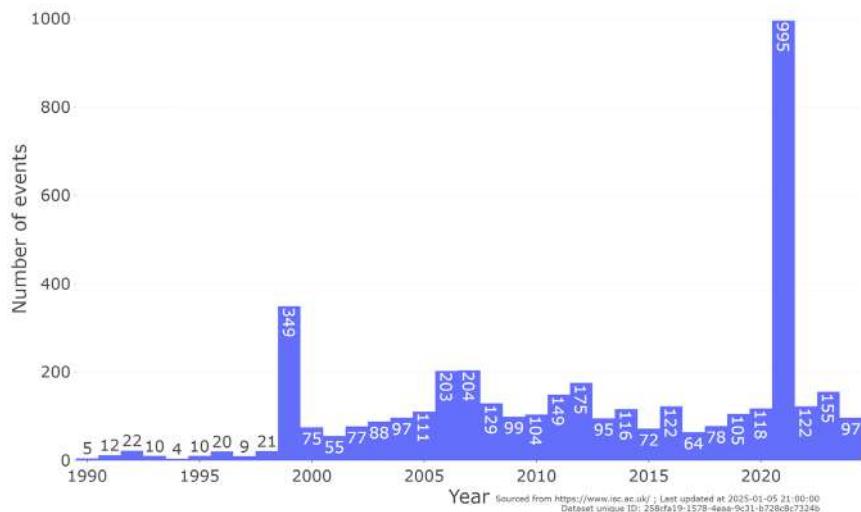


Fig. 62

Cantidad de sismos de magnitud 3,0 y superior en el territorio de la parte sur de Siberia Oriental.

Fuente de datos: ISC

Sismos M3+, parte sur de Siberia Oriental

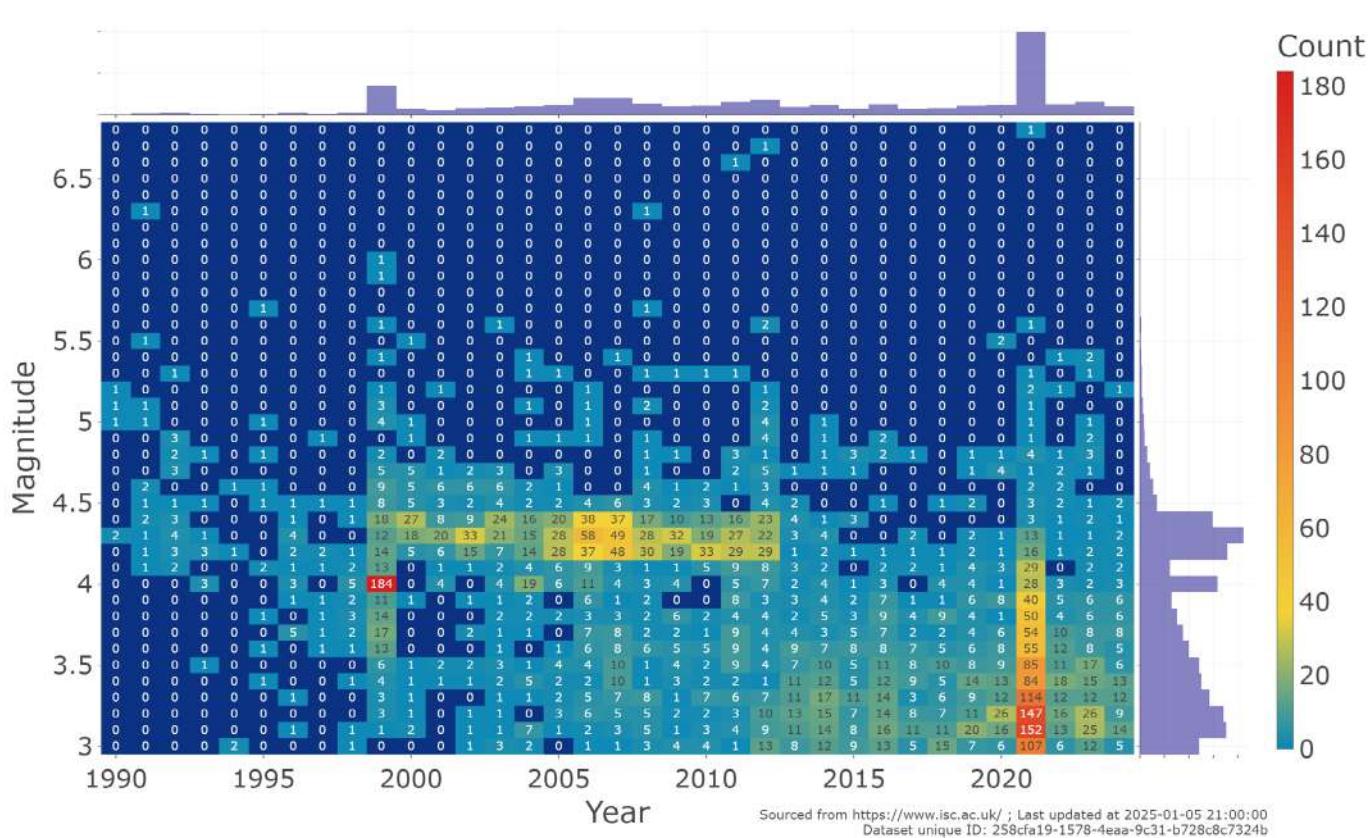


Fig. 63

Distribución de los sismos por magnitud en el área seleccionada de la parte sur de Siberia Oriental desde 1990 hasta 2024.

Fuente de datos: ISC

Es importante señalar la aparición de sismos mantélicos bajo el Cratón Siberiano. Ya en 1998 se registró un sismo de magnitud 3,3 a una profundidad de 211 km en la región de la sínclisis de Viliui, lo que resultó ser un hecho inesperado. Sin embargo, un evento aún más excepcional fue el sismo de magnitud 5,1 a una profundidad de 627 km en 2023 en la misma región (fig. 64).

La manifestación de sismicidad de foco profundo bajo un bloque cortical estable de plataforma es un fenómeno único. Tradicionalmente, se supone que este tipo de sismos intramantélicos ocurre en las llamadas zonas de subducción. Sin embargo, la zona de subducción más cercana se encuentra a miles de kilómetros de distancia y no puede ejercer influencia directa en esta actividad sísmica.

Los autores de este informe consideran que las causas de los terremotos de foco profundo son explosiones intramantélicas de enorme

potencia, que ocurren cuando los flujos de magma relativamente más calientes entran en contacto con flujos relativamente más fríos. Según el modelo de sismotomografía, en la zona donde ocurrieron ambos terremotos de foco profundo se observan anomalías en las velocidades de las ondas sísmicas, correspondientes a flujos relativamente más viscosos y líquidos, lo que probablemente refleja sus diferencias de temperatura.

Por lo tanto, estos dos sismos mantélicos se manifestaron en los puntos de contacto entre flujos mantélicos relativamente fríos y relativamente calientes (fig. 65), lo que provocó la liberación de una gran cantidad de energía, generando ondas acústicas que fueron registradas por los sismómetros como sismos. Esto indica claramente una importante actividad de flujo del manto en la zona.

Localización de sismos profundos en Siberia

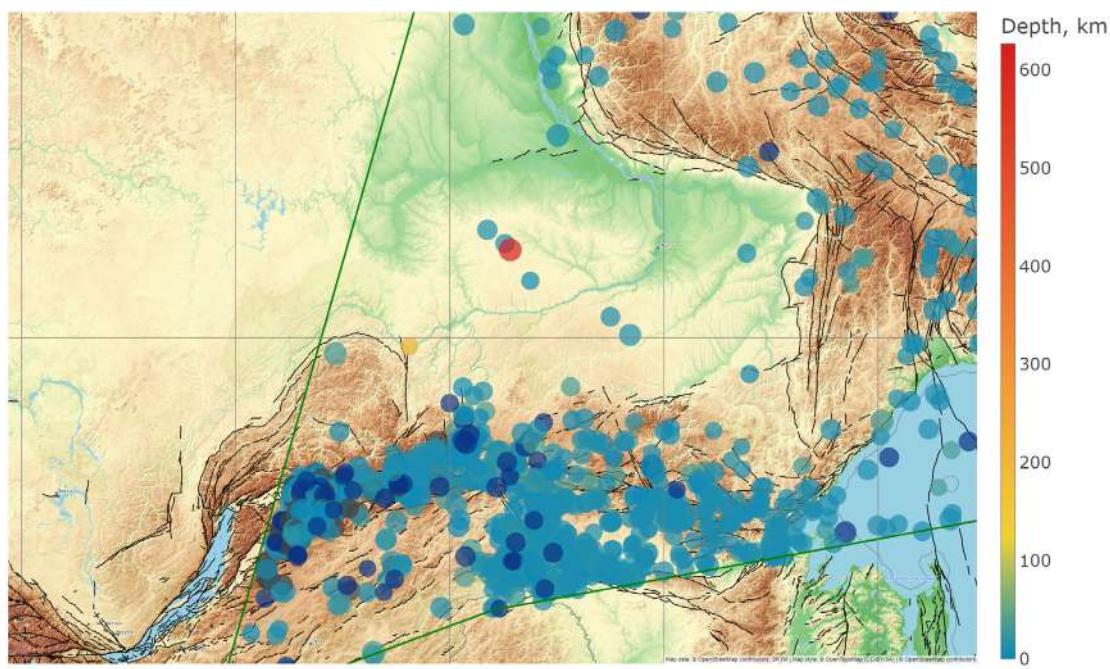
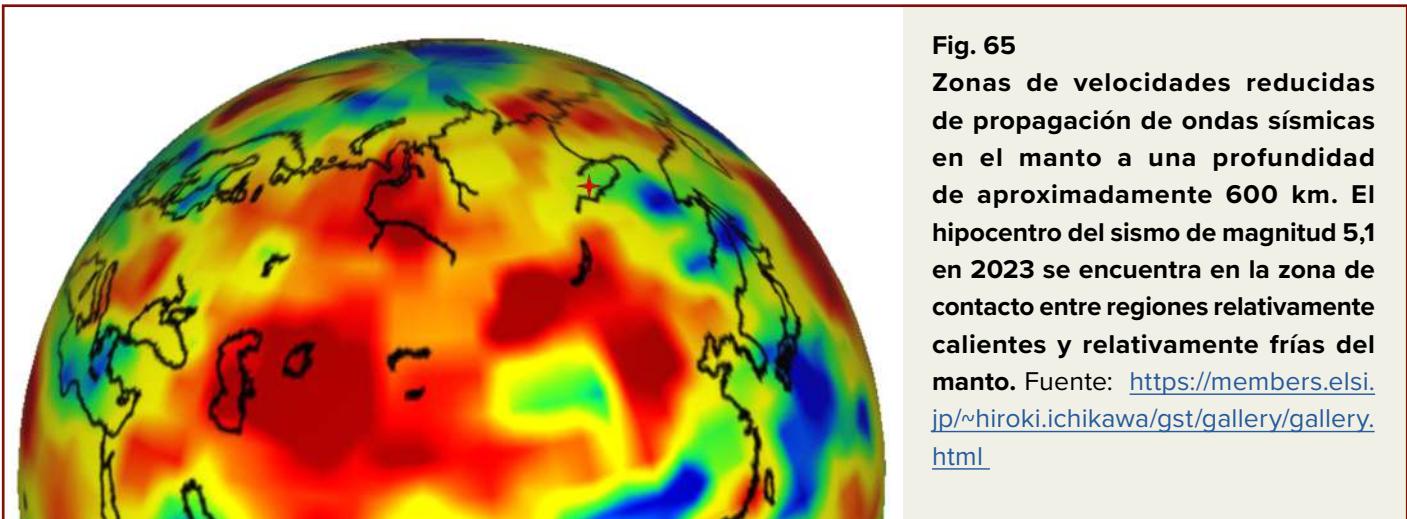


Fig. 64

El mapa muestra el epicentro del terremoto de foco profundo de magnitud 5,1 a una profundidad de 627 km (marcador rojo) bajo la plataforma siberiana en 2023 y el de magnitud 3,3 a una profundidad de 211 km en 1998 (marcador amarillo). Fuente de datos: ISC



La oscilación de las partes periféricas del bloque siberiano provoca un aumento de la actividad sísmica en la región de los Urales. Los datos para el análisis fueron filtrados teniendo en cuenta los estallidos de roca inducidos por la actividad minera. Además, se seleccionó

una magnitud a partir de 3,5 para garantizar la exclusión de eventos relacionados con la actividad humana (fig. 66, 67). Por lo tanto, el aumento ondulatorio observado en la sismicidad refleja procesos naturales.

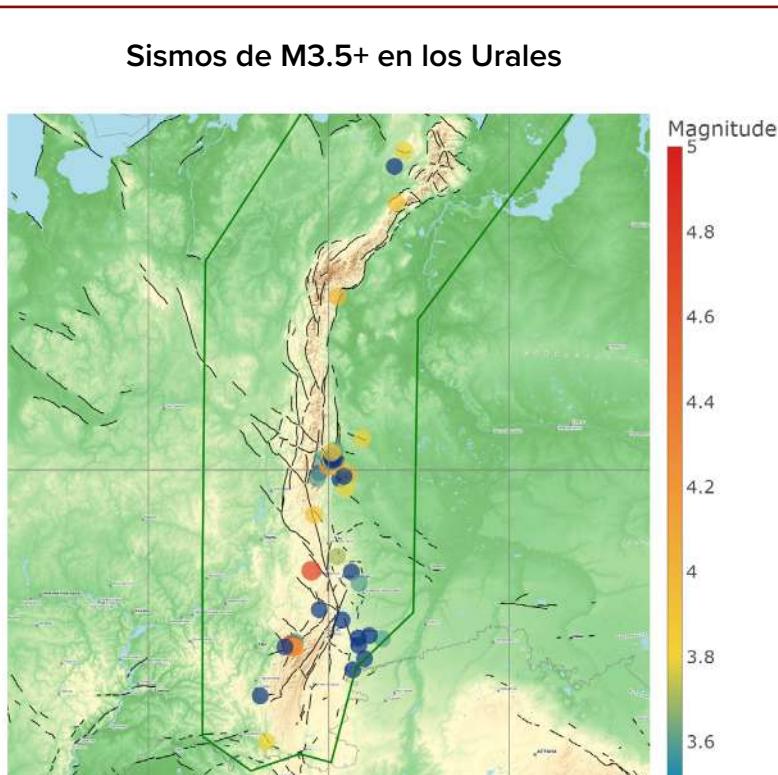


Fig. 66
Mapa de la ubicación de los epicentros de sismos de magnitud 3,5 y superior registrados en la región de los Urales desde 1990 hasta 2022.

Fuente de datos: ISC

Sismos de M3.5+ en los Urales

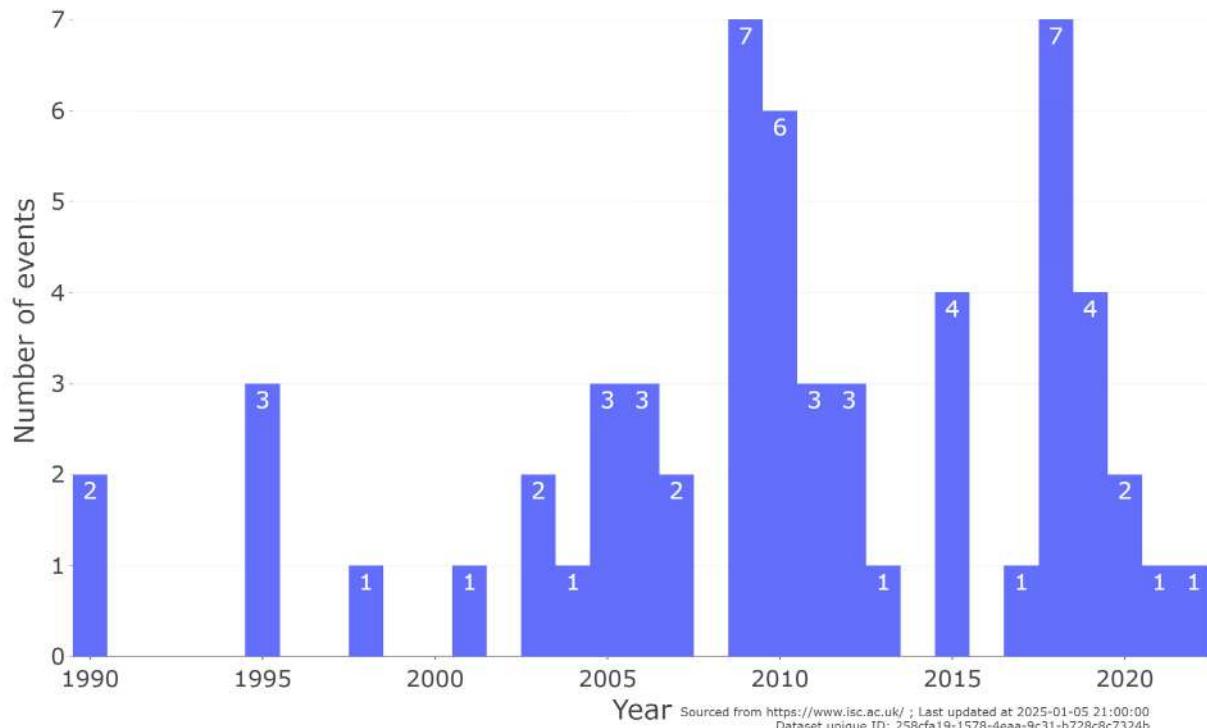


Fig. 67

Cantidad de sismos de magnitud 3,5 y superior registrados en la región de los Urales desde 1990 hasta 2022. Fuente de datos: ISC

Además, en la región han aparecido sismos con magnitudes de 4,0 a 5,0, lo que también indica un aumento natural de la actividad sísmica (fig. 68). El crecimiento de la sismicidad

en la región de los Urales no se produce sistemáticamente, sino en oleadas, lo que constituye un patrón natural.

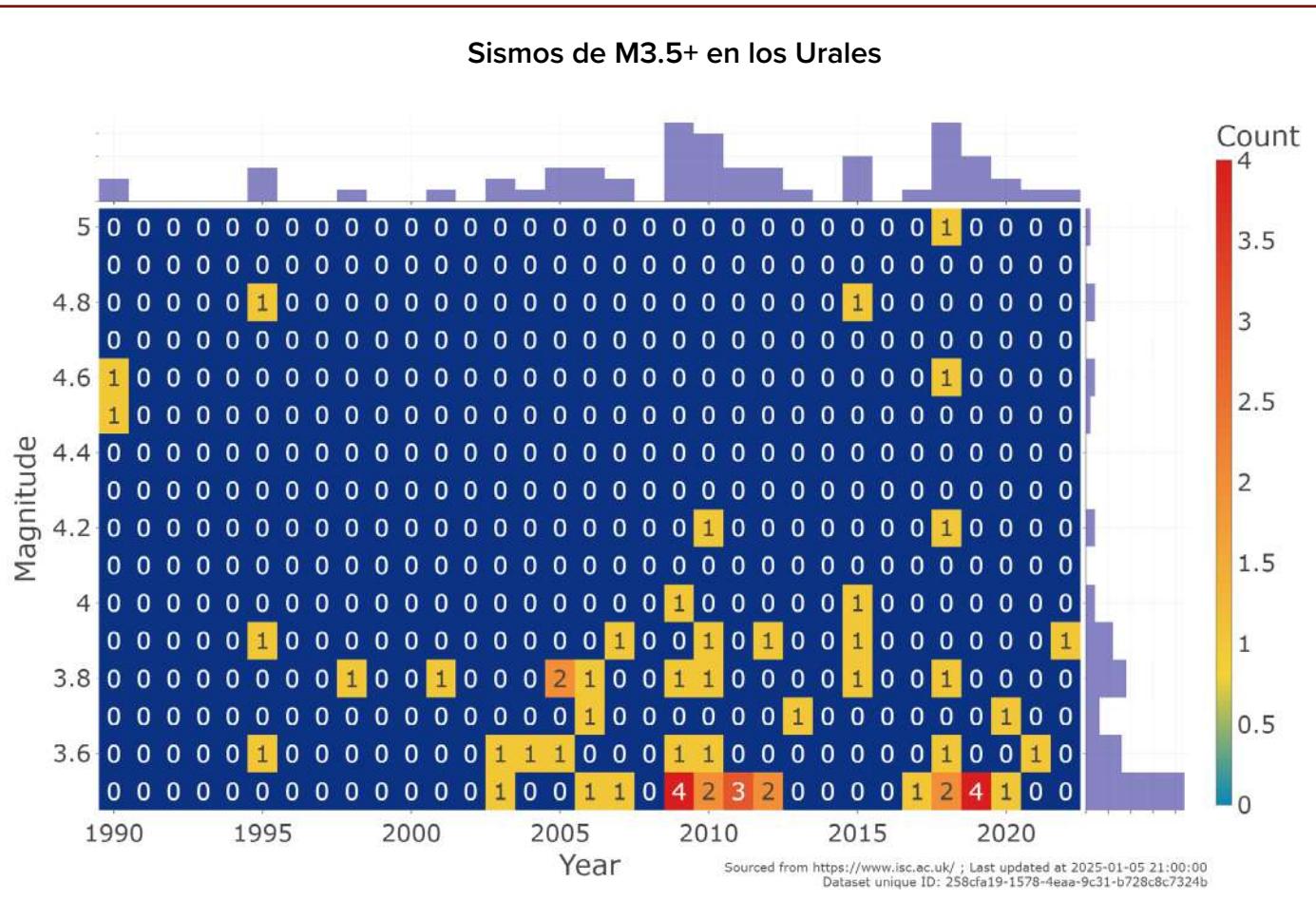


Fig. 68

Distribución de los sismos registrados en la región de los Urales desde 1990 hasta 2022 por magnitud.

Fuente de datos: ISC

Para comparar los momentos de los máximos de actividad sísmica en diferentes partes de la región de la pluma Siberiana y sus alrededores, se presenta un gráfico (fig. 69). En 2021, se observa un aumento en la actividad sísmica en todas las regiones analizadas, excepto en los Urales. El gráfico muestra que la actividad sísmica está presente en todas las regiones y ha ido en aumento en los últimos años. Este crecimiento no ocurre simultáneamente, sino en forma de ondas y pulsos en diferentes regiones. Al mismo tiempo, se observa un cierto patrón que recuerda un balanceo progresivo de la placa en dirección de oeste a este y de norte a sur.

Analicemos la manifestación de los incendios forestales en algunas regiones. El aumento en la superficie afectada por incendios en una región indica un incremento en la actividad del subsuelo, ya que los incendios suelen originarse en zonas de fallas, donde se produce la liberación de gases inflamables. Estos incendios son difíciles de extinguir y se propagan rápidamente sobre grandes áreas. En la región de los Urales, se observa un aumento drástico en la extensión de los incendios forestales a partir de 2020 (fig. 70). El gráfico se ha elaborado con base en los datos de la Agencia Federal de Silvicultura “Avialesoochrana”.

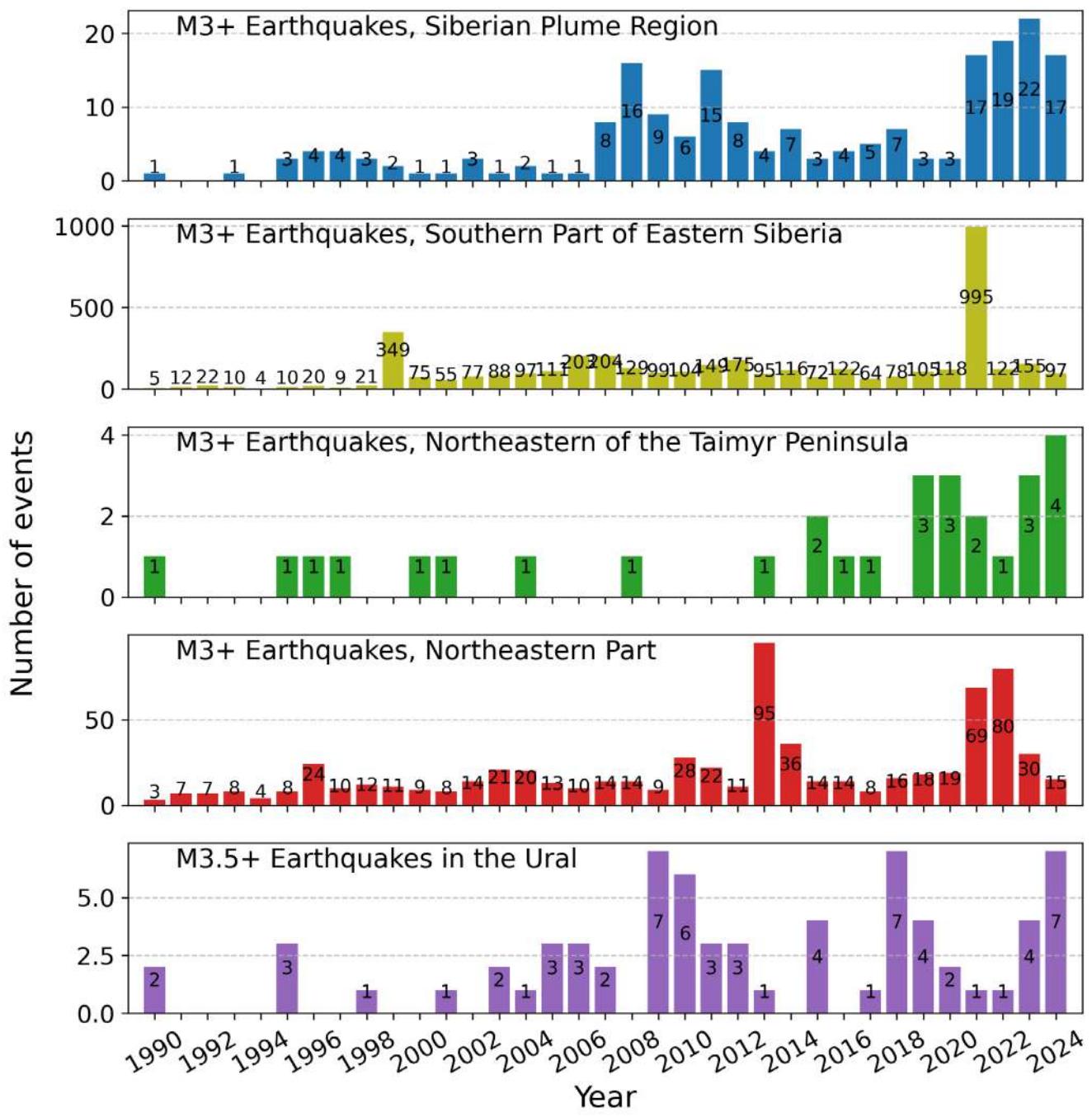


Fig. 69

Distribución de los picos de actividad sísmica en la región de Verjovansk (al este de la plataforma Siberiana), en la parte sur de Siberia Oriental, en los Urales (al oeste de Siberia Oriental) y en la parte central de Siberia (incluyendo la placa de Siberia Occidental y la plataforma de Siberia Oriental) por años. Sismos de magnitud 3,0 y superior.

Fuente de datos: ISC

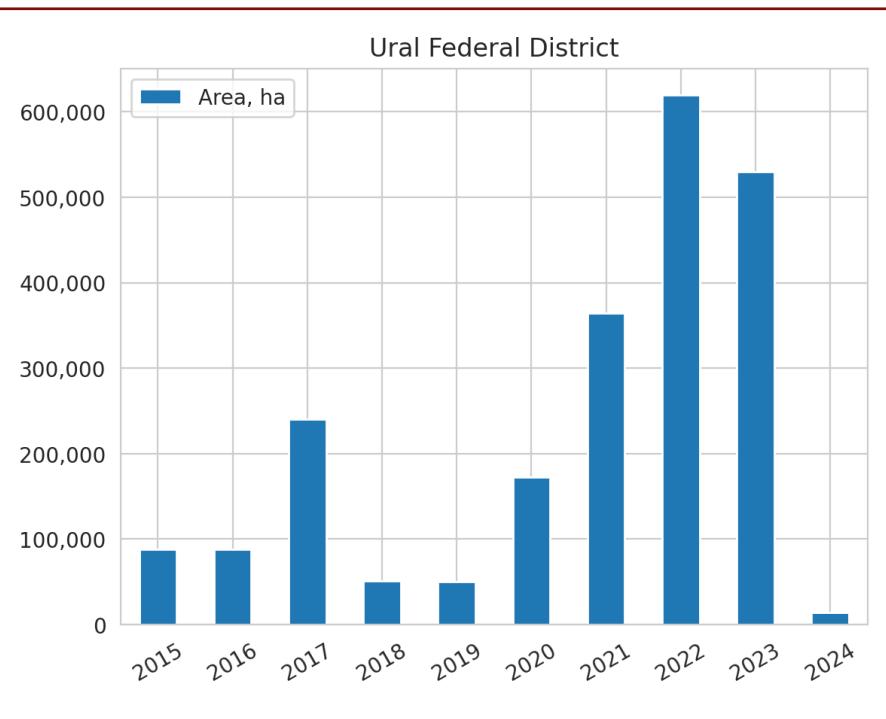


Fig. 70

Aumento de la superficie afectada por incendios en la región de los Urales, según los datos de la Agencia Federal de Silvicultura FBU “Avialesoochrana” (los datos de 2024 son incompletos).

La superficie afectada por incendios en la región del Lejano Oriente también está creciendo de manera exponencial, como lo muestra claramente el gráfico (fig. 71).

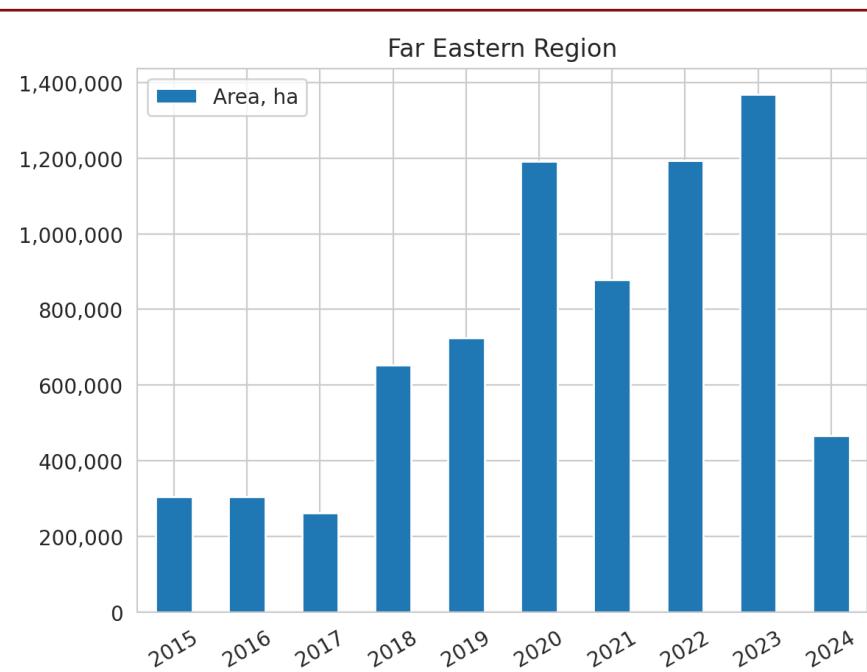


Fig. 71

Superficie afectada por incendios en el Lejano Oriente: el gráfico incluye datos de los territorios de Jabárovsk y Kamchatka, la región de Magadán, el distrito autónomo de Chukotka, la región de Sajalín y el territorio de Primorie, según los datos de la Agencia Federal de Silvicultura FBU “Avialesoochrana”

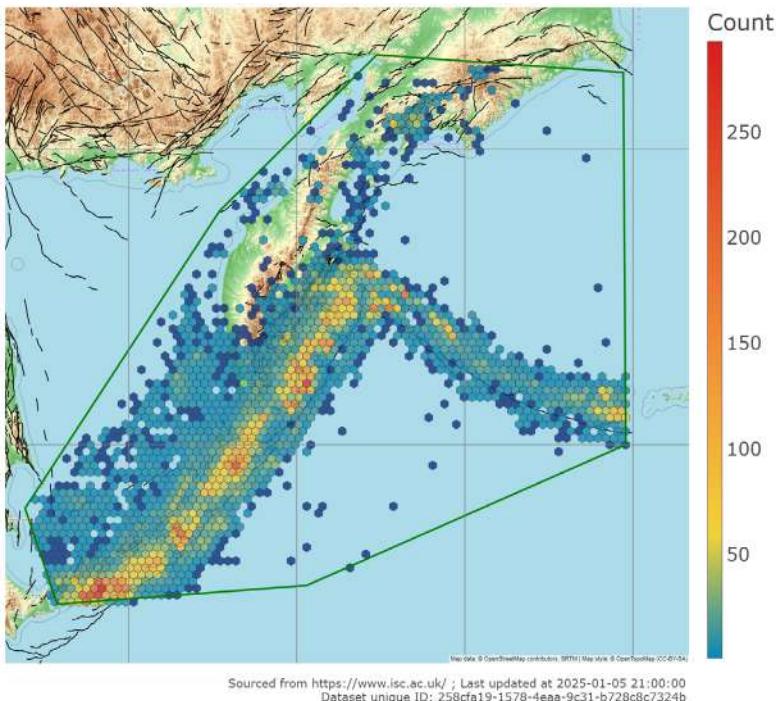
(los datos de 2024 son incompletos).

Así, procesos similares de aumento de incendios también están ocurriendo en el otro extremo del bloque terrestre de Siberia y el Lejano Oriente, en la frontera con la placa del Pacífico.

Se supone que la intrusión de la pluma Siberiana también influye en la región de Kamchatka y las islas Kuriles, ya que esta representa el extremo del bloque continental de la corteza sometido a la presión de la pluma. El análisis del conjunto de datos sísmicos en la zona de Kamchatka y las

islas Kuriles muestra un aumento notable en la cantidad de sismos de magnitud 4,0 y superior (fig. 72, 73). Esta región forma parte del Anillo de Fuego del Pacífico (fig. 74) y, en consecuencia, sigue la tendencia de aumento de la sismicidad, característica de esta estructura tectónica. Sin embargo, la mayoría de los máximos de actividad sísmica parecen ser independientes. Esto podría indicar que la pluma Siberiana ejerce una influencia propia en la región de Kamchatka y las islas Kuriles.

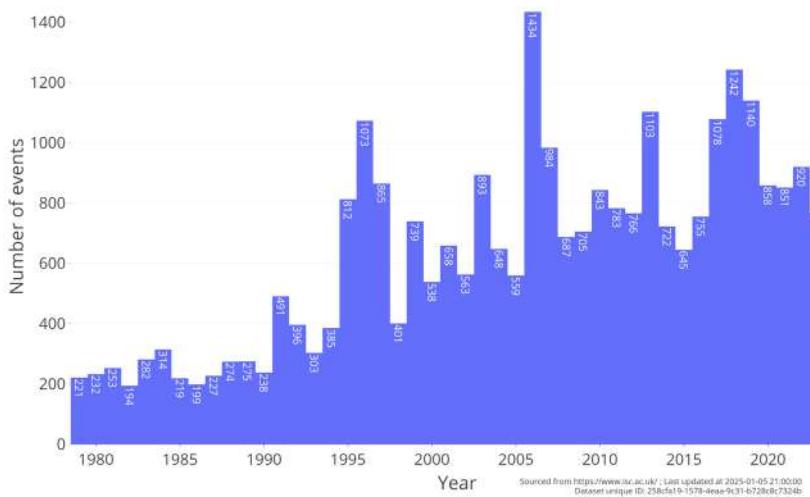
**Densidad de sismos M4
en la península de Kamchatka y las islas Kuriles**



Fuente de datos: ISC

Fig. 72
Densidad de sismos de magnitud 4,0 y superior en la región de la península de Kamchatka y las islas Kuriles, 1979-2024.

Sismos M4+ en la península de Kamchatka y las islas Kuriles



Fuente de datos: ISC

Fig. 73
Aumento en la cantidad de sismos de magnitud 4,0 y superior en la región de la península de Kamchatka y las islas Kuriles, 1979-2024.

Fuente de datos: ISC

Sismos M4+ en el Cinturón de Fuego 1979-2022

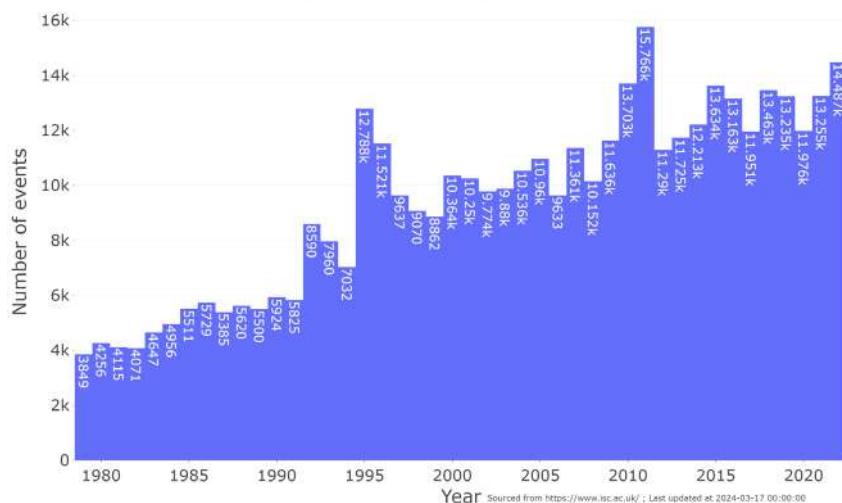


Fig. 74

Aumento en la cantidad de sismos de magnitud 4,0 y superior en la región del Anillo de Fuego, 1979-2022.

Fuente de datos: ISC

Cabe destacar que en la región de Kamchatka y las islas Kuriles también se observa un aumento en la profundidad de los sismos (fig. 75). Esto indica que la unión de las placas litosféricas se está volviendo más dinámica debido a la influencia de la pluma magmática Siberiana. Se espera un aumento en la actividad volcánica de la región de Kamchatka y las islas Kuriles, así como la aparición

de anomalías relacionadas con el rápido ascenso de magma profundo y una rápida variación en su composición durante las erupciones, pasando a magmas máficos de mayor profundidad. Un cambio similar en la composición hacia magmas más profundos fue observado en el volcán Bezymianny durante su erupción en 2017.⁴⁵

Sismos M4+ en la península de Kamchatka y las islas Kuriles

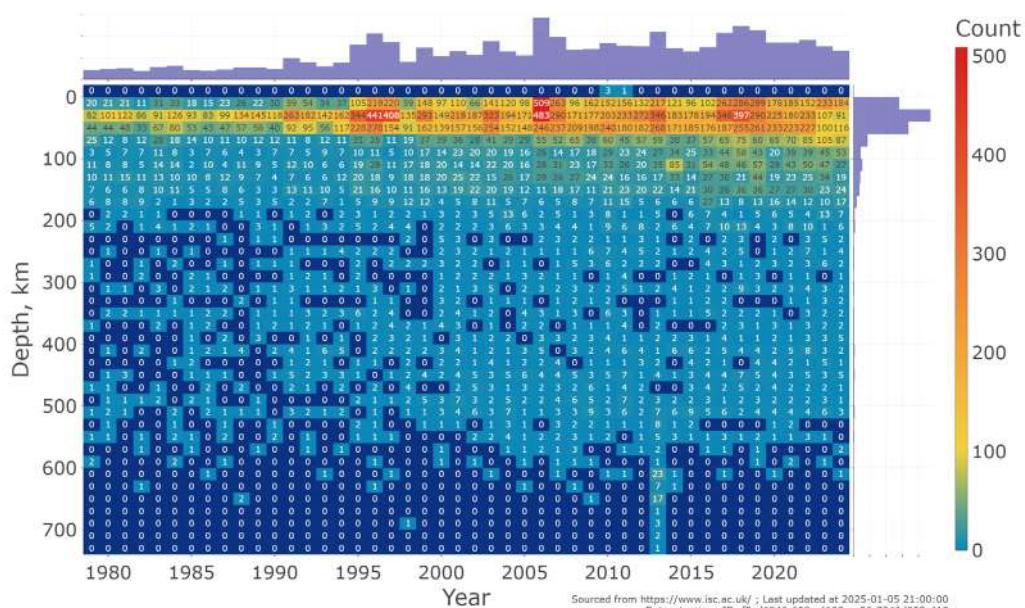


Fig. 75

Distribución de los sismos de magnitud 4,0 y superior, registrados en el área seleccionada de la península de Kamchatka y las islas Kuriles, por profundidad, desde 1979 hasta 2024. Fuente de datos: ISC

⁴⁵ 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 [Evidencia petrológica de la rápida evolución del sistema de tuberías de magma del volcán Bezymianny en Kamchatka antes de la erupción del 20 de diciembre de 2017]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 421, 107422. ISSN 0377-0273. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107422>

El aumento de la sismicidad, los incendios y las anomalías en la actividad volcánica son precisamente los efectos periféricos del levantamiento del bloque siberiano de la corteza terrestre, que está sometido a la presión generada por la intrusión de la pluma Siberiana.

El aumento de la actividad sísmica no solo en Siberia, sino especialmente en los bordes de la placa de Siberia Occidental y el Cratón de Siberia Oriental, indica que el levantamiento de la placa debido a la presión ejercida desde abajo por la pluma magmática ya ha comenzado. Esto sugiere un impacto amplio y significativo de la pluma magmática sobre la placa.

Los modelos tradicionales suponían que las plumas del manto, al ascender y calentar la litósfera, deberían causar un levantamiento

sustancial de la superficie de hasta 2 km antes de la irrupción del magma. Sin embargo, no existen evidencias geológicas de un levantamiento tan dramático en la región de los Traps Siberianos, que se formaron como resultado de la intrusión de una pluma magmática hace 250 millones de años.

Basándose en el estudio de las rocas magmáticas de los Traps Siberianos, científicos de institutos de Rusia, Alemania y Francia determinaron⁴⁶ que, en lugar de elevarse en forma de burbuja, la pluma erosionó progresivamente la litósfera desde abajo (fig. 76). Cuando la erosión en la zona de contacto entre el material de la pluma fundida y las rocas del manto superior alcanzó una profundidad de 50 kilómetros, en ese momento comenzaron las erupciones de lava a gran escala y los estallidos hacia la superficie.

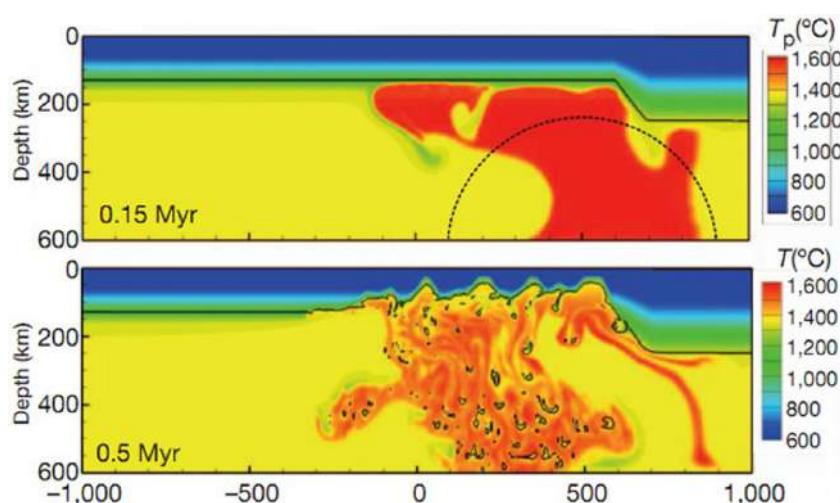


Fig. 76

Reconstrucción de las etapas iniciales de la formación de los Traps Siberianos.

En el eje vertical se muestra la profundidad (km). Los diferentes colores representan la temperatura de las rocas. La posición original de la cima de la pluma del manto está indicada por una línea discontinua semicircular. La pluma se aproxima al límite inferior de la litósfera (línea negra continua) y se “extiende” bajo ella. En la parte inferior, la cima de la pluma, debido a la erosión (se observan fragmentos de litósfera hundiéndose en el manto), ha abierto un camino a través del manto superior hacia la corteza terrestre. Esto marca el inicio de la fase principal del magmatismo de los Traps Siberianos.

Fuente: Stephan V. Sobolev, Alexander V. Sobolev, Dmitry V. Kuzmin, Nadezhda A. Krivolutskaya, Alexey G. Petrunin, Nicholas T. Arndt, Viktor A. Radko, Yuri R. Vasiliev. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes [Relación entre las plumas del manto, las grandes provincias ígneas y las catástrofes medioambientales] // Nature, 2011, 477, 312–316.

⁴⁶ 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 [Relación entre las plumas del manto, las grandes provincias ígneas y las catástrofes medioambientales]. Nature, 477, 312-316. DOI: [10.1038/nature10385](https://doi.org/10.1038/nature10385)

La actividad actual de la pluma probablemente sigue el mismo mecanismo. Por lo tanto, no se espera un levantamiento significativo de la superficie en un único punto con la intrusión de la cabeza de la pluma. Sin embargo, este mecanismo no excluye un levantamiento regional a gran escala de toda la plataforma de Siberia Oriental en una magnitud relativamente pequeña. No obstante, según el modelamiento tectonofísico, incluso este leve levantamiento sería suficiente para provocar la irrupción del magma, permitiendo la salida del

material fundido a alta presión, lo que resultaría en una catástrofe de enormes proporciones.

El lugar estimado del centro de la cabeza de la pluma se encuentra al norte de la meseta de Putorana, aproximadamente a 225 km al noreste de Norilsk. Además, los episodios de irrupción abarcarían toda la delgada placa de Siberia Occidental, donde se reactivarían antiguas suturas, rifts y fallas profundas en la corteza terrestre.

Evidencia de la inevitabilidad de la erupción de la pluma Siberiana

Las razones por las cuales la irrupción del magma de la actual pluma Siberiana presenta altos riesgos en el presente período están relacionadas con las siguientes condiciones.

Durante los últimos 30 años, la Tierra ha experimentado un aumento progresivo de anomalías geofísicas, que son una consecuencia directa de una influencia externa que incrementa la energía térmica en la región del núcleo del planeta. Sin embargo, la situación actual es radicalmente diferente del período anterior: **a finales de 2024, el planeta entró en una fase de impacto energético elevado sobre su núcleo. Y, según los cálculos, para 2030 se acercará a su fase máxima.**

El factor crítico que ha agravado la situación es la contaminación global del océano debido a la actividad antropogénica, incluyendo hidrocarburos, micro y nanoplásticos. Este factor ha alterado significativamente las propiedades de conductividad térmica del agua oceánica, afectando su capacidad para disipar eficazmente el calor del interior de la Tierra. El océano, que históricamente ha sido el principal regulador térmico del planeta, ha perdido una parte considerable de su función de conductividad térmica. Como resultado, se está produciendo una acumulación anómala de energía térmica en el manto, lo que provoca su fusión intensa a niveles sin precedentes en la historia de la Tierra.

Las investigaciones geofísicas muestran un crecimiento dramático en la cantidad de terremotos de foco profundo, los cuales son un

indicador directo de la fusión activa del manto. El magma fundido, al aumentar su volumen, genera una presión colosal sobre la corteza terrestre. Este proceso puede compararse con inflar un globo gradualmente: en algún momento, la presión superará el límite de resistencia de la envoltura.

La región siberiana es especialmente vulnerable a estos procesos debido a su estructura geológica específica: aquí se está elevando una poderosa pluma magmática, un flujo ascendente de material del manto fundido, provocado por el desplazamiento del núcleo en esta dirección durante los años 1997-1998. El aumento de anomalías térmicas en Siberia indica que el volumen de magma bajo el Cratón Siberiano continúa creciendo a una velocidad exponencial. Basándose en datos geológicos y observaciones actuales, se puede afirmar con un alto grado de certeza que la pluma Siberiana se encuentra en una fase crítica de preparación para la erupción.

Preocupa especialmente el hecho de que, simultáneamente con la pluma Siberiana, se está desarrollando una situación crítica en la zona de la Fosa de las Marianas. Este es el punto más profundo del fondo oceánico, donde la corteza terrestre es más delgada y vulnerable. Aquí también se observa un ascenso de magma incandescente, lo que ha provocado un aumento significativo en la actividad sísmica. Existe una amenaza real de fractura del fondo oceánico en esta región, lo que podría desencadenar un escenario catastrófico para el planeta.

Existen dos escenarios probables para el desarrollo de los acontecimientos. El primero es la erupción de la pluma Siberiana, que podría ocurrir en cualquier momento debido a la creciente presión del magma. El segundo es la fractura de la corteza terrestre en la Fosa de las Marianas, lo que podría preceder a la catástrofe en Siberia. La pluma Siberiana no entrará en erupción solo si la Fosa de las Marianas colapsa primero. La historia geológica de Marte nos ofrece una posible referencia de este escenario: la fosa de Valles Marineris sigue siendo un testimonio silencioso de una catástrofe similar, cuando la erupción de una pluma bajo un océano provocó consecuencias globales para todo el planeta.

Según los cálculos que tienen en cuenta las tendencias actuales del aumento de la actividad geofísica, el punto crítico de ruptura de la Fosa de las Marianas podría alcanzarse en 2036. Sin embargo, es importante entender que este plazo es aproximado. La corteza terrestre en Siberia podría no soportar la creciente presión mucho

antes de esa fecha. Con el desarrollo actual de los acontecimientos, la irrupción de la pluma Siberiana o la fractura de la corteza terrestre en la Fosa de las Marianas parece ser una consecuencia inevitable de los procesos que ocurren en el interior de la Tierra. La única incertidumbre radica en el momento y el lugar exactos de la catástrofe, pero no en el hecho de su proximidad.

A continuación, consideraremos tres posibles escenarios para el desarrollo de eventos de la pluma Siberiana. El primer escenario es una erupción repentina de la pluma Siberiana. Se producirá una irrupción única y abrupta de la pluma Siberiana. El segundo escenario es una erupción gradual de la pluma Siberiana. Ocurrirán erupciones de lava lentas y progresivas en Siberia, similares a la formación de los Traps Siberianos. El tercer escenario es una desgasificación controlada y planificada. Es posible en caso de que la humanidad tome las medidas necesarias para desgasificar los focos magmáticos secundarios de la pluma Siberiana en la corteza terrestre.

Escenario 1. Erupción repentina de la pluma Siberiana

Para evaluar el daño potencial de una erupción repentina de la pluma Siberiana, se puede recurrir al método de comparación con ejemplos de la historia geológica. Sin embargo, es importante tener en cuenta que nunca antes en la historia de la Tierra han coincidido condiciones como las actuales: la superposición del ciclo más intenso de 24 000 años y la contaminación antropogénica del “principal sistema de enfriamiento del planeta”, el océano. Por esta razón, una irrupción súbita de la pluma Siberiana se considera el evento más probable si la humanidad no toma medidas para

reducir los riesgos de esta erupción. Para evaluar la magnitud de las erupciones volcánicas, se utiliza el volumen de material expulsado. Por ejemplo, durante una de las erupciones más intensas del supervolcán Yellowstone, hace 2,1 millones de años, el volumen de magma expulsado alcanzó los 2500 km^3 , según lo determinado por el estudio de los depósitos de tobas en América del Norte.⁴⁷ Durante esta erupción, las emisiones de ceniza y gases ascendieron a 50 km de altura, alcanzando el límite superior de la estratosfera.

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 [Toba de Huckleberry Ridge, Yellowstone: evacuación de múltiples sistemas magmáticos en una erupción episódica compleja]. *Journal of Petrology*, 60, 1371-1426. <https://doi.org/10.1093/petrology/eqz034>

En términos de escala, esta erupción fue comparable a la del supervolcán Toba, en la isla de Sumatra, que ocurrió hace aproximadamente 72 000–74 000 años y que fue la erupción más poderosa de los últimos 25 millones de años.

Durante las erupciones de los Traps Siberianos, hace aproximadamente 250 millones de años, el volumen de material expulsado se estima entre 3 y 4 millones de km³ de lava y tobas⁴⁸ (Fig. 77). Es decir, la erupción de los Traps Siberianos fue 1000 veces mayor en términos de volumen de

material expulsado que la erupción más intensa de la caldera de Yellowstone o del supervolcán Toba. **Por lo tanto, considerando el carácter repentino de una posible erupción de la pluma Siberiana, su activación podría provocar un evento cuya magnitud supere 1000 veces las erupciones históricamente conocidas, como las de la caldera de Yellowstone o el supervolcán Toba.**

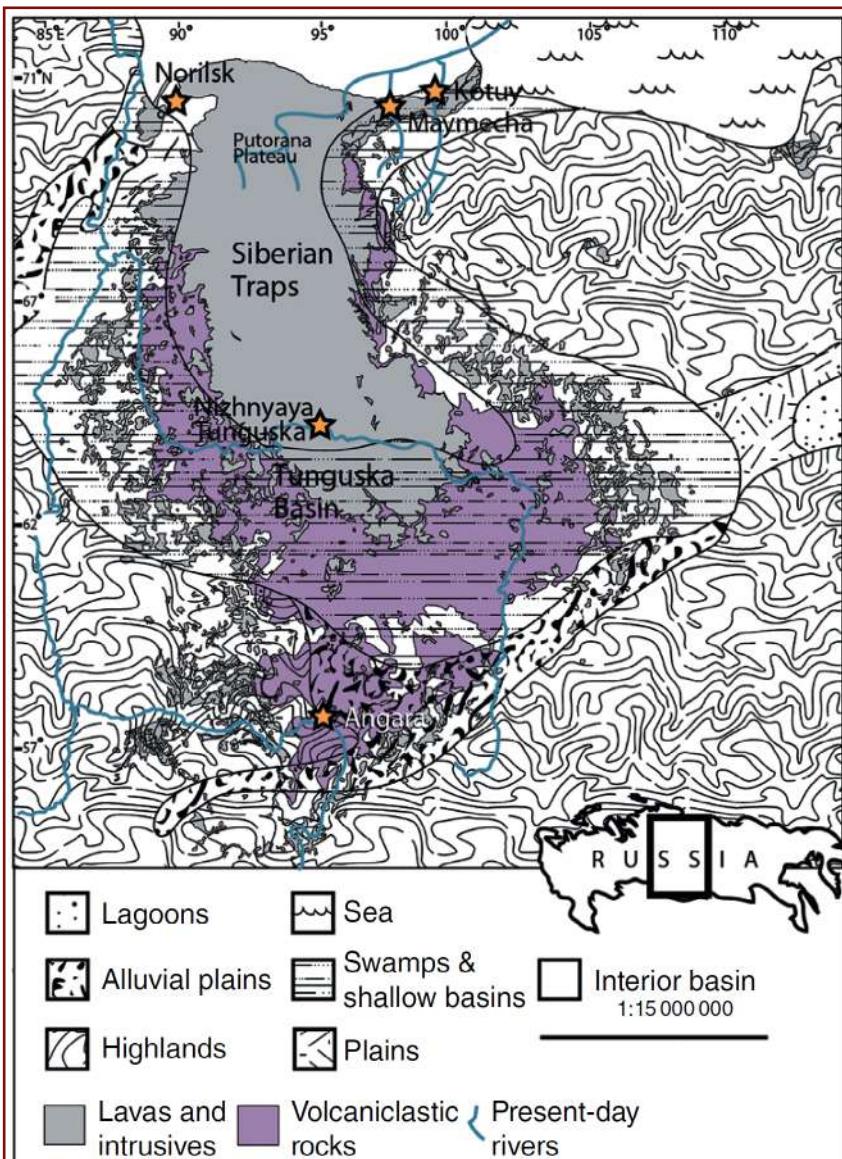


Fig. 77

Mapa de la paleogeografía de los Traps Siberianos, que muestra la magnitud de las principales emisiones volcánicas y sus ubicaciones. Basado en los datos de Malich et al. (1974), Polozov et al. (2010), Black et al. (2015), con una simplificación de la paleogeografía del Pérmino tardío según Czamanske et al. (1998).

Fuente: 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 [Evaluación de las consecuencias medioambientales de la generación y alteración de depósitos volcánicos maficos durante el emplazamiento de grandes provincias ígneas]. En Geophysical Monograph Series (eds. Ernst, R. E., Dickson, A. J. & Bekker, A.), pp. 117–131 (Wiley, 2021). <https://doi.org/10.1002/978119507444.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 [Evaluación de las consecuencias ambientales de la generación y alteración de depósitos volcánicos maficos durante el emplazamiento de grandes provincias ígneas]. En R. E. Ernst, A. J. Dickson, & A. Bekker (Eds.), Geophysical Monograph Series (pp. 117-131). Wiley. <https://doi.org/10.1002/978119507444.ch5>

Se estima que, si ocurre una erupción repentina de la pluma Siberiana, la erupción tendrá un carácter explosivo, es decir, será de tipo detonante, y formará una única caldera. Según la hipótesis, se espera que la caldera resultante del colapso de la pluma Siberiana tenga una superficie de 75 000 km², lo que correspondería a un área con un radio de 150 km (o, por ejemplo, unas dimensiones aproximadas de 380 km por 250 km). Durante la erupción de los Traps Siberianos, hace 250 millones de años, la superficie cubierta por lava se estima entre 4 y 7 millones de km², según fuentes bibliográficas^{49,50}. Se prevé que territorios de dimensiones similares puedan verse afectados en una futura erupción de la pluma Siberiana.

La idea de que los flujos de lava representan la mayor amenaza entre los fenómenos volcánicos es errónea. En realidad, la ceniza se convierte a menudo en la causa principal de las consecuencias mortales. En los supervolcanes caracterizados por una alta explosividad, una parte importante del magma no se transforma en lava. En su lugar, se fragmenta durante la explosión, produciendo enormes cantidades de ceniza volcánica fina: fragmentos de roca afilados y dentados que se dispersan en la atmósfera. La inhalación de esta ceniza forma una mezcla similar al cemento en los pulmones humanos, lo que conduce a una muerte inevitable.

Se estima que, durante la erupción de la pluma Siberiana, el radio de dispersión del piroclasto incandescente será de aproximadamente 9000 km, cubriendo una superficie de alrededor de 255 millones de km². Dado que la superficie total de la Tierra es de poco más de 510 millones de km², la zona afectada por la ceniza volcánica, cuya inhalación sería letal, abarcaría aproximadamente

el 50 % del planeta.

De este modo, en caso de una erupción repentina de la pluma Siberiana, se prevé la aparición de tres radios de impacto mortal.

La primera zona de impacto (zona central) es un área con un radio de 150 km, con epicentro en la región noroeste de la Meseta de Putorana, donde se espera la formación de la caldera (fig. 78). En esta zona se encuentran las ciudades de Norilsk, Dudinka y Talnakh en el Krai de Krasnoyarsk. Si la pluma se activa, toda el área dentro de este radio será destruida instantáneamente debido a la combinación de onda de choque y flujos piroclásticos incandescentes, liberados en la fase inicial de la erupción.

La segunda zona de impacto (radio de 1500 km) es el área de propagación de lava y materiales volcánicos pesados (ver Fig. 79). Esta zona abarcará vastos territorios del norte de Siberia, incluyendo el Distrito Autónomo de Yamalo-Nenets, la Península de Taimyr, partes del Distrito Autónomo de Janty-Mansi, el norte del Krai de Krasnoyarsk, el oeste de Yakutia y el noreste de la parte europea de Rusia. Dentro de este radio se encuentran ciudades importantes como Igarka, Novy Urengoy, Nadym, Salejard, Vorkutá, Nar'yan-Mar, Mirny, Kogalym, Lesosibirsk, Surgut, Krasnoyarsk, Janty-Mansiysk, Tomsk y Nizhnevártovsk.

Durante las primeras horas de la erupción, esta área será impactada por flujos de gases incandescentes, ceniza y lava que avanzarán a velocidades de hasta 700 km/h. Estos flujos destruirán toda forma de vida y cubrirán el territorio con una gruesa capa de material volcánico, sepultando por completo ciudades y recursos naturales.

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 [Petrogenésis de la secuencia de basaltos de inundación en Noril'sk, centro-norte de 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., Palesskii, S. V., Nikolaeva, I. V. (2013). Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism [Provincia ígnea de los Traps Siberianos: Evidencia de dos pulsos de basaltos de inundación alrededor del límite Pérmico-Triásico y en el Triásico Medio, y magmatismo granítico contemporáneo]. Earth-Science Reviews, 122, 58–76. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>

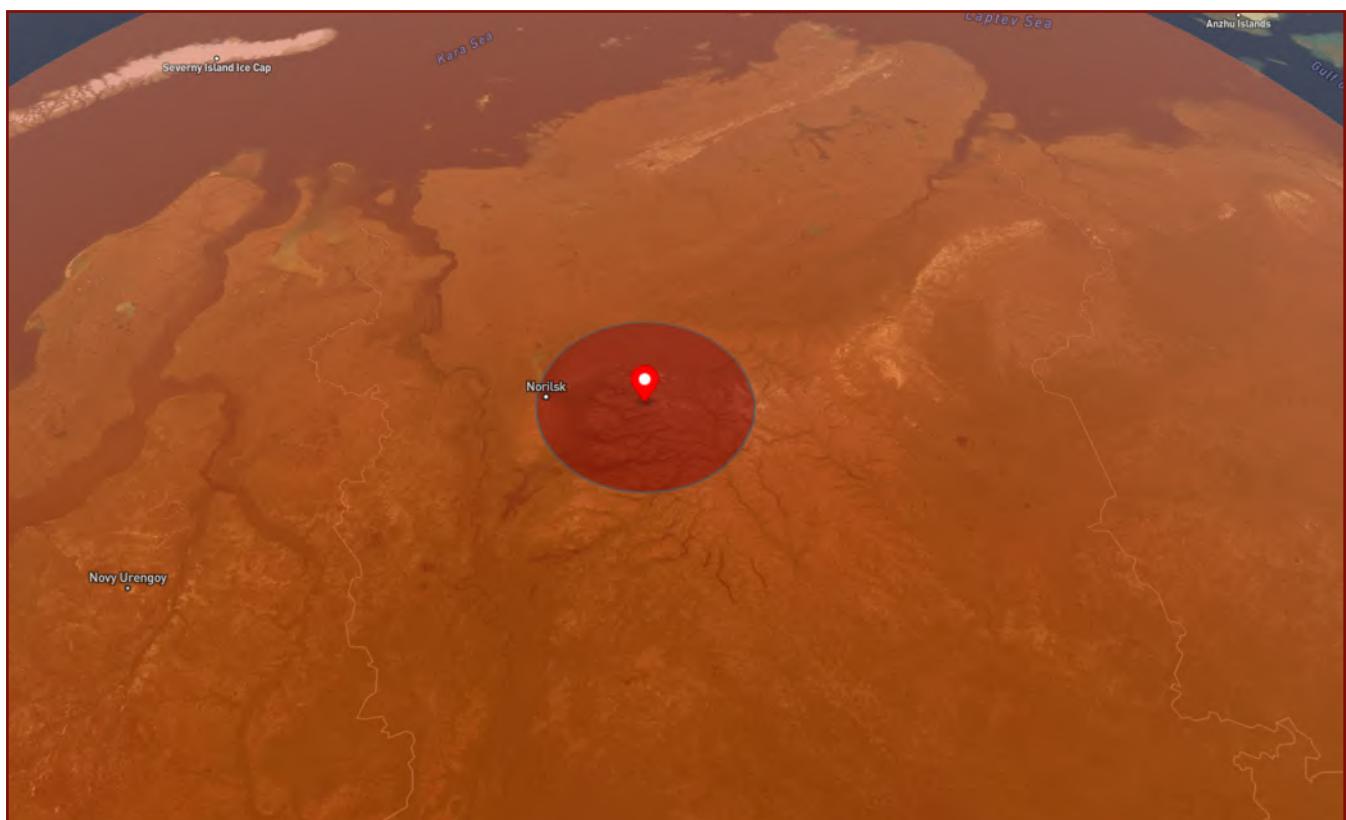


Fig. 78

La zona de formación de la caldera está representada en rojo, con un radio aproximado de 150 km.

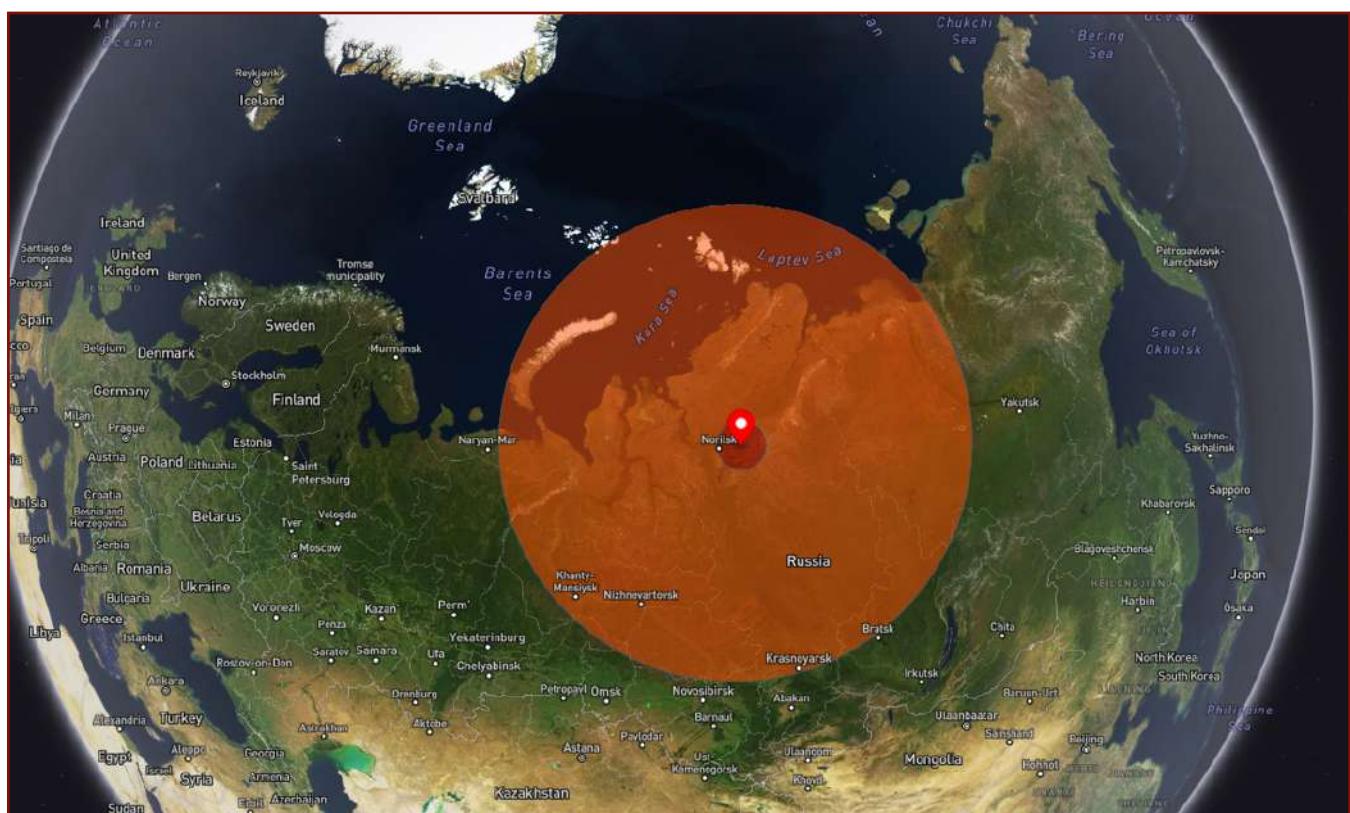


Fig. 79

La zona de derrames de lava y expulsión de fracciones piroclásticas pesadas está representada en naranja, con un radio aproximado de 1500 km.

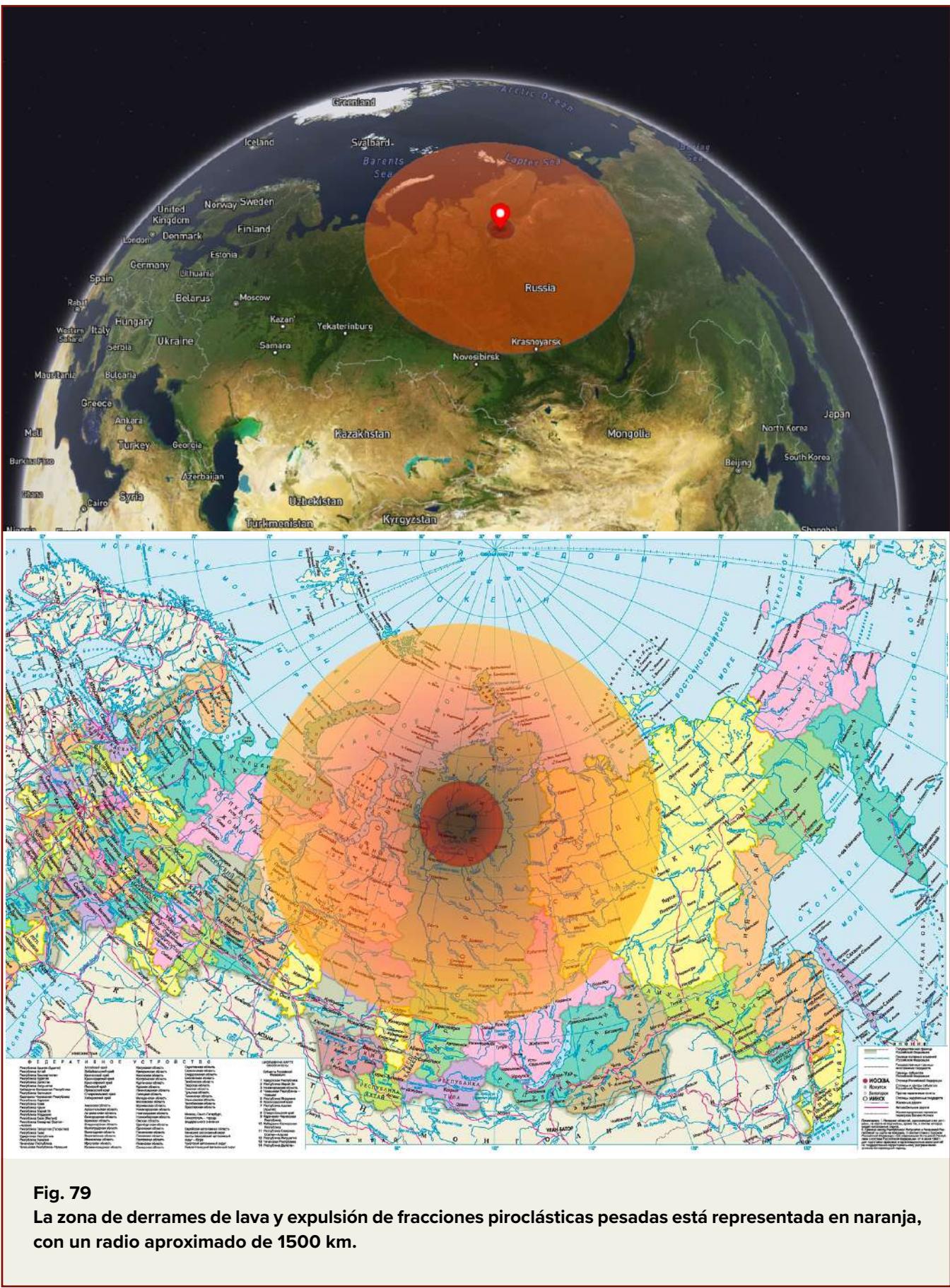


Fig. 79

La zona de derrames de lava y expulsión de fracciones piroclásticas pesadas está representada en naranja, con un radio aproximado de 1500 km.

La tercera zona de impacto (radio de aproximadamente 9000 km) es el área de dispersión de materiales piroclásticos finos y ceniza volcánica, cubriendo aproximadamente el 50 % de la superficie terrestre (ver Fig. 80).

En la fase inicial (primeras 24 horas tras la erupción), las regiones más afectadas por la caída

de ceniza serán Rusia, Asia continental, Europa, la Península Arábiga, el norte de África y América del Norte.

En los siguientes 7–10 días, se espera que las masas de ceniza se propaguen a Australia, América del Sur y la Antártida, afectando prácticamente todo el planeta.

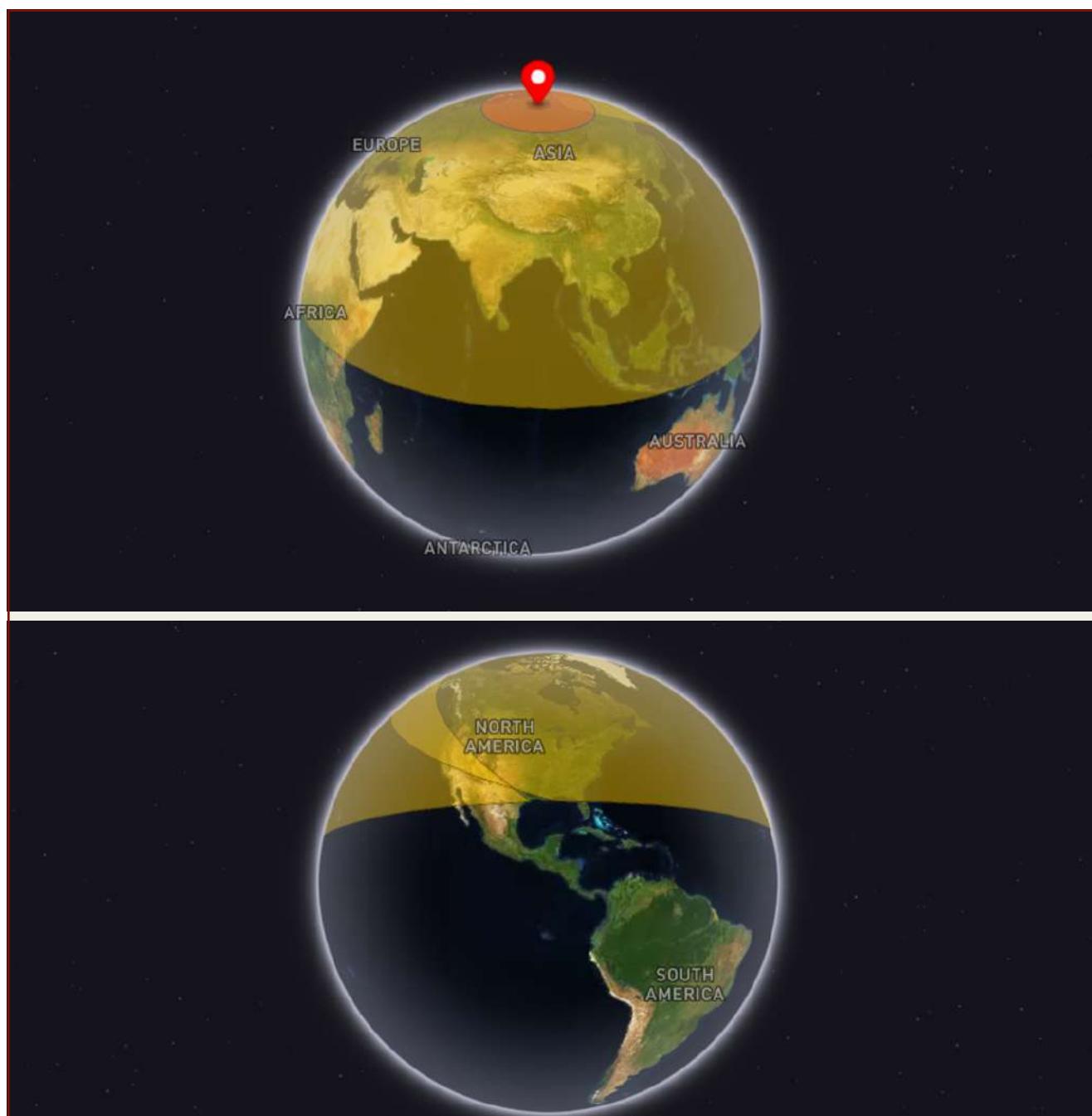


Fig. 80

La zona de dispersión de ceniza volcánica fina está representada en amarillo, con un radio aproximado de 9000 km.



Fig. 80

La zona de dispersión de ceniza volcánica fina está representada en amarillo, con un radio aproximado de 9000 km.

El estudio de los procesos geológicos indica que la activación de la pluma Siberiana desencadenará una serie de fenómenos catastróficos adicionales. Se espera la generación de una poderosa onda de choque, la aparición de terremotos de magnitud extrema (alrededor de 10), la formación de tsunamis devastadores y la posible reactivación de otros de los mayores sistemas volcánicos de la Tierra. La energía liberada durante la erupción podría desencadenar una reacción en cadena, provocando la activación

de supervolcanes y grandes regiones volcánicas en todo el planeta. Estas conclusiones se basan en cálculos matemáticos de los procesos energéticos y su impacto sobre la corteza terrestre.

A continuación, analizaremos factores de riesgo adicionales que amenazan a la humanidad como consecuencia de una erupción repentina de la pluma Siberiana.

Onda de choque

Según fuentes abiertas, la erupción del supervolcán de Yellowstone podría liberar una energía de aproximadamente 900 000 megatones y generar un terremoto de magnitud 11,2. Dado que la escala de magnitud sísmica es logarítmica (cada unidad representa un aumento de 32 veces en la energía liberada), la erupción de la pluma Siberiana, que se estima 1000 veces más poderosa que Yellowstone, podría generar un terremoto de magnitud 13,2. Esto sería 350 000 veces más potente que el terremoto más fuerte registrado en la historia, el Gran Terremoto de Chile de 1960 (magnitud 9,5), y comparable al impacto de un asteroide de gran tamaño.

La energía liberada, del orden de 10^{24} J, crearía una onda de choque de escala global. En el epicentro de la erupción, la presión extrema vaporizaría instantáneamente las rocas, proyectándolas hacia las capas superiores de la atmósfera. La onda de choque supersónica causaría destrucción en un radio de miles de kilómetros en cuestión de minutos, con un efecto similar al impacto del meteorito de Tunguska,

pero con una intensidad mucho mayor.

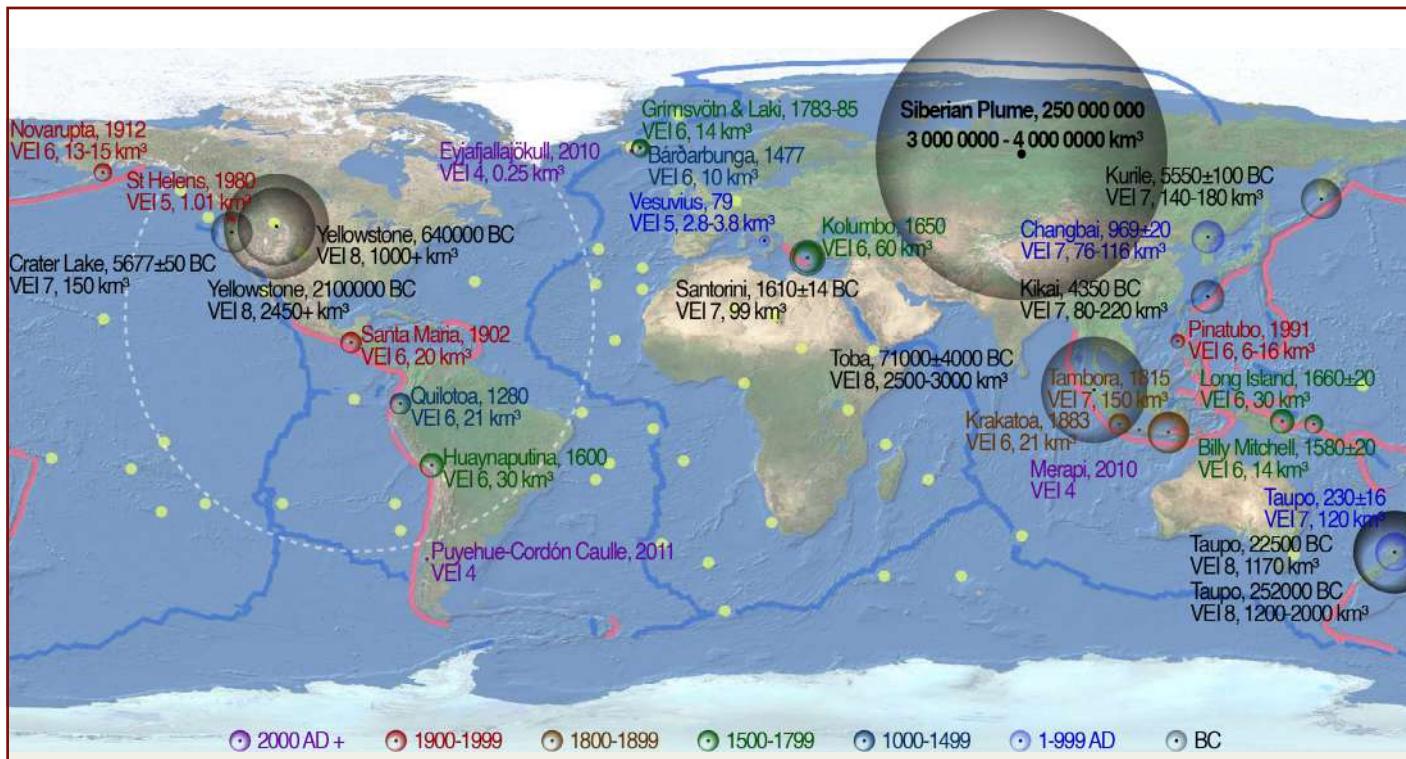
En la taiga siberiana se desatarán incendios masivos, y vastas regiones quedarán sepultadas bajo un espeso manto de ceniza volcánica. La fusión acelerada del permafrost en miles de kilómetros liberará grandes cantidades de gases de efecto invernadero, agravando el cambio climático de manera extrema. El paisaje sufrirá destrucción a gran escala, con la activación de fallas en la corteza terrestre. Las ondas sísmicas se propagarían por todo el planeta, desencadenando terremotos adicionales con magnitudes superiores a 10.

En el Océano Ártico, se generarán tsunamis gigantes de cientos de metros de altura, que amenazarán las costas de Rusia, Canadá, Groenlandia y Escandinavia. Tsunamis secundarios impactarán las costas de Indonesia, Japón, Australia, América del Norte y del Sur. Las perturbaciones atmosféricas globales darán lugar a huracanes y tormentas de una intensidad sin precedentes, amplificando aún más el desastre.

Activación de supervolcanes y sistemas volcánicos

Las ondas sísmicas de la erupción se propagarán no solo a través del aire y la superficie terrestre, sino también profundamente en el manto. Dado que todos los supervolcanes están interconectados a través de las capas fundidas del manto, las ondas sísmicas de tal magnitud provenientes de la erupción de la pluma Siberiana probablemente provocarán una reacción en cadena de erupciones de otros

supervolcanes en las primeras 24 horas (ver Fig. 81). Se espera la activación de los mayores sistemas volcánicos, incluidas las calderas de Yellowstone y Long Valley (América del Norte), los Campos Flégreos (Península Itálica), Toba (Archipiélago de la Sonda), Aira (Islas Japonesas) y el complejo volcánico de Taupo (Nueva Zelanda).



El tamaño de los símbolos es proporcional al volumen de material expulsado (en km³). El mapa muestra la secuencia temporal de erupciones con un Índice de Explosividad Volcánica (VEI) ≥4, destacando eventos como Toba (71 000±4000 a. C., 2500–3000 km³), Yellowstone (640 000 a. C., >1000 km³) y Tambora (1815 d. C., 150 km³). Se espera que erupciones similares ocurran en caso de una explosión de la pluma Siberiana, que representaría el mayor evento registrado, con un volumen de 3–4 millones de km³. Las líneas rojas indican los límites de las placas tectónicas, mostrando la correlación espacial entre la localización de grandes erupciones y la actividad geológica global.

Además de la erupción de supervolcanes, es probable que comiencen erupciones en numerosos volcanes ubicados a lo largo del Cinturón de Fuego del Pacífico y en otras zonas sísmicamente activas. Existe una alta probabilidad de reactivación de la actividad volcánica en volcanes como el monte Fuji (Japón), Krakatoa y Merapi (Indonesia), Vesubio y Etna (Italia), Popocatépetl (Méjico), los grupos volcánicos de Kamchatka, los cinturones volcánicos de los Andes y Alaska, así como los sistemas volcánicos subglaciares de la Antártida Occidental.

Se prevé la reactivación de estructuras volcánicas inactivas durante largos períodos, incluyendo el estratovolcán Ararat (Meseta de Anatolia), el macizo volcánico Elbrús (Región del Cáucaso), el volcán Laacher See (Europa Central), los estratovolcanes Kilimanjaro y Nyiragongo (Sistema de Rift de África Oriental) y los sistemas volcánicos de la Península Arábiga.

Lluvias ácidas

Las catastróficas emisiones de ceniza volcánica y dióxido de azufre como resultado de la erupción harán que las precipitaciones en todo el planeta tomen la forma de lluvias ácidas. Para ilustrar la magnitud de estas emisiones, se puede tomar como referencia la erupción del supervolcán de Yellowstone hace 630 000 años, cuando se liberaron aproximadamente 500 megatonnes de dióxido de azufre a la atmósfera. Escalando estos datos en función de la potencia estimada de la erupción de la pluma Siberiana, se puede suponer que las emisiones de dióxido de azufre alcanzarían $1\,500\,000$ megatonnes (o $1,5 \times 10^{12}$ toneladas), lo que superaría en aproximadamente un millón de veces las emisiones del volcán Tambora en 1815, que provocó el “año sin verano”. Cabe destacar que este cálculo no incluye las emisiones de otros volcanes que podrían activarse en una reacción en cadena como consecuencia de la erupción.

Esta concentración de emisiones de dióxido de azufre provocará la formación global de partículas de aerosol en la estratosfera, que serán eliminadas gradualmente de la atmósfera durante décadas en forma de lluvias ácidas. Se estima que el período principal de precipitaciones ácidas durará entre 3 y 10 años, dependiendo de los procesos climáticos y la circulación de sustancias en la atmósfera. Las regiones más cercanas al epicentro de estas emisiones, como el territorio de la actual Siberia, estarán expuestas a precipitaciones con un pH inferior a 1,5, comparable al ácido sulfúrico diluido.

Esto provocará la destrucción de la vegetación, incluidas raíces, hojas y ramas, así como la lixiviación de minerales del suelo, haciéndolo inadecuado para el mantenimiento de la vida. Los ecosistemas acuáticos también sufrirán una acidificación extrema: los cuerpos de agua se convertirán en lagos ácidos con un pH de 2 a 3, lo que los hará tóxicos para la mayoría de las formas de vida.

Además, la infiltración de ácido en los sistemas de agua potable hará que el agua sea inapropiada para el consumo sin una filtración avanzada. La infraestructura, incluidas edificaciones de cemento, mármol y metales, sufrirá una corrosión acelerada debido a la acción de los compuestos sulfatados.

Sin embargo, la máxima concentración de lluvias ácidas durará solo los primeros meses después de la erupción, tras lo cual las precipitaciones se localizarán gradualmente en regiones específicas. Con la llegada del invierno volcánico, la mayor parte de las precipitaciones se transformará en nieve ácida, lo que reducirá la carga de acidez sobre los ecosistemas. No obstante, para ese momento, la destrucción global de la flora y la fauna causada por las precipitaciones ácidas ya será irreversible.

El daño a los ecosistemas tendrá un impacto significativo en los procesos naturales y antropogénicos, mucho antes de que comience el enfriamiento global.

Invierno volcánico

El impacto total de la erupción de la pluma Siberiana, amplificado por la activación simultánea de numerosos volcanes, tendrá un efecto catastrófico colosal, expresado en cambios en las condiciones climáticas y ecológicas globales. Las emisiones masivas de ceniza volcánica, gases (especialmente dióxido de azufre — SO₂) y aerosoles en la atmósfera crearán una barrera infranqueable para la radiación solar durante décadas.

La alta concentración de aerosoles sulfatados en la estratosfera reflejará la mayor parte de la radiación solar, alterando el balance energético del planeta. Se espera una reducción drástica del aporte de calor, lo que provocará un enfriamiento climático extremo, una condición que puede denominarse “hiperinvierno volcánico”. Como resultado de estos procesos, la Tierra podría convertirse en una “bola de hielo”, donde las condiciones para el mantenimiento de la vida solo persistirán en regiones limitadas, principalmente en la zona ecuatorial.

Las estimaciones del impacto potencial se basan en datos históricos de grandes erupciones volcánicas. Por ejemplo, durante la máxima erupción de Yellowstone, hace 2,1 millones de años, la temperatura global disminuyó en promedio entre 3 y 5 °C. Según los cálculos, la erupción de la pluma Siberiana, cuyo tamaño supera múltiples veces dicho evento, provocaría un descenso medio de la temperatura en la Tierra de aproximadamente 24–31 °C.

En las regiones polares, la caída de temperatura podría alcanzar 28–36 °C o más, lo que resultaría en la congelación total de los principales cuerpos de agua, incluyendo el Atlántico Norte y grandes áreas del océano Pacífico. En las latitudes medias,

la temperatura descendería 24–31 °C, lo que llevaría a la destrucción total de la vegetación y provocaría una extinción masiva de organismos debido a la falta de recursos y al frío extremo.

Los ecosistemas oceánicos sufrirán una destrucción drástica. La congelación comenzará en la superficie y las zonas costeras de los océanos, lo que provocará la desaparición masiva de la biota marina a nivel global. En las regiones ecuatoriales, la temperatura descenderá entre 20 y 27 °C, lo que hará que incluso las zonas tropicales sean demasiado frías para mantener la vida.

Prácticamente toda la superficie terrestre se volverá estéril debido al frío extremo, la oscuridad persistente y la interrupción del proceso de fotosíntesis. Las cadenas alimentarias colapsarán, lo que conducirá a la destrucción de la agricultura y la extinción masiva tanto de flora y fauna como de una parte significativa de la humanidad. Solo algunos microecosistemas resistentes a condiciones extremas lograrán sobrevivir, representando los últimos vestigios de vida en la Tierra.

Los aerosoles sulfatados, que permanecerán en la estratosfera durante décadas, seguirán bloqueando la luz solar y prolongando los efectos del hiperinvierno volcánico. Sin embargo, las consecuencias de esta catástrofe se sentirán durante mucho más tiempo. Incluso después de que la ceniza y los aerosoles se asienten, la Tierra necesitará cientos o incluso miles de años para recuperar su equilibrio climático y ecológico. Factores como la congelación de los océanos, la expansión de los glaciares y los cambios drásticos en la biosfera ralentizarán aún más el proceso de recuperación del planeta.

Conclusiones sobre el Escenario 1: Erupción repentina de la pluma Siberiana

La erupción repentina de la pluma Siberiana será un evento geológico y climático catastrófico, provocando cambios globales en la atmósfera, hidrosfera y biosfera. La explosión masiva en la Meseta de Putorana destruirá todo en un radio de 150 km, formando una caldera gigantesca. Flujos piroclásticos y lava se extenderán hasta 1.500 km, convirtiendo Siberia en un desierto calcinado. La mitad del planeta quedará cubierta de ceniza volcánica.

El terremoto de magnitud 13,2, generado por la explosión de la pluma, desencadenará ondas sísmicas devastadoras que se propagarán por toda la Tierra, activando fallas tectónicas, réplicas sísmicas y megatsunamis de cientos de metros de altura, que inundarán vastas zonas costeras de los continentes.

Las emisiones de 1,5 millones de megatonnes de SO₂ provocarán lluvias ácidas con un pH inferior a 1,5, destruyendo suelos, vegetación y ecosistemas acuáticos. Los cuerpos de agua se volverán inhabitables, y la tierra perderá rápidamente su fertilidad. El colapso de la fotosíntesis y las cadenas alimentarias conducirá

a una extinción masiva de flora, fauna y, en consecuencia, de la civilización humana.

La activación masiva de supervolcanes, incluidos Yellowstone, Campi Flegrei y Toba, agravará los cambios climáticos globales, aumentando las emisiones de ceniza volcánica, dióxido de azufre (SO₂) y aerosoles. Su acumulación en la estratosfera bloqueará la luz solar, provocando un enfriamiento planetario (“hiperinvierno volcánico”) y una caída de la temperatura de varias decenas de grados. En las regiones polares, la temperatura disminuirá entre 28 y 36 °C; en las zonas templadas, entre 24 y 31 °C; y en los trópicos, entre 20 y 27 °C, lo que causará la congelación de los océanos, la detención de la circulación oceánica, la destrucción de ecosistemas y la formación de gigantescos glaciares en los continentes.

El impacto del “hiperinvierno volcánico” hará que la Tierra sea prácticamente inhabitable, y la recuperación de las condiciones naturales tomará de miles a millones de años. Este evento se convertirá en la mayor extinción en la historia geológica del planeta.

Escenario 2: Erupción gradual de la pluma Siberiana

El segundo escenario de la erupción de la pluma Siberiana no implica una explosión repentina, sino una serie progresiva de erupciones de gases y flujos de lava a través de fracturas y zonas debilitadas de la corteza terrestre. Este proceso es comparable a la formación de los Traps Siberianos, que ocurrió en la misma región al final del período Pérmico, hace 250 millones de años. La formación de la provincia ígnea de los Traps Siberianos fue la mayor manifestación del vulcanismo terrestre. Durante este evento, la Tierra experimentó la mayor catástrofe ecológica de su historia: la

extinción masiva del Pérmico-Triásico, en la que desaparecieron hasta el 90 % de las especies marinas y el 70 % de las especies terrestres (ver Fig. 82, 83). Los datos geológicos⁵¹ sugieren que las erupciones siberianas en el cráter de Siberia Oriental pudieron ser extraordinariamente explosivas (Campbell et al., 1992), con depósitos piroclásticos de hasta 800 metros de espesor (Khain, 1985). La energía de las explosiones era tan intensa que expulsaba rocas sedimentarias desde profundidades de hasta 10 km.



Fig. 82
Representación artística de las erupciones en Siberia durante la extinción del Pérmico-Triásico.

Ilustración: Image by Tigran Nshanian.



Fig. 83
Representación artística: los Lystrosaurus, sobrevivientes de la extinción masiva, dominan un paisaje devastado, ilustrando el cambio del ecosistema tras la crisis del Pérmico-Triásico.

Ilustración: Julio Lacerda.

⁵¹ 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 [La estabilidad de la capa de ozono estratosférico durante la erupción del final del Pérmico de los Traps Siberianos]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 365, 1843–1866. Disponible en: <http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2046>

La actividad volcánica de la región se produjo en varias etapas, alterando drásticamente el paisaje geológico. Al principio, el magma penetró en las capas sedimentarias, formando diversos cuerpos intrusivos, como las dolinas. Posteriormente, el carácter de las erupciones se volvió explosivo, lo que provocó la expulsión de una enorme cantidad de material piroclástico y la formación de potentes depósitos volcánicos. La culminación de este proceso fue la efusión de colosales volúmenes de lava basáltica, que se estiman en cientos de miles de kilómetros cúbicos. El volumen total de las rocas volcánicas, incluidas las intrusiones, los depósitos piroclásticos y los flujos de lava, se estima en aproximadamente 3 millones de km³. Es importante destacar que esta cifra solo refleja las rocas conservadas hasta la actualidad, y se puede afirmar con certeza que las dimensiones originales de las erupciones fueron significativamente mayores, pero posteriormente sufrieron erosión.

La formación de los Traps Siberianos provocó colosales emisiones de dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), cloruro de hidrógeno (HCl) y otras sustancias volátiles. Estos gases intensificaron drásticamente el efecto invernadero y causaron un rápido calentamiento después del invierno volcánico. La concentración de CO₂ en la atmósfera alcanzó 8.000 ppm, lo que es 20 veces superior a los niveles actuales. Como resultado, la temperatura de los mares tropicales aumentó de 22–25 °C a 30 °C, y los océanos comenzaron a acidificarse, provocando la extinción de

organismos con esqueletos carbonatados.

Las emisiones totales fueron: Azufre: hasta 7800 gigatoneladas. Cloro: hasta 8700 gigatoneladas, Flúor: hasta 13 600 gigatoneladas⁵².

La ceniza volcánica y los aerosoles bloquearon la luz solar, interrumpieron la fotosíntesis, provocaron la desaparición masiva de bosques y el colapso de las cadenas alimentarias, lo que agravó la extinción tanto de especies vegetales como animales. La crisis ecológica de aquella época es una prueba del potencial impacto devastador que podría producirse incluso en un escenario de erupción gradual de la pluma Siberiana.

Según las investigaciones, el período de erupciones que comenzó hace 250 millones de años fue provocado por el ascenso de una pluma del manto, un poderoso flujo de magma que emergió desde las profundidades de la Tierra en la región de la actual Meseta de Putorana. La repetición de un escenario similar en la actualidad conduciría a la formación de vastas mesetas de lava, que estarían entre las estructuras geológicas más grandes del planeta. Estas erupciones destruirían casi toda la vida en un radio de varios miles de kilómetros, abarcando Siberia y regiones vecinas. El registro geológico muestra que eventos similares han ocurrido en múltiples ocasiones, con la formación de enormes campos de basalto⁵³, y que cada uno de ellos estuvo acompañado de una extinción masiva a gran escala (fig. 84).

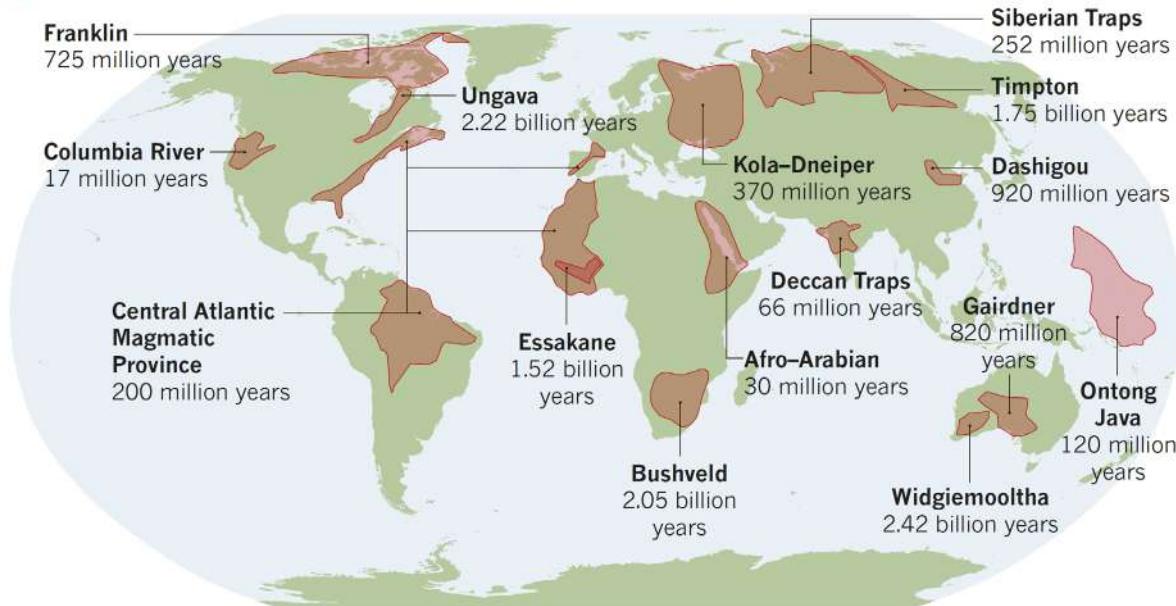
⁵²Black, B. A., Elkins-Tanton, L. T., Rowe, M. C., & Ukkstins Peate, I. (2012). Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps [Magnitud y consecuencias de la liberación de volátiles de los Traps Siberianos]. *Earth and Planetary Science Letters*, 317–318, 363–373. ISSN 0012-821X. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001>

⁵³Witze, A. (2017). Earth's lost history of planet-altering eruptions revealed [Revelada la historia perdida de las erupciones que alteran el planeta]. *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



SOURCE: RICHARD ERNST

Fig. 84

Mapa de las mayores erupciones volcánicas en la historia de la Tierra, con la ubicación geográfica y la antigüedad de las mesetas de lava formadas por estos eventos.

Ilustración: Richard Ernst

Fuente: Witze, A. Earth's lost history of planet-altering eruptions revealed [Revelada la historia perdida de las erupciones que alteran el planeta]. Nature, 543, 295–296 (2017).

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

Al igual que en épocas geológicas anteriores, el magma ascenderá desde el manto, penetrando a través de fracturas en la corteza terrestre, de manera similar a cómo una sustancia blanda se filtra a través de un filtro denso. Este proceso conducirá al sobrecaleamiento de la superficie, la formación de numerosas intrusiones magmáticas dentro de la corteza y la fusión de la litosfera.

En la Fig. 85, se muestra la distribución de las rocas efusivas en Siberia: Flujos de lava (color violeta), cuerpos magmáticos solidificados en la corteza terrestre (color verde). Las zonas verdes en el mapa ilustran cómo el magma, al erosionar la corteza terrestre, formó fracturas y se infiltró a lo largo de estas zonas debilitadas. Este aumento de la presión magmática podría desencadenar nuevamente un proceso similar.

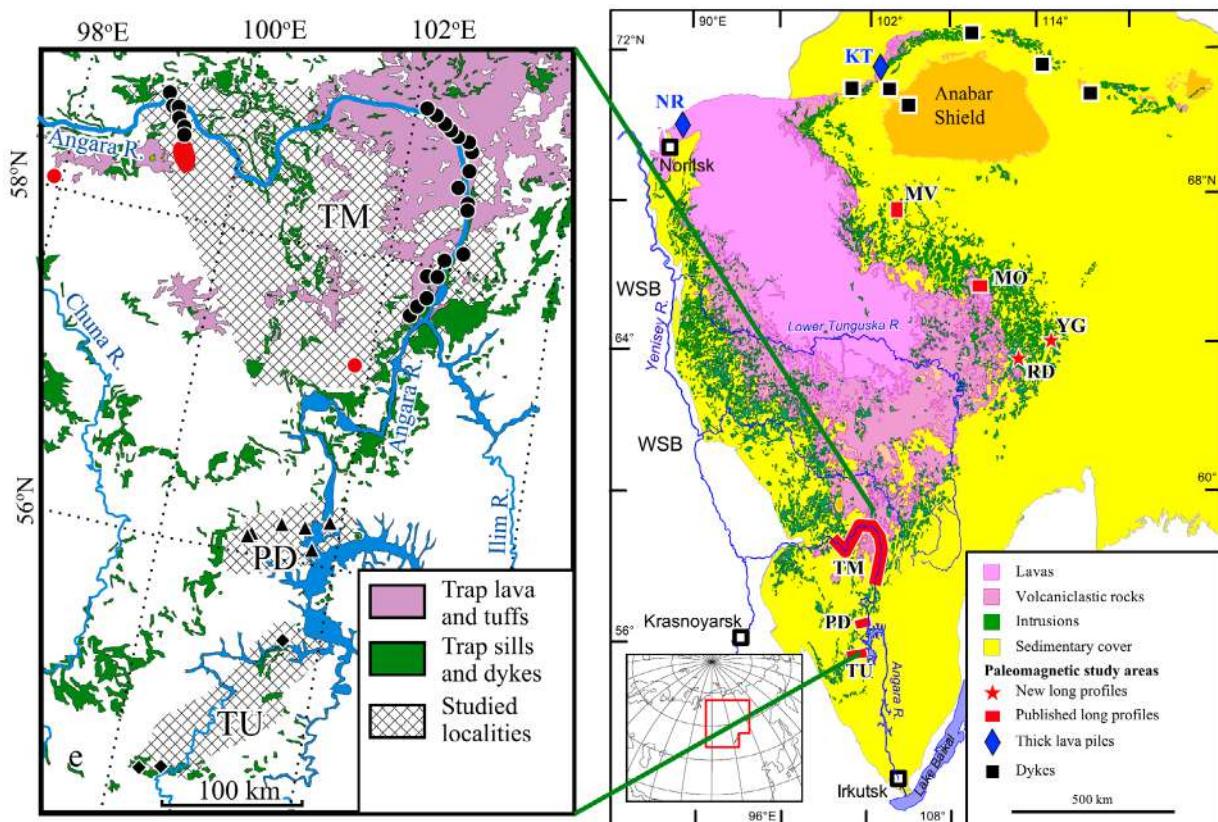


Fig. 85

Derecha: Mapa general de la provincia ígnea de los Traps Siberianos (simplificado y modificado de Svensen et al., 2009). En el mapa general, las principales estructuras geológicas están representadas por diferentes colores: rosa - flujos de lava, verde - cuerpos intrusivos, amarillo - secuencias sedimentarias. Izquierdo: En el mapa detallado de la parte izquierda de la imagen se muestra la distribución del magmatismo de los Traps Siberianos: violetas - lavas y tobas, verde: Sills y diques.

Fuente: 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 [Paleomagnetismo de intrusiones de traps, Siberia Oriental: Implicaciones para el emplazamiento de basaltos de inundación y la crisis de la biosfera en el Permo-Triásico]. Earth and Planetary Science Letters, 394, 242-253.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029>

El escenario de erupción gradual es comparable a la explosión repentina de la pluma Siberiana, pero prolongado en el tiempo. Se puede imaginar como una sucesión de volcanes en erupción cada semana, junto con la aparición de grietas súbitas a través de las cuales fluirán lavas basálticas por toda Siberia Occidental.

En el mapa (Fig. 86): violeta - representa las áreas cubiertas por flujos de lava. En la plataforma de Siberia Oriental, donde la corteza es más gruesa y estable, las lavas se dispersaron en grandes extensiones. En Siberia Occidental, que posee una corteza más delgada, joven e inestable, las erupciones ocurrieron a lo largo de

fracturas alargadas o rifts. Rojo: Indica las zonas de tobas, compuestas por fragmentos piroclásticos cementados y cenizas volcánicas.

Es importante señalar que las erupciones en Siberia Oriental y Occidental serán diferentes. Bajo Siberia Oriental, el magma se encuentra con el denso cráton arcaico, lo que crea una gran barrera. A medida que asciende, el magma penetra en las rocas circundantes, se enfria y se enriquece con componentes volátiles, lo que puede llevar a erupciones explosivas con una alta emisión de ceniza y la posible formación de magma ácido y viscoso.

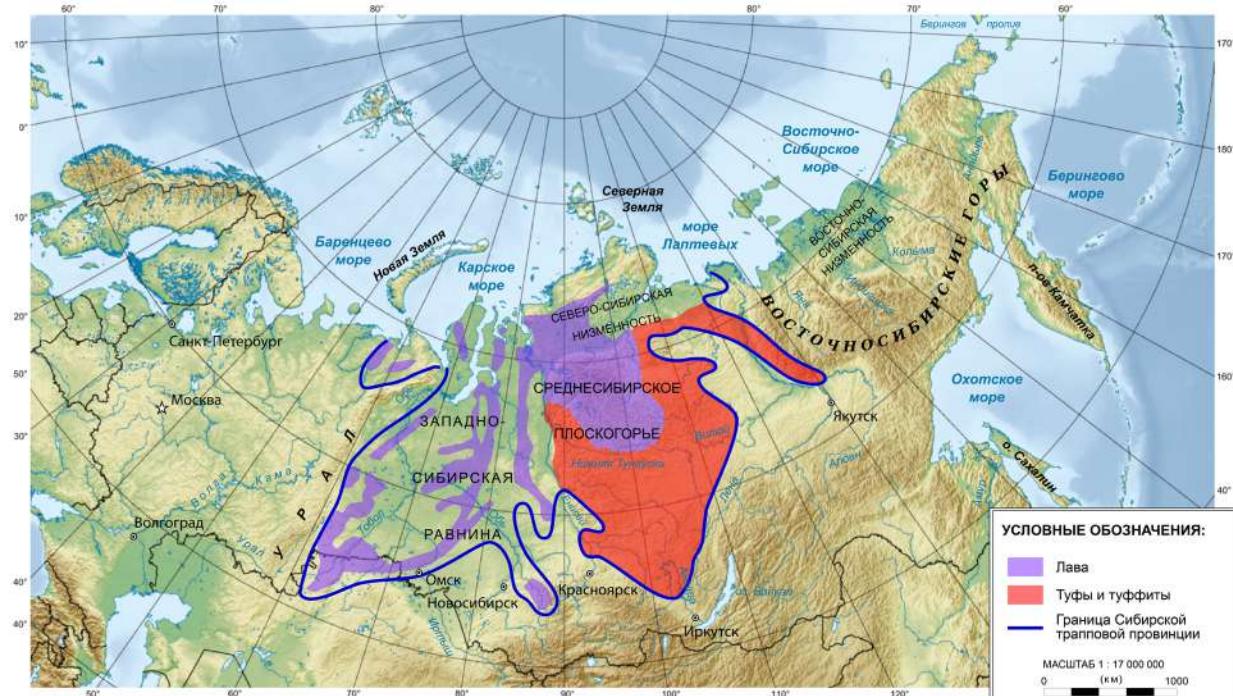


Fig. 86

Mapa de la provincia ígnea de los Traps Siberianos. El mapa muestra las principales estructuras geológicas, incluyendo las áreas de distribución de flujos de lava (color violeta) y de tobas con tufitas (color púrpura). Las líneas azules indican los límites de la provincia ígnea de los Traps Siberianos.

Fuente: [wikipedia.org](https://en.wikipedia.org), basado en los datos de Masaitis, 1983.

En cambio, bajo Siberia Occidental, donde la corteza es delgada y joven, se espera que predominen las erupciones de lavas basálticas líquidas.

Se espera que el área cubierta por flujos de lava y tobas sea de alrededor de 7 millones de km² en Siberia Occidental y Oriental, lo que es comparable con el tamaño de la actual Australia. Sin embargo, las áreas afectadas por la degradación probablemente superarán decenas de millones de kilómetros cuadrados. Estas regiones estarán expuestas a incendios masivos, erosión debido a lluvias ácidas, caídas de ceniza, deslizamientos de tierra y flujos de lodo que transportarán sedimentos volcánicos. Toda el permafrost de Siberia sufrirá destrucción.

Es importante destacar que en la península de Taimyr, al oeste de la Meseta de Putorana, se encuentran los mayores yacimientos de níquel, cobre y metales del grupo de platino del mundo, actualmente explotados por la empresa Norilsk

Nickel. Estos yacimientos tienen un origen magmático y se formaron hace unos 250 millones de años durante las erupciones de la provincia magmática de los Traps Siberianos, lo que favoreció la formación de nudos minerales únicos. Se cree que la alta concentración de níquel en los magmas de aquella época estuvo relacionada con el ascenso de materiales provenientes del núcleo de la Tierra a la superficie. Actualmente, se observa el ascenso de la pluma magmática en Siberia, cuyo aceleramiento fue provocado por el desplazamiento del núcleo en 1998 hacia la península de Taimyr, tal como lo estableció el doctor en ciencias Yuri Barkin. En el futuro cercano, existe un alto riesgo de que se produzca la erupción de la pluma Siberiana cerca de la ciudad de Norilsk, en el mismo lugar donde ocurrió hace 250 millones de años.

A continuación, analizaremos las consecuencias de este escenario para Rusia y el mundo entero.

Consecuencias de la ruptura gradual de la pluma siberiana para Rusia

Existen estudios que determinan con precisión la ubicación de las lentes fundidas de la asténosfera en la litosfera del sur de Siberia, lo cual se debe a la corteza delgada de esta región. Sin embargo, el norte de Siberia, según los mapas sísmicos, sigue siendo prácticamente inexplorado, siendo una “zona en blanco” en los estudios de la corteza inferior y el manto. Esto hace imposible predecir la ubicación de los primeros brotes de lava y erupciones de magmas ricos en gases, especialmente teniendo en cuenta la falta de monitoreo adecuado en la región de la pluma Siberiana.

Se sabe que los primeros signos de la catástrofe inminente serán el aumento de la actividad sísmica y los brotes locales de gas a lo largo de los bordes del bloque siberiano de la corteza terrestre. A medida que el magma ascienda hacia la superficie, comenzará la fusión acelerada del permafrost, lo que podría provocar la destrucción de la infraestructura construida sobre suelos congelados. Además, el calentamiento del suelo podría desencadenar explosiones de hidratos de gas (metano en la estructura del hielo), lo que generaría grandes bóvedas de gas y destrucción de asentamientos humanos. Los incendios masivos se convertirán en una inevitabilidad, provocados por la liberación de metano, el sobrecalentamiento del suelo y la emisión de gases volcánicos. Los hidrocarburos en los yacimientos de Siberia y las cuencas de carbón, como el Kuzbass, podrían encenderse, como ya ocurrió en el período Pérmico-Triásico, cuando los depósitos de carbón fueron sometidos a un calentamiento térmico de hasta 600 °C⁵⁴.

Las erupciones comenzarán de manera repentina, afectando múltiples ubicaciones en una extensa área. Los terremotos de magnitud 7-8, las fracturas y los desplazamientos tectónicos provocarán el derrame de lava en cientos de miles de kilómetros cuadrados. En las zonas cercanas a los puntos de erupción, ocurrirá una muerte masiva de plantas, animales y seres humanos debido a los gases tóxicos que formarán un “cocktail” venenoso en la atmósfera.

Ya en los primeros días se espera la muerte de millones de personas, mientras que el polvo volcánico destruirá las redes de transporte, asentándose sobre carreteras y vías ferroviarias, reduciendo la visibilidad y destruyendo la infraestructura. La aviación también se detendrá por completo debido al peligro que representa el polvo volcánico para los motores de aviones y helicópteros.

El deshielo del permafrost agravará aún más la situación: las rutas de comunicación, los oleoductos, los edificios y las infraestructuras comenzarán a destruirse. Muchas ciudades quedarán sin acceso a agua, alimentos y electricidad, lo que provocará una crisis humanitaria. La evacuación masiva será imposible en una gran parte del área afectada por la erupción, ya que la lava, los gases, los incendios y las lluvias ácidas harán que las rutas de transporte se vuelvan intransitables. El pánico se apoderará de millones de personas, y la evacuación de millones de residentes de Siberia conducirá a una inestabilidad social y disturbios masivos.

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 [Pruebas de campo de la combustión de carbón vinculan los Traps Siberianos de 252 Ma con la alteración global del carbono]. *Geology*, 48(10), 986-991. <https://doi.org/10.1130/G47365.1>

La economía del país sufrirá pérdidas catastróficas: la extracción de petróleo, gas, carbón, diamantes y metales se detendrá debido a la destrucción física de la infraestructura, lo que llevará a la paralización de las empresas, la escasez de materias primas y de electricidad. La actividad volcánica destruirá los recursos naturales de la región, incluidos el petróleo y el carbón, eliminando los activos económicos clave del país. Décadas después de la erupción, Siberia seguirá siendo

una zona de desastre ecológico. La catástrofe que afectó a Rusia cambiará irreversiblemente su geografía, economía y sociedad. Solo el 25 % del territorio del país seguirá siendo habitable, pero enfrentará una enorme presión debido a los crisis ecológicos y sociales. Las posiciones económicas, los monumentos históricos y la mayoría de los recursos naturales se perderán, y Siberia se convertirá en una región inhóspita para la existencia de la civilización moderna.

Consecuencias de la ruptura gradual de la pluma Siberiana para todo el mundo

Las consecuencias globales de la erupción de la pluma Siberiana afectarán a todo el mundo y se desarrollará en varias etapas.

En los primeros días, se interrumpirán las rutas de transporte a través de Siberia entre Europa y Asia, y el transporte aéreo se detendrá debido a la ceniza volcánica en la atmósfera. Estos procesos perturbarán la logística global, provocando una crisis alimentaria masiva, ya que Rusia, uno de los principales exportadores de alimentos, cesará el suministro de trigo y otros productos. La interrupción de las exportaciones de petróleo, gas y otros recursos naturales de Rusia causará un aumento de precios, una crisis energética e inestabilidad económica en muchos países. La economía mundial se enfrentará a una reacción en cadena de shock financieros y perturbaciones sociales.

Las nubes de ceniza y los aerosoles sulfurosos causarán un efecto de oscurecimiento global, reduciendo la cantidad de luz solar que llega a la Tierra. Esto conducirá a un “invierno volcánico”, con caídas de temperatura de entre 2 y 3 °C. Las lluvias ácidas y la contaminación del suelo afectarán la agricultura, no solo en Rusia, sino en todo el mundo. El hambre masiva, la escasez de agua, el aire tóxico y la destrucción del sistema

climático llevarán a la muerte gradual de miles de millones de personas y animales. En unos pocos años, los sistemas sociales colapsarán.

Con el tiempo, la ceniza volcánica comenzará a asentarse, pero se producirán cambios climáticos bruscos. La liberación de metano y dióxido de carbono debido al deshielo del permafrost aumentará el efecto invernadero. La temperatura empezará a aumentar gradualmente entre 5 y 10 °C, lo que provocará un clima inestable, caracterizado por cambios abruptos de temperatura. La destrucción de la capa de ozono aumentará los niveles de radiación ultravioleta en el hemisferio norte, agravando aún más las consecuencias de las erupciones.

A pesar de la distancia de Siberia, Europa se enfrentará a graves consecuencias de la erupción de la pluma Siberiana: la ceniza cubrirá Europa del Norte y Europa del Este, provocando numerosas enfermedades respiratorias en la población. Las lluvias ácidas destruirán los bosques, la infraestructura urbana y las zonas agrícolas. Despues de la fase de enfriamiento temporal, comenzará un rápido calentamiento, acompañado de sequías en el sur y inundaciones en el centro y el norte de Europa.

La migración masiva desde Rusia, Asia y el Medio Oriente provocará una crisis demográfica y agravará la competencia por los recursos. Los países europeos lucharán contra desafíos ecológicos, económicos y sociales continuos.

A pesar de la distancia de Siberia, Europa enfrentará graves consecuencias de la erupción de la pluma Siberiana: la ceniza cubrirá Europa del Norte y Europa del Este, provocando numerosas enfermedades respiratorias en la población. Las lluvias ácidas destruirán los bosques, la infraestructura urbana y las zonas agrícolas. Después de la fase de enfriamiento temporal, comenzará un rápido calentamiento, acompañado de sequías en el sur y inundaciones

en el centro y el norte de Europa. La migración masiva desde Rusia, Asia y el Medio Oriente provocará una crisis demográfica y agravará la competencia por los recursos. Los países europeos lucharán contra desafíos ecológicos, económicos y sociales continuos.

Con el tiempo, las consecuencias de las erupciones continuas se volverán cada vez más destructivas. Los crisis climáticos y ecológicos se agudizarán, y la humanidad perderá muchas de las tecnologías y conocimientos modernos, sufriendo un retroceso profundo en su desarrollo. La civilización mundial se encontrará al borde del colapso.

Consecuencias a largo plazo del gradual ascenso de la pluma Siberiana para el planeta

La erupción gradual de la pluma Siberiana provocará consecuencias a largo plazo a gran escala, que transformarán radicalmente el planeta durante millones de años. La atmósfera se contaminará globalmente con sustancias tóxicas, lo que llevará a la formación de lluvias ácidas a escala planetaria y la destrucción de la capa de ozono.

Los océanos sufrirán una acidificación crítica, lo que provocará la muerte masiva de organismos marinos. Estos procesos conducirán al colapso de los ecosistemas marinos, la alteración de las cadenas alimentarias globales y el colapso de toda la biodiversidad marina.

En la tierra, la extinción masiva será inevitable debido a las emisiones tóxicas en la atmósfera, la destrucción de los ecosistemas del suelo y

la desaparición de la mayoría de las plantas. La pérdida de polinizadores llevará al colapso de los ecosistemas terrestres. Se estima que la extinción afectará entre el 75 % y el 95 % de todas las especies existentes.

Como resultado de la erupción, se producirá una crisis climática, biológica y geológica compleja, que transformará completamente la biosfera de la Tierra. Este proceso llevará al colapso de la civilización humana, la muerte de miles de millones de personas y un retroceso de los grupos humanos sobrevivientes hasta el nivel de desarrollo de la edad de piedra. La magnitud de esta catástrofe será comparable con las mayores extinciones masivas en la historia de la Tierra, lo que abrirá una nueva etapa evolutiva para la biosfera, que tardará al menos millones de años en desarrollarse.

Escenario 3:

Desgasificación controlada planificada

Técnicas existentes de geoingeniería volcánica

Dado el creciente estrés bajo la placa de Siberia Occidental y el cráton de Siberia Oriental, relacionado con el ascenso de la pluma Siberiana, es necesario tomar medidas urgentes para minimizar las posibles consecuencias catastróficas. Una de estas soluciones es el controlado alivio de presión, la lava y los gases de las fuentes magmáticas secundarias, es decir, la **desgasificación planificada controlada**.

Las investigaciones científicas actuales consideran la desgasificación de las cámaras magmáticas como un método prometedor para prevenir erupciones a gran escala. Este enfoque proporciona una base para aplicar tecnologías de geoingeniería volcánica no solo en volcanes o supervolcanes, sino también para gestionar la actividad de las plumas magmáticas. El concepto de desgasificación controlada se ha reflejado en una serie de publicaciones científicas y patentes desarrolladas por especialistas de varios países.

Los fundamentos teóricos de la geoingeniería volcánica se establecieron desde el siglo XX, y los experimentos prácticos se han llevado a cabo a lo largo del último siglo. Los métodos de intervención volcánica incluyeron perforación de cráteres, drenaje de lagos volcánicos, la creación de canales para desviar lava, enfriamiento de

flujos de lava con agua de mar, bombardeo de flujos de lava y extracción de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono y metano) (Fig. 87).

Desde la década de 1960, el Servicio Geológico de los EE. UU. (USGS) ha realizado perforaciones en áreas de lagos de lava en el volcán Kīlauea en Hawái para redirigir la lava. Iniciativas similares se están llevando a cabo en Japón, Islandia e Italia. Por ejemplo, en Japón, se probaron tecnologías para reducir la presión en cámaras magmáticas, mientras que en Islandia, se tuvo una experiencia exitosa en la redirección de lava en la isla Heimaey, donde los flujos fueron enfriados con cañones de agua. En Italia, se están desarrollando sistemas de alerta temprana y métodos para gestionar los flujos de lava; un ejemplo de esto fue la destrucción explosiva de barreras de lava en Etna en 1983.

Hoy en día, se llevan a cabo conferencias científicas internacionales y simposios dedicados a la perforación profunda en áreas de actividad volcánica y geotérmica, lo que amplía las perspectivas de aplicar la geoingeniería volcánica para prevenir erupciones y reducir sus consecuencias a nivel global.



En el diagrama (fig. 88) se presenta la cronología de los casos más notables de geoingeniería volcánica. Los círculos negros representan intervenciones planificadas, mientras que los círculos rojos indican impactos no intencionados en la actividad volcánica.

También existen métodos patentados para la desgasificación planificada y la reducción

de riesgos de erupciones volcánicas y supervolcanes.

Por ejemplo, el principio de una de las tecnologías patentadas por dos especialistas rusos se basa en prevenir erupciones volcánicas incontroladas tipo avalancha mediante perforación inclinada de pozos y regulación de la presión en las cámaras magmáticas (Fig. 89).

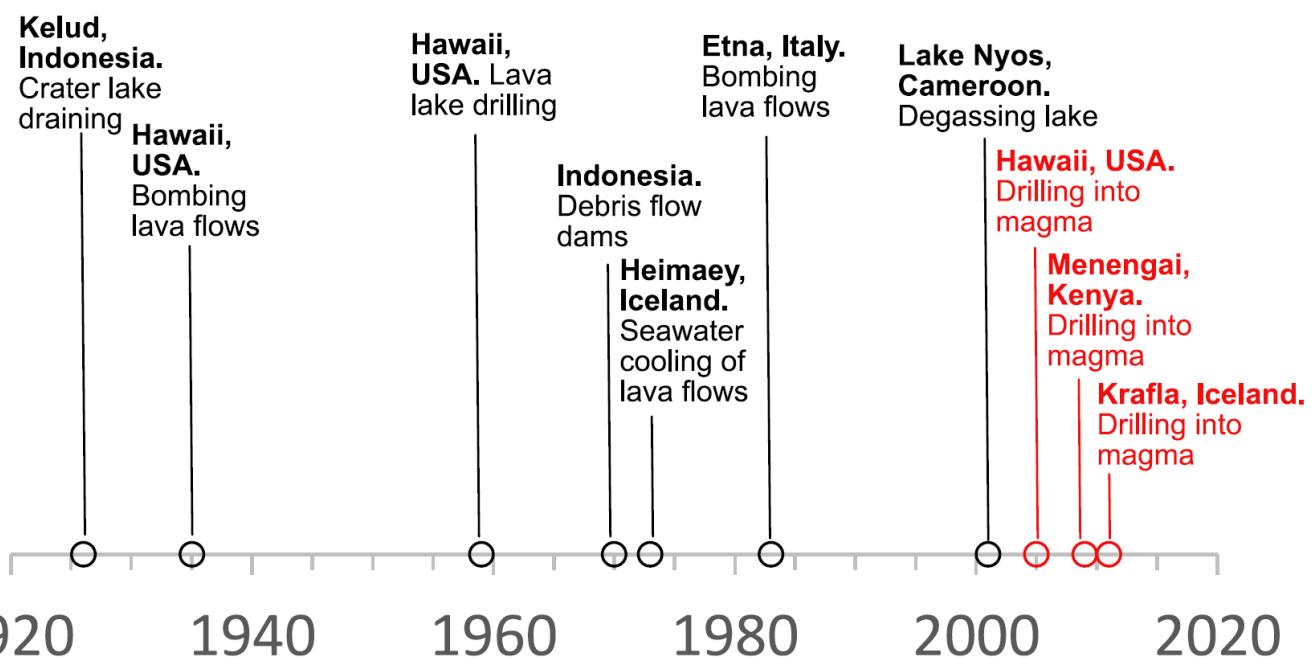


Fig. 88

Cronología de algunos casos notables de geoingeniería volcánica. Los círculos negros representan intervenciones planificadas, mientras que los círculos rojos indican intervenciones volcánicas no intencionadas.

Fuente: Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). The Ethics of Volcano Geoengineering [La ética de la geoingeniería volcánica]. *Earth's Future*, 11(10), e2023EF003714. <https://doi.org/10.1029/2023EF003714>

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU

(11)

2 343 508

(13) С1



(51) МПК

G01V 9/00 (2006.01)

G01V 11/00 (2006.01)

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 С1, 10.12.1997. SU 1193223
A, 23.11.1985. RU 2073769 С1, 20.02.1997. RU
2057839 С1, 10.04.1996. RU 2231092 С2,
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):

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

(73) Патентообладатель(и):

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

R U
2 3 4 3 5 0 8
C 1

(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

Fig. 89

Patente: Método para prevenir erupciones volcánicas tipo avalancha.

La invención se refiere a los métodos para prevenir erupciones volcánicas incontroladas tipo avalancha y organizar el transporte controlado de magma para su uso en construcción, lo que mejora la eficiencia del enfoque.

Esencia de la invención: El método implica controlar la presión en los focos magmáticos secundarios bajo los volcanes que muestran actividad sulfurosa. Para ello, se realiza perforación inclinada de canales en la base del foco magmático secundario. Se inyecta gas comprimido en este foco. Se aumenta la presión en el foco magmático secundario y se ralentiza la entrada de magma desde el foco primario. En este proceso, se extrae y transporta el magma acumulado en el foco magmático secundario para construcción a través de los canales perforados. No se permite que se alcance la presión crítica en la que ocurre una erupción tipo avalancha.

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

Otra tecnología ha sido desarrollada por un inventor estadounidense (Fig. 90). Esta tecnología describe métodos para bombear magma de cámaras magmáticas volcánicas, como la cámara en el supervolcán de Yellowstone, con el fin de prevenir una posible

erupción catastrófica. La idea principal consiste en crear canales artificiales (tuberías) para llevar magma a la superficie, donde puede ser procesado y utilizado, por ejemplo, para generar energía.

**(12) United States Patent
Stratford**

(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

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

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

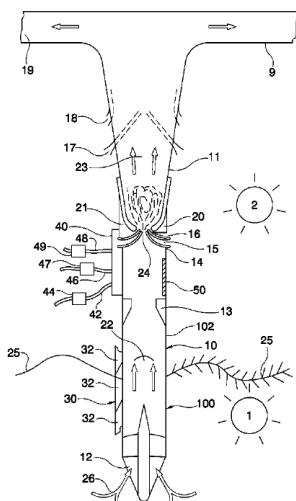


Fig. 90

Patente: Sistemas de evacuación de magma para prevenir explosiones de supervolcanes.

El aparato controla la extracción de magma volcánico para evitar explosiones. El magma se extrae a través de un solo tubo de evacuación, en el cual el flujo de magma se calienta para evitar que se adhiera al tubo. Para el calentamiento, se pueden usar pequeñas cámaras de combustión para suministrar vapor, que a su vez calienta y estabiliza el flujo de magma. Si es necesario, se mantiene la estabilidad mediante enfriamiento central con chorros de agua desde boquillas ubicadas en las paredes del tubo.

Fuente:

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

También, un ejemplo de desgasificación exitosa es el proyecto japonés “[Perforación científica del volcán Unzen](#)” (USDP). Esta es una iniciativa de 6 años, comenzada en abril de 1999, que tiene como objetivo el estudio de la historia de crecimiento, la estructura subterránea y los procesos de ascenso de magma en el volcán Unzen (Fig. 91). La primera fase incluyó la perforación de dos pozos en las

laderas del volcán y la creación de un modelo de su estructura. La segunda fase se centró en la perforación de un canal de magma de las erupciones de 1990–1995 para analizar el mecanismo de desgasificación. Para lograr una perforación exitosa, se desarrolló una estrategia que incluye perforación vertical seguida de un incremento de la inclinación del tronco del pozo (Fig. 92).

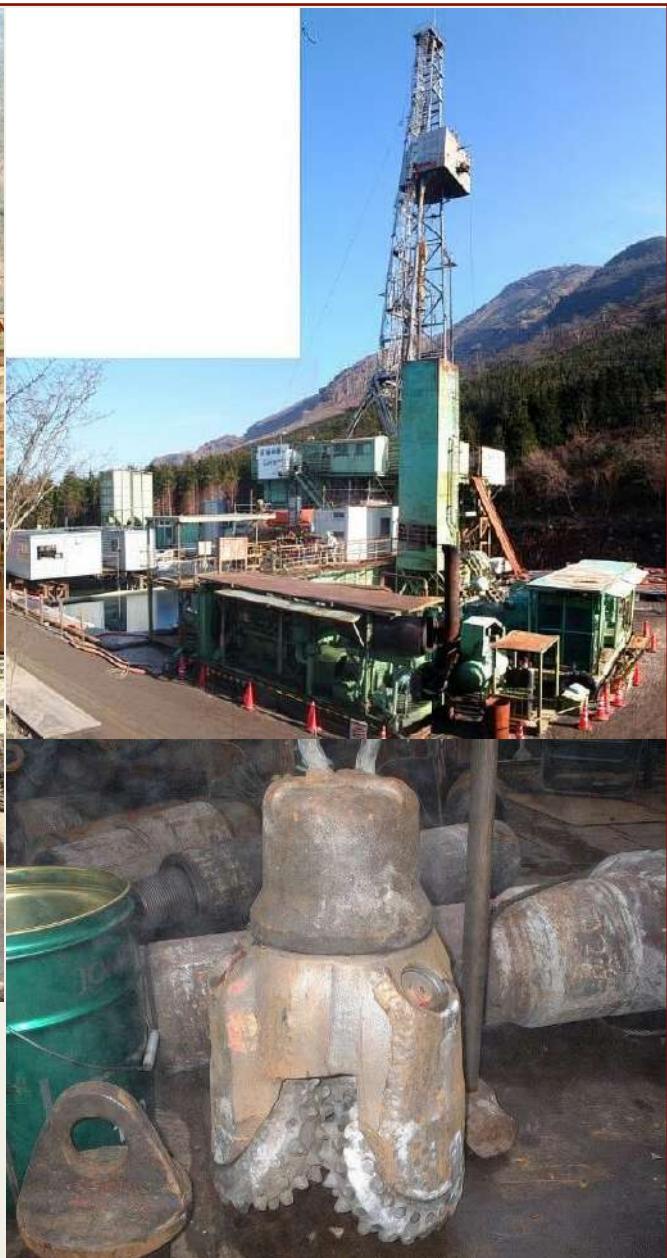
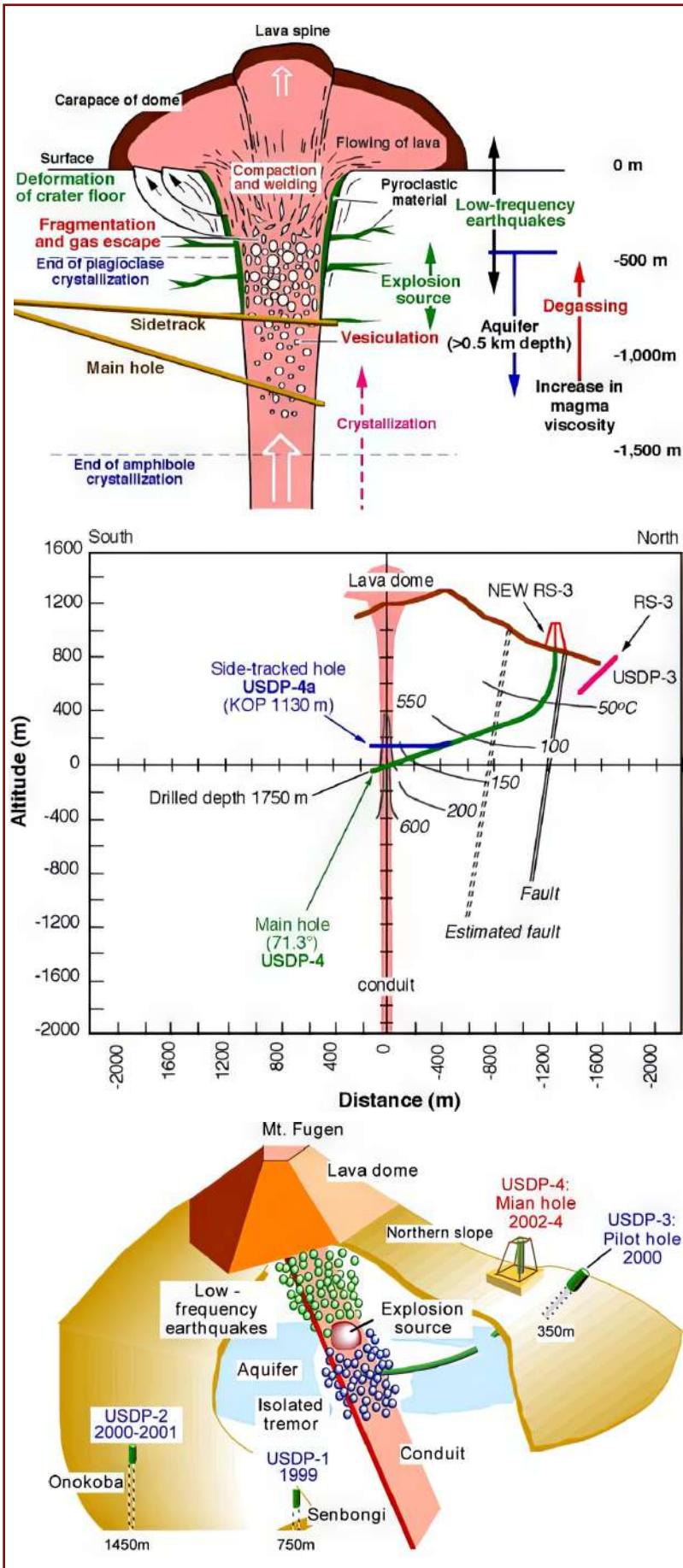


Fig 91
Equipo de perforación para la perforación del volcán Unzen en 1995.

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



Hoy en día, la humanidad cuenta con el suficiente potencial tecnológico y de ingeniería para intervenir en los sistemas volcánicos, pero cada caso de desgasificación planificada requiere una preparación exhaustiva, el análisis de grandes volúmenes de datos y cálculos precisos. Y aun en este caso, los riesgos persisten.

Los ejemplos mencionados se han probado en volcanes comunes, que, sin duda, son de un tamaño muy diferente al de la escala de la gigantesca pluma magmática de Siberia. Esta pluma representa una amenaza que supera considerablemente incluso la potencia de un supervolcán, comparable a la energía liberada por las explosiones de miles de calderas de Yellowstone. Sin embargo, la discusión de este problema ha cobrado relevancia precisamente porque existen enfoques potenciales para su solución.

Con el enfoque adecuado, la humanidad es capaz de desarrollar un programa de desgasificación de la pluma magmática, basado en el trabajo global de los especialistas. Su objetivo principal será minimizar las consecuencias del ascenso de la pluma Siberiana mediante la reducción de la presión de la lava y los gases en los focos magmáticos secundarios, lo que permitirá prevenir erupciones incontroladas a gran escala.

La implementación de dicho programa requerirá estrecha cooperación internacional, consolidación de esfuerzos de científicos e ingenieros de todo el mundo. Solo un enfoque unificado permitirá desarrollar soluciones efectivas orientadas a garantizar la seguridad de toda la humanidad.

Ejemplo de programa de desgasificación planificada de la pluma Siberiana

El programa puede incluir el desarrollo simultáneo de varias áreas:

1. Creación de una red de monitoreo

1.1 Será necesario crear una red de sensores de alta sensibilidad y observación por satélite para monitorear la actividad sísmica y térmica en la región. Esto permitirá detectar de manera temprana las zonas de penetración de los focos magmáticos secundarios.

1.2 Será necesario crear una red de sensores de alta sensibilidad y observación por satélite para monitorear la actividad sísmica y térmica en la región. Esto permitirá detectar de manera temprana las zonas de penetración de los focos

magmáticos secundarios.

1.3 Luego, será necesario perforar pozos de investigación científica y de monitoreo e instalar sensores de presión, temperatura y actividad sísmica en las zonas anómalas.

2. Desarrollo de las tecnologías de desgasificación controlada y bloqueo de canales magmáticos:

2.1 Será necesario desarrollar un plan de perforación de pozos inclinados profundos (hasta 8 km de profundidad) en zonas seguras. Se requerirá un cálculo detallado de las trayectorias de los pozos inclinados para alcanzar los focos secundarios.

Será necesario utilizar tecnologías de perforación resistentes a altas temperaturas y presión, como el uso de materiales resistentes al calor para reforzar las paredes de los pozos, y crear un sistema de monitoreo de presión y temperatura en los pozos.

2.2 Será necesario desarrollar el proceso de evacuación de gases y lava mediante la gestión gradual de la presión en los focos secundarios con la ayuda de un sistema especializado. Para ello, será esencial controlar la velocidad de desgasificación para evitar fluctuaciones abruptas de presión, así como utilizar un sistema de compresores para controlar la presión de los gases. Se requerirá el uso de un sistema de filtración y refrigeración para prevenir la liberación de sustancias tóxicas en la atmósfera. La extracción de lava y gases se llevará a cabo hasta la estabilización de la presión en cada uno de los focos.

2.3 Luego, será necesario desarrollar un plan de explosión nuclear dirigida en pozos específicos para sellar las capas sobre los focos magmáticos secundarios. Esto permitirá prevenir la salida excesiva de magma hacia la superficie y minimizar la liberación de ceniza.

La liberación gradual de presión garantizará la estabilidad de Siberia y protegerá los principales centros urbanos, excepto posiblemente Norilsk y los poblados cercanos.

2.4 Durante el proceso de extracción de lava de los focos, será necesario controlar en lo posible sus derramamientos. Se deberán tomar medidas para dirigir la lava a través de canales especialmente preparados hacia los mares árticos. También será necesario desarrollar un programa para utilizar la lava en proyectos de construcción (por ejemplo, para crear islas artificiales o reforzar las costas).

3. Evacuación de la población:

Será necesario implementar un sistema de alerta temprana y desarrollar planes de evacuación en caso de situaciones imprevistas. También será fundamental una organización planificada de evacuación segura de la población desde las zonas de riesgo, considerando su adaptación y apoyo social, con la posibilidad de relocalización a largo plazo.

4. Preservación de la infraestructura:

Será necesario desarrollar planes de protección y evacuación de los objetos estratégicos desde las zonas expuestas al riesgo de inundación por lava. Esto incluye la creación de almacenes de reserva en territorios seguros para los recursos estratégicos evacuados de la región, tales como petróleo, gas, metales no ferrosos y preciosos, minerales, fertilizantes, alimentos, agua y medicamentos.

Justificación de la elección del lugar para la perforación de pozos de investigación para el monitoreo de la dinámica de la pluma magmática actual de Siberia

Para comprender con qué rapidez y en qué dirección ocurre la penetración de la pluma magmática y la dispersión de su cabeza, así como su infiltración a través de las fisuras de la corteza terrestre, el primer paso es realizar un monitoreo de los parámetros geotérmicos y geofísicos a gran profundidad. Para tales investigaciones, es necesario perforar nuevos pozos y realizar mediciones regulares de

temperatura, presión, muestras de composición gaseosa y marcadores de intensificación de los procesos magmáticos, ruidos sísmicos y otros parámetros.

Para estos estudios, se han establecido 10 puntos para la perforación de pozos de investigación científica (Fig. 93, 94).

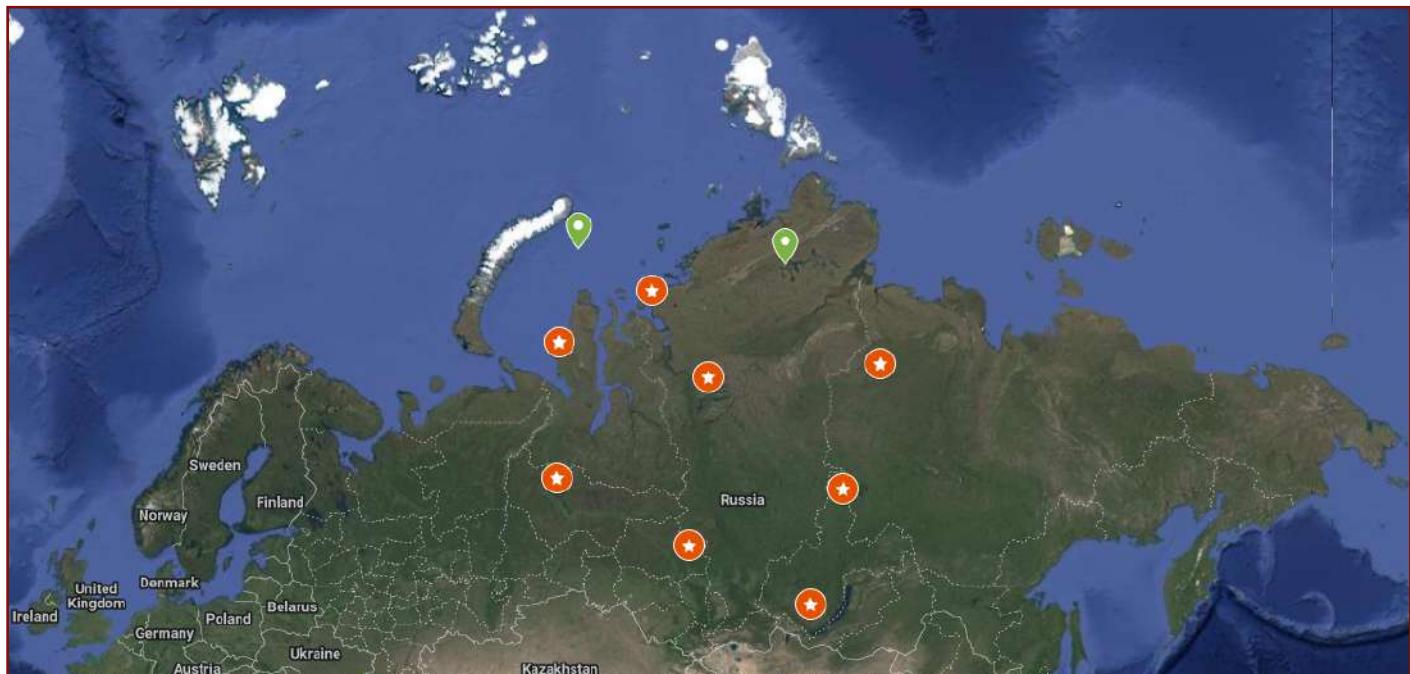


Fig. 93
Ubicación preliminar de los 10 puntos recomendados para la perforación de pozos de investigación científica

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
ЗС3 2	Kharasavey field, Yamal Peninsula	71.1849618	66.9830117	Western Siberia
ЗЮЗ 3	Kislorskoye field, Belyarsky District, Khanty-Mansi Autonomous Okrug	63.6572613	66.5569363	Western Siberia
ЮЗ 4	Tsentralny settlement in Verkhneketsky District, Tomsk Region	58.9454	86.0127	Western Siberia
Ю 5	Chichkova village, Chichkovskoye municipal formation, Ust-Udinsky District, Irkutsk Region	54.19598	103.7021	Eastern Siberia
ЮВ 6	Nakanno village in Katangsky District, Irkutsk Region	62.89873	108.45027	Eastern Siberia
В 7	Zhilinda village in Olenyoksky District, Yakutia	70.1528916	113.9261131	Eastern Siberia
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

Tabla de los 10 pozos recomendados para la perforación científica con el fin de monitorear el avance de la pluma Siberiana, que incluye el nombre del pozo, coordenadas, población o infraestructura cercana, y estructura geológica de la sección.

Los criterios para la selección de estos pozos se basaron en los siguientes principios:

1. Ubicación del pozo en relación con la máxima intersección de anomalías térmicas y geodinámicas asociadas con la penetración y dispersión de la cabeza de la pluma. De acuerdo con este principio, un pozo fue ubicado en la zona central de la presunta elevación de la cabeza de la pluma, 7 pozos fueron distribuidos a lo largo del perímetro de la supuesta dispersión de magma. Además, un pozo fue asignado en la zona del lago Baikal, en la dirección del presunto avance activo del magma bajo la base del cráton de Siberia Oriental. Y otro pozo fue asignado en la zona del mar de Kara para monitorear el avance de la pluma bajo la corteza oceánica de la plataforma continental ártica.

2. La ubicación de los pozos fue seleccionada de manera óptima para los trabajos posteriores de tomografía sísmica, de modo que la información de los sensores sísmicos en los pozos, al ser posteriormente procesada, pudiera proporcionar la imagen 3D más clara. Es decir, para que la red de sensores sísmicos en los pozos estuviera distribuida de manera óptima para la tomografía sísmica del interior de la Tierra.

3. Los lugares de los pozos fueron seleccionados teniendo en cuenta la posibilidad de transportar equipos de perforación y garantizar el acceso por carretera (accesibilidad). Dado que el norte de Siberia Occidental y Oriental presenta terrenos de difícil acceso, paisajes pantanosos, pocas carreteras y condiciones climáticas extremas, la elección de las ubicaciones para la perforación se basó en la infraestructura existente para la realización de trabajos de investigación científica: la presencia de carreteras, poblaciones y plataformas de perforación activas. Dos puntos fueron seleccionados en los yacimientos de petróleo activos actuales, pertenecientes a las compañías Gazprom y Rosneft, mientras que los

demás se encuentran en áreas cercanas a los yacimientos de petróleo, gas y otros recursos minerales. Cabe señalar que, en caso de que no sea posible perforar los pozos en las coordenadas indicadas, se permite un desplazamiento de los pozos entre 10-20 km en cualquier dirección.

Métodos recomendados de investigación en los pozos:

Para el monitoreo integral y estudio de la pluma del manto, es necesario recopilar los siguientes parámetros desde los sensores en los pozos de investigación científica:

- 1. Monitoreo de temperatura:** medición de la temperatura en diferentes profundidades para analizar anomalías térmicas y el aumento del flujo geotérmico como resultado de la penetración del magma en la zona de dispersión de la pluma.
- 2. Presión:** determinación de la presión en el pozo para evaluar los cambios en las condiciones hidrodinámicas debido a la actividad del magma y la fase fluídica.
- 3. Muestreo de gases:** recolección de muestras de los gases provenientes de las capas profundas para estudiar su composición y el posible impacto de la actividad magmática.
- 4. Investigaciones sísmicas:** instalación de sensores sísmicos estándar y de banda ancha para registrar la actividad sísmica, con el fin de crear una sismotomografía detallada de la corteza terrestre y el manto, permitiendo un monitoreo constante del estado de la pluma.
- 5. Composición de fluidos de reservorio:** estudio de la composición de los fluidos del reservorio para identificar posibles aportaciones térmicas o magmáticas.

6. Investigaciones geomecánicas: medición de las tensiones en las rocas para analizar el estado de tensión de la litosfera, que está siendo deformada por la penetración de la pluma.

7. Métodos electromagnéticos: realización de investigaciones electromagnéticas para detectar los cambios en las propiedades eléctricas de los medios asociados con la penetración del magma.

Los datos recopilados servirán como base para la construcción de un modelo integral de la dinámica de la pluma del manto, así como para evaluar su impacto en los procesos geológicos en Siberia.

Características de la perforación y bloqueo de los canales magmáticos durante la desgasificación planificada

El objetivo principal de la perforación de pozos durante la desgasificación planificada será la reducción de la presión en los focos magmáticos secundarios de la pluma, la prevención de explosiones de magma y la organización de la evacuación controlada de gases y lava.

En la etapa inicial, la perforación se llevará a cabo con la participación de operadores, ya que a poca profundidad el proceso representa una tarea tecnológica estándar con riesgos mínimos para el personal. Para ello, se utilizarán plataformas de perforación tradicionales, equipadas con sistemas de monitoreo de temperatura y presión, lo que permitirá controlar el proceso y reaccionar rápidamente ante cualquier desviación de los parámetros normales.

Al alcanzar la profundidad crítica y acercarse a las zonas activas del sistema magmático, el riesgo para las personas aumenta considerablemente. En esta etapa, el trabajo deberá transitar completamente hacia la automatización. Se utilizarán plataformas de perforación especializadas con control automático. El

proceso de perforación será regulado de forma remota mediante un software que analiza los datos en tiempo real y ajusta las acciones del equipo. Para aumentar la precisión del control, los operadores utilizarán tecnologías de realidad virtual, que permitirán una gestión detallada del equipo sin necesidad de estar físicamente en la zona de peligro. Esto ayudará a reducir la probabilidad de accidentes relacionados con emisiones de gases a alta presión o destrucción del equipo por ondas de choque.

El monitoreo del estado del complejo de perforación y del entorno se llevará a cabo mediante el uso de drones y robots. Los drones, equipados con cámaras, termómetros infrarrojos y sensores, detectarán fugas de gas, anomalías térmicas y actividad sísmica.

Los robots, que operarán directamente en la zona de perforación, recogerán datos sobre la temperatura, presión y composición química del entorno, transmitiéndolos a centros de control automatizados.

Estas tecnologías permitirán minimizar la presencia de personas en las zonas de alto riesgo y garantizar un alto nivel de precisión y seguridad.

Después de finalizar la perforación, en la siguiente etapa se llevará a cabo la desgasificación controlada, que consiste en el alivio gradual de la presión y la extracción de grandes volúmenes de lava. En las etapas finales, tras una reducción significativa de los volúmenes de magma y gases, podría surgir la necesidad de realizar una explosión controlada para bloquear las vías de ascenso del magma. Uno de los métodos propuestos contempla una explosión nuclear dirigida en el pozo perforado. Su objetivo sería aliviar las tensiones tectónicas y crear barreras estructurales estables que bloquen los canales magmáticos.

Este enfoque implica la destrucción de las rocas en las zonas de alta tensión con posterior fusión y enfriamiento bajo la influencia de la energía térmica. Esto ayudará a la formación de una barrera monolítica que podrá bloquear total o parcialmente el acceso del magma a la superficie. El impacto termodinámico también puede reducir las tensiones tectónicas, disminuyendo así la probabilidad de futuros estallidos volcánicos.

La implementación de explosiones nucleares requiere un alto nivel de precisión en los cálculos, incluyendo la evaluación de la presión litostática, la dureza y densidad de las rocas y las características del magma fundido. Estos factores deben ser considerados para lograr la máxima eficiencia del método y minimizar los riesgos potenciales.

Selección del momento óptimo para la perforación de pozos durante la desgasificación planificada

Actualmente, la atención principal de nuestros especialistas se centra en el estudio de los plazos óptimos de perforación para llevar a cabo la desgasificación planificada. Aunque aún es prematuro sacar conclusiones definitivas, los cálculos preliminares ya indican la posibilidad de seleccionar con precisión el momento más favorable para comenzar la desgasificación. Los resultados obtenidos sugieren que, si se elige el plazo adecuado, el riesgo de posibles complicaciones puede reducirse considerablemente.

Durante el proceso de perforación, es necesario tener en cuenta no solo las características físico-mecánicas de las rocas, incluyendo su resistencia y fisuración, sino también los parámetros temporales relacionados

con la mecánica celeste. Los cálculos deben basarse en el análisis de la posición de la Tierra en la eclíptica, la fase de la Luna, la ubicación de los planetas mayores, como Júpiter, y el nivel actual de actividad solar. Además, un factor importante es el monitoreo de los terremotos de gran foco en la región de perforación futura, ya que estos pueden aumentar significativamente la actividad sísmica local.

Actualmente, se ha formado una comprensión general sobre el mecanismo y las leyes clave del proceso, sin embargo, estos datos requieren múltiples pruebas adicionales. Los resultados obtenidos deben ser minuciosamente revisados por nuestro grupo de investigación y confirmados mediante investigaciones y modelos independientes de otros especialistas.

Escenarios de resultados de la desgasificación planificada de la pluma Siberiana

Durante la desgasificación planificada de la pluma Siberiana, pueden ocurrir tres escenarios principales de desarrollo, calculados teniendo en cuenta dos etapas del proyecto: la etapa temprana y la etapa posterior. Veamos estos escenarios en detalle.

1. Mínimos daños para el territorio de Rusia

En el caso de que el proceso de desgasificación y la eliminación de lava excesiva de los focos magmáticos secundarios sea modelado por un equipo internacional de expertos, y los cálculos se realicen con gran precisión y teniendo en cuenta todas las características geológicas, ambas etapas de la desgasificación se llevarán a cabo sin accidentes ni complicaciones. En este escenario, los daños al territorio de Rusia se reducirían al mínimo: la pérdida sería de 5-7 % de la superficie del país, y en el peor de los casos, de hasta 10 % (con un radio de afectación de alrededor de 500-600 km). Dentro de este escenario, sería posible proteger las grandes ciudades de la región de Krasnoyarsk, evitando la muerte de personas. Además, se contempla que, si los eventos se desarrollan favorablemente, el desvío de la lava podría ser redirigido hacia los mares árticos, lo que permitiría a Rusia aumentar su territorio mediante la expansión de la línea costera.

2. Daños medios para el territorio de Rusia

En este escenario, se supone que la fase temprana de la desgasificación se lleva a cabo con éxito, sin embargo, en las etapas posteriores pueden surgir dificultades imprevistas, como una explosión repentina de gas o una erupción de lava. Dado que para

ese momento parte de los gases y la lava ya habrán sido liberados, las consecuencias serán menos destructivas. Puede ocurrir un desbordamiento de lava basáltica líquida, típico de Islandia o las Islas Hawái, o una erupción de mediana explosividad. En este caso, la pérdida territorial podría aumentar hasta el 25-30 % (aproximadamente 4-5 millones de km²). Las consecuencias podrían afectar a las ciudades dentro de un radio de 1000 km desde la zona activa. Sin embargo, este escenario no llevará a una catástrofe global para la civilización ni a destrucciones irreversibles en el territorio de Rusia. La humanidad podrá enfrentar los desafíos climáticos y ecológicos que surjan.

3. Daños máximos para Rusia y el mundo

Este escenario supone que una iniciativa tardía o la falta de calificación de los especialistas podría llevar a graves problemas. La falta de investigaciones, un error en los cálculos o la perforación a través de rocas blandas o fisuradas podrían interrumpir el desarrollo de la operación. Si la complicación ocurre en las etapas tempranas de la desgasificación, cuando la presión en los focos es máxima, esto podría provocar uno de los dos resultados catastróficos: una explosión instantánea de todo el sistema de la pluma Siberiana, o erupciones lentas pero masivas de lava, similar a la formación de los Traps Siberianos. A pesar de los riesgos potenciales, la probabilidad de que este escenario se materialice es extremadamente baja, ya que es difícil imaginar la implementación de un proyecto tan complejo sin la debida preparación internacional.

El escenario optimista y el más probable sugiere una pérdida de solo el 5-7 % del territorio de Rusia con daños mínimos. Incluso en el caso de complicaciones en las etapas posteriores, los daños podrían aumentar hasta el 25-30 %, lo que sigue siendo considerablemente más favorable que las consecuencias de la inacción. El riesgo de destrucciones más graves durante el proceso de desgasificación planificada para Rusia o para el mundo en su conjunto es extremadamente bajo.

La implementación de la desgasificación planificada proporcionará a Rusia una experiencia única en la gestión de riesgos geodinámicos globales, lo que fortalecerá su posición como líder científico y tecnológico internacional. La ejecución exitosa del proyecto demostrará la capacidad del país para hacer frente a desafíos de escala planetaria, promoviendo el fortalecimiento de la cooperación global en la prevención de desastres naturales. Esto no solo estabilizará la situación política y social interna, sino que también fortalecerá la cooperación internacional para abordar problemas globales.

La desgasificación controlada de la pluma Siberiana puede influir no solo en la zona local, sino también en otros sistemas volcánicos, como Yellowstone y los estratovolcanes en todo el mundo. Los reservorios magmáticos y su dinámica forman una red global interconectada, funcionando como un mecanismo geomecánico único. La eliminación controlada de la presión en un segmento puede reducir el sistema

de tensiones en los reservorios magmáticos, previniendo reacciones en cadena y erupciones. Esto se puede comparar con la despresurización de un neumático de automóvil: la reducción de la presión en una parte de él permite redistribuir la carga y evitar la ruptura en las áreas de alta tensión crítica. Un enfoque similar para la desgasificación podría contribuir a la estabilización de los sistemas magmáticos a escala global.

Así, la realización de la desgasificación controlada planificada sigue siendo, en cualquier caso, la única oportunidad de salvación tanto para Rusia como para toda la humanidad, lo que es incomparablemente más ventajoso y sensato que la inacción. Este escenario permitirá evitar una catástrofe global y dará a la humanidad el tiempo necesario para desarrollar soluciones adicionales.

Sin embargo, a pesar de las importantes perspectivas, la ejecución exitosa incluso del escenario optimista representará un desafío de gran magnitud. Es necesario actuar ahora, ya que la demora aumenta la probabilidad de eventos catastróficos. Es sorprendente, pero la implementación de un proyecto como este podría encontrar resistencia dentro de Rusia, considerando los potenciales riesgos de destrucción de infraestructura y el debilitamiento del control sobre los recursos estratégicos.

■ Conclusiones

La pluma Siberiana representa una amenaza geodinámica global comparable en magnitud con mil erupciones catastróficas de los supervolcanes más grandes. En el caso de una erupción incontrolada, podrían surgir consecuencias de escala planetaria, que incluyen el inicio de una edad glacial, la destrucción de ecosistemas, el colapso de la infraestructura y la extinción de la humanidad. Estos riesgos exigen la adopción de medidas preventivas, como la desgasificación planificada del sistema magmático de la pluma Siberiana.

La inacción crea la amenaza de erupciones incontroladas de tipo cataclísmico, cuyas consecuencias no solo serían devastadoras para Rusia, sino también para todo el planeta. La reducción controlada de la presión en los focos magmáticos ayudará a evitar los peores escenarios y proporcionará a la humanidad el tiempo vital necesario para desarrollar soluciones a largo plazo.

Además, la integración de la tecnología de generadores atmosféricos de agua en el uso cotidiano, junto con la desgasificación de la pluma Siberiana, creará nuevas oportunidades para restaurar el equilibrio ecológico. Esto permitirá limpiar los océanos de plásticos, fortalecer el ciclo del agua y restaurar el equilibrio térmico del planeta. La implementación integral de

estas soluciones podría estabilizar la situación climática y garantizar un futuro para toda la humanidad, liberando tiempo para buscar una solución al problema de impactos cósmicos externos, que causan eventos catastróficos en el ciclo de 12 000 años.

Estas tareas requieren una cooperación internacional urgente entre científicos de diversas disciplinas, incluidos los físicos cuánticos, para desarrollar e implementar soluciones integrales. Sin embargo, los conflictos geopolíticos y militares obstaculizan dicha cooperación. Por lo tanto, es necesario un moratorio global sobre las guerras y la redistribución de los recursos militares hacia el alivio de las consecuencias de las catástrofes y los esfuerzos humanitarios. La humanidad solo dispone de 4 a 6 años de tiempo relativamente estable para tomar las medidas necesarias.

Si se crean condiciones para la cooperación abierta, los científicos no empezarán desde cero, ya que ya existen trabajos previos reales y una comprensión de las causas y efectos en esta área. La incapacidad de la humanidad para dar prioridad a la unidad global y a la cooperación científica conducirá a consecuencias irreversibles para la vida en la Tierra.

Anexo 1

La metodología de análisis de la actividad sísmica incluyó la descarga y procesamiento especial de los datos obtenidos en el sitio del Centro Sismológico Internacional (International Seismological Centre — ISC). Dado que los datos provienen de diferentes fuentes de varios países e instituciones de investigación, y contienen distintos tipos de magnitudes (Mw, Ms, Mb, ML, MD, etc.), se aplicó un algoritmo de procesamiento para seleccionar el tipo adecuado de magnitud de las diferentes fuentes. Utilizamos dos enfoques diferentes:

1. El algoritmo especial de valores medianos de magnitudes, mencionado en el texto, consiste en elegir la evaluación preferida de la magnitud y seleccionar el evento para la muestra si la evaluación preferida se encuentra dentro del rango necesario de magnitudes.

Elegimos la evaluación preferida de la magnitud, buscando entre los siguientes tipos de magnitudes (en orden de preferencia): Mw, ML, MS, Mb, MD, MV. Si hay una muestra de magnitudes para un tipo preferido para un evento, se toma la mediana de todas las evaluaciones de magnitud de ese tipo para ese evento.

Luego, se calcula la mediana para esas magnitudes. Si no hay evaluación para ninguno de los tipos preferidos mencionados (lo que ocurre raramente, solo en unos pocos por ciento de los eventos en toda la base de datos), se selecciona cualquier evaluación de magnitud cuyo valor coincide con la mediana calculada en base a todos los tipos de magnitudes para ese evento.

2. El algoritmo de valores máximos de magnitud, mencionado en el texto, consiste en elegir la evaluación de la magnitud con el valor máximo entre todas las evaluaciones de magnitud para ese evento.

El primer algoritmo generalmente conduce a una ligera disminución en el valor de la magnitud en comparación con el valor máximo registrado, pero como ha demostrado la experiencia, el algoritmo de la mediana proporciona un comportamiento adecuado de la Ley de Gutenberg-Richter y otras leyes, y se ajusta bastante bien con los datos de otras bases sismológicas, como el Servicio Geológico de EE. UU. (USGS) y los Institutos de Investigación en Sismología (IRIS).

El segundo algoritmo permite evaluar la cantidad de terremotos registrados por cualquiera de los institutos de investigación con una magnitud superior a la seleccionada. Este enfoque permite observar tendencias en el número de terremotos dentro del rango de magnitudes elegido.

Todos los gráficos presentados en la sección “Aumento de la actividad sísmica como indicio de la desestabilización de las placas debido a la actividad de la pluma magmática Siberiana” fueron construidos utilizando el primer algoritmo, el algoritmo especial de valores medianos de magnitud (figuras 44-75).

Después de seleccionar la magnitud, los datos obtenidos fueron filtrados por tipo de evento en la base ISC para excluir los eventos causados por actividad humana durante trabajos de minería, como explosiones, explosiones sospechosas, golpes en minas, etc. Se excluyeron los siguientes tipos de eventos:

km = explosión minera conocida (known mine explosion)

sm = explosión minera sospechosa (suspected mine explosion)

kh = explosión química conocida (no estándar IMS) (known chemical explosion (Not standard IMS))

sh = explosión química sospechosa (no estándar IMS) (suspected chemical explosion (Not standard IMS))

kx = explosión experimental conocida (known experimental explosion)

sx = explosión experimental sospechosa (suspected experimental explosion)

kn = explosión nuclear conocida (known nuclear explosion)

sn = explosión nuclear sospechosa (suspected nuclear explosion).

Además, dado que en el territorio de Rusia hay muchas empresas mineras, la base de datos ISC se comparó con los datos de la Servicio Geofísico Unificado de la Academia Rusa de Ciencias (RAS) hasta enero de 2025, que contiene todas las explosiones conocidas y golpes en minas en el territorio de Rusia. Estos eventos también fueron excluidos para garantizar que en los datos obtenidos no quedaran eventos correspondientes a explosiones.

Referencias

Arushanov, M. L. (2023). Climate dynamics: Space factors [Dinámica climática: Factores espaciales]. LAMBERT Academic Publishing.

Arushanov, M. L. (2023). Causes of Earth's climate change as a result of cosmic impact, dispelling the myth of anthropogenic global warming [Causas del cambio climático en la Tierra como resultado del impacto cósmico, desmitificando el calentamiento global antropogénico]. Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft, 53, 4-14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979>

Barkin, Y. V. y Lyubushin, A. A. (2007). Dvizhenie geotsentra i ego geodinamicheskoe soderzhanie [Movimiento del geocentro de la Tierra y su contenido geodinámico]. En Sagitov Readings 2007, Universidad Estatal de Moscú, Moscú, 31 de enero - 1 de febrero [En línea]. Disponible en: http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/life/cteniya/sagi2007/SAGITOV_BARKIN_2007.pdf

Barkin, Yu. V. (2009). Cyclic inversion changes of climate in the Northern and Southern hemispheres of the Earth [Cambios cílicos de inversión del clima en los hemisferios norte y sur de la Tierra]. En Geología de mares y océanos: Actas de la XVIII Conferencia Científica Internacional sobre Geología Marina (Vol. 3, pp. 4-8). GEOS.

Barkin, Yu. V. (2011). Synchronous jumps in activity of natural planetary processes in 1997-1998 and their unified mechanism [Saltos sincrónicos en la actividad de los procesos planetarios naturales en 1997-1998 y su mecanismo unificado]. En Geología de mares y océanos: Actas de la XIX Conferencia Científica Internacional sobre Geología Marina (Vol. 5, pp. 28-32). GEOS.

Barkin, Yu. V., & Smolkov, G. Ya. (2013). Abrupt changes in trends of geodynamic and geophysical phenomena in 1997-1998 [Cambios abruptos en las tendencias de los fenómenos geodinámicos y geofísicos en 1997-1998]. En Actas de la Conferencia Panrusa sobre Física Solar-Terrestre (pp. 16-21). Irkutsk.

Barkin, Yu. V. (2014, 16 de septiembre). Geofizicheskie sledstviya otnositel'nykh smeshcheniy i kolebaniy yadra i mantii Zemli [Consecuencias geofísicas de los desplazamientos relativos y oscilaciones del núcleo y el manto de la Tierra]. Instituto de Física de la Tierra, Moscú.

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 [La estabilidad de la capa de ozono estratosférico durante la erupción del Pérmico tardío de los Traps Siberianos]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 365, pp. 1843–1866. Disponible en: <http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2046>

Black, B. A., Elkins-Tanton, L. T., Rowe, M. C., & Ukstins Peate, I. (2012). Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps [Magnitud y consecuencias de la liberación de volátiles de los Traps Siberianos]. Earth and Planetary Science Letters, 317–318, pp. 363–373. Disponible en: <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 [Evaluación de las consecuencias ambientales de la generación y alteración de depósitos volcanoclásticos máficos durante la emersión de una Gran Provincia Ígnea]. En 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., Nikonorov, R. A., & Bogoyavlensky, I. V. (2023). New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: thermokarst lakes with gas blowout craters and mud volcanoes [Nuevos datos sobre la intensa desgasificación de la Tierra en el Ártico en el norte de Siberia Occidental: lagos termocársticos con cráteres de explosión de gas y volcanes de lodo]. AEE, 13, pp. 353–368. Disponible en: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

Bogoyavlensky, V. I. (2023). Novye dannye o gryazevom vulkanizme v Arktike na poluostrove Yamal [Nuevos datos sobre el vulcanismo de lodo en el Ártico en la península de Yamal]. Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk. Nauki o Zemle, 512, pp. 92–99. Disponible en: <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., ... & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database [Caracterización del registro de erupciones cuaternarias: análisis de la base de datos de Erupciones Volcánicas Explosivas de Gran Magnitud (LaMEVE)]. 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 [Modulación volcánica del forzamiento climático de Milankovitch en el Cuaternario tardío]. 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 [Sincronismo de las Trampas Siberianas y el límite Pérmico-Triásico]. Science, 258, 1760–1763. <https://doi.org/10.1126/science.258.5089.1760>

Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). La ética de la geoingeniería volcánica [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 [Ascenso rápido de magma riolítico en el volcán Chaitén, 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 [El récord de calentamiento oceánico continuó en 2019]. Advances in Atmospheric Sciences, 37, 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

Ciavarella, A., Cotterill, D., Stott, P., et al. (2021). Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence [El calor prolongado en Siberia en 2020 es casi imposible sin la influencia humana]. Climatic Change, 166, 9. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>

Nikiforova, M. P., Vargin, P. N., Zvyagintsev, A. M., Ivanova, N. S., Kuznetsova, I. N., & Luk'yanov, A. N. (2016). Miniaguero de ozono sobre los Urales del Norte y Siberia. Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, 360, 168–180. En Actas de la Conferencia Hidrometeorológica, 9–10 de febrero, Vol. 4, 91–96. Voronezh: Nauchno-Issledovatel'skie Publikatsii.

Cox, C., & Chao, B. F. (2002). Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998 [Detección de una redistribución de masa a gran escala en el sistema terrestre desde 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 [Evidencia petrológica de la rápida evolución del sistema de almacenamiento de magma del volcán Bezymianny en Kamchatka antes de la erupción del 20 de diciembre de 2017]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 421, 107422. Disponible en: <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 [Ascenso rápido del magma bajo La Palma revelado por tomografía sísmica]. Scientific Reports, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>

Dannberg, J., & Sobolev, S. (2015). Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept [Las plumas termoquímicas de baja flotabilidad resuelven la controversia sobre el concepto clásico de pluma del manto]. Nature Communications, 6, 6960. <https://doi.org/10.1038/ncomms7960>

Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes [Deriva polar en la década de 1990 explicada por cambios en el almacenamiento de agua terrestre]. *Geophysical Research Letters*, 48(7). <https://doi.org/10.1029/2020GL092114>

Dobretsov, N. L., Kirdyashkin, A. G., & Kirdyashkin, A. A. (2001). Deep Geodynamics [Geodinámica profunda]. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, GEO Branch, 408 p.

Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism [El manto superior bajo Asia a partir de tomografía sísmica, con inferencias sobre los mecanismos de la tectónica, sismicidad y magmatismo]. *Earth-Science Reviews*, 247, 104595. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>

Dyachenko, A. I. (2003). Earth's magnetic poles [Los polos magnéticos de la Tierra]. 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 [Evidencia de campo sobre la combustión de carbón que vincula las Trampas Siberianas de hace 252 Ma con la disruptión global del carbono]. *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 [Tamaño máximo y distribución en el tiempo y el espacio de las plumas del manto: evidencia de grandes provincias ígneas]. *Journal of Geodynamics*, 34, 309-342.

Centro Federal de Investigación, Servicio Geofísico Unificado de la Academia Rusa de las Ciencias, s.f. Disponible en: <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 [Petrogénesis de la secuencia de basaltos de inundación en Noril'sk, Siberia Central Norte]. *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 [Producción, uso y destino de todos los plásticos jamás fabricados]. *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 [Cambio rápido de una fuente magmática profunda en el volcán Fagradalsfjall, Islandia]. *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 [El calentamiento actual en Siberia no tiene precedentes en los últimos siete milenios]. *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). Rayos en el Ártico. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091366. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2020GL091366>

International Committee GCGE GEOCHANGE. (2010). Global environmental changes: Threat to civilization development (Vol. 1) [Cambios ambientales globales: amenaza para el desarrollo de la civilización (Vol. 1)]. Londres: GCGE. ISSN 2218-5798

Ivanov, A. V., He, H., Yan, L., Ryabov, V. V., Shevko, A. Y., Palesskii, S. V., & Nikolaeva, I. V. (2013). Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism [La gran provincia ígnea de las Trampas Siberianas: Evidencia de dos pulsos de basaltos de inundación alrededor del límite Pérmico-Triásico y en el Triásico Medio, junto con magmatismo granítico contemporáneo]. *Earth-Science Reviews*, 122, 58–76. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>

Khain, V. E. (1985). Geology of the USSR [Geología de la URSS]. Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde. Berlín-Stuttgart, Alemania: Gebrüder Bornträger.

Kirdyashkin, A. A., & Kirdyashkin, A. G. (2013). Interaction of a Thermochemical Plume with Mantle Free-Convective Flows and Its Influence on Mantle Melting and Recrystallization [Interacción de una pluma termoquímica con flujos convectivos libres del manto y su influencia en la fusión y recristalización del manto]. *Geology and Geophysics*, 54(5), 707–721.

Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). Caracterización del registro de erupciones cuaternarias: análisis de la base de datos de Erupciones Volcánicas Explosivas de Gran Magnitud (LaMEVE). *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 [Paleomagnetismo de las intrusiones de las trampas en Siberia Oriental: implicaciones para la deposición de basaltos de inundación y la crisis biótica del Pérmico-Triásico]. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 242-253. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029>

Koptev, A., & Cloetingh, S. (2024). Role of Large Igneous Provinces in continental break-up varying from “Shirker” to “Producer” [El papel de las Grandes Provincias Ígneas en la fragmentación continental, desde “inhibidores” hasta “productores”]. *Communications Earth & Environment*, 5, 27. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01191-9>

Koulakov, I. Y. (2008). Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia from regional seismic tomography [Estructura del manto superior bajo el sur de Siberia y Mongolia a partir de tomografía sísmica regional]. *Russian Geology and Geophysics*, 49(3), 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012>

Larson, R. L., & Olson, P. (1991). Mantle plumes control magnetic reversal frequency [Las plumas del manto controlan la frecuencia de inversión magnética]. *Earth and Planetary Science Letters*, 107(3–4), 437–447. [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 [Remanente del superpluma del Pérmico tardío que generó las Trampas Siberianas, inferido a partir de datos geomagnéticos]. *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 [Una corriente de alta latitud en aceleración en el núcleo de la Tierra]. *Nature Geoscience*, 10, 62–68. <https://doi.org/10.1038/ngeo2859>

Lvova, E. V. (2010). Tectonics of mantle plumes: Evolution of basic concepts [Tectónica de las plumas del manto: evolución de los conceptos básicos]. *Moscow University Geology Bulletin*, 5, 21-29.

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

Mikhailova, R. S. (2014). Silnye zemletryaseniya v mantii i ikh vliyanie v blizhney i dalney zone [Terremotos fuertes en el manto y su influencia en la zona cercana y lejana]. *Geophysical Survey RAS*. Disponible en: <http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mihaylova.pdf>

Mikhailova, R. S., Ulubieva, T. R., & Petrova, N. V. (2021). The Hindu Kush earthquake of October 26, 2015 with Mw=7.5, I0~7: Previous seismicity and aftershock sequence [El terremoto de Hindu Kush del 26 de octubre de 2015 con Mw=7.5, I0~7: sismicidad previa y secuencia de réplicas]. *Earthquakes in Northern Eurasia*, 24(2015), 324-339. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.31>

Nikiforova, M. P. (2017). Extremely low total ozone values over the northern Ural and Siberia in the end of January 2016 [Valores extremadamente bajos de ozono total sobre los Urales del Norte y Siberia a finales de enero de 2016]. AOO. Disponible en: <https://doi.org/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 [El aumento de los plásticos en el océano evidenciado por una serie temporal de 60 años]. *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 [Tormentas eléctricas cerca del Polo Norte]. *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 [El Ártico se ha calentado casi cuatro veces más rápido que el resto del planeta desde 1979]. *Communications Earth & Environment*, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

Larson, R. L., & Olson, P. (1991). Mantle plumes control magnetic reversal frequency, Earth and Planetary Science Letters [Las plumas del manto controlan la frecuencia de inversión magnética]. *Earth and Planetary Science Letters*, 107(3–4), 437-447. [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 [Influencia de la consolidación del suelo y los efectos de expansión térmica en las variaciones de altura y gravedad]. *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). Informe sobre las características climáticas en la Federación Rusa para 2021. Moscú: Servicio Federal de Hidrometeorología y Monitoreo Ambiental.

Roshydromet. (2024). Informe sobre las características climáticas en la Federación Rusa para 2023. Moscú: Servicio Federal de Hidrometeorología y Monitoreo Ambiental.

Samenow, J. (2019, 12 de agosto). Lightning struck near the North Pole 48 times on Saturday, as rapid Arctic warming continues [El rayo golpeó cerca del Polo Norte 48 veces el sábado, mientras el rápido calentamiento del Ártico continúa]. *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 volcaniclastic megabed deposition in the Marsili Basin, Tyrrhenian Sea [50.000 años de deposición recurrente de megalechos volcánicos en la Cuenca de Marsili, Mar Tirreno]. *Geology*, 51(11), 1001-1006. <https://doi.org/10.1130/G51198.1>

Sherstyukov, B. G. (2023). Global warming and its possible causes [Calentamiento global y sus posibles causas]. *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 [Alta explosividad de la erupción del 21 de junio de 2019 del volcán Raikoke (Isla de las Kuriles Centrales): restricciones mineralógicas y petrológicas sobre los materiales piroclásticos]. *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 [Exposición del sistema solar y la Tierra a influencias externas]. *Physics & Astronomy International Journal*, 2(4), 310-321. <https://doi.org/10.15406/paij.2018.02.00104>

Smolkov, G. Y. (2020). Heliogeophysical research [Investigación heliogeofísica]. *Heliogeophysical Research*, 25, 14-29. Disponible en: <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 [Conexión entre plumas del manto, grandes provincias ígneas y catástrofes ambientales]. *Nature*, 477, 312-316. Disponible en: <https://doi.org/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 [El Toba de Huckleberry Ridge, Yellowstone: evacuación de múltiples sistemas magmáticos en una erupción episódica compleja]. *Journal of Petrology*, 60, 1371-1426. <https://doi.org/10.1093/petrology/egz034>

Syvorotkin, V. L. (2018). Deep degassing in polar regions of the planet and climate change [Desgasificación profunda en las regiones polares del planeta y cambio climático]. APOG. Disponible en: <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art48>

TASS. (2024, enero). Territoriya Rossii tepleet v 2,5 raza bystree ostal'noy planety [El territorio de Rusia se está calentando 2,5 veces más rápido que el resto del planeta]. TASS News Agency. <https://tass.ru/obschestvo/16009287>

USDP project. (s.f.). Instituto de Investigación Sísmica, Universidad de Tokio. Recuperado el 31 de diciembre de 2024, de <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 [1995: Un punto de inflexión importante en la historia geofísica reciente]. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29(5). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Centro de Investigación de Fluidos Volcánicos (s.f.). Understanding of the conduit system at Unzen Volcano [Comprensión del sistema de conductos en el volcán Unzen]. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. Recuperado el 31 de diciembre de 2024, de <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 [Zonas críticas de cambio en las altas latitudes del norte, informadas por observaciones desde el espacio]. *Geophysical Research Letters*, 52, e2023GL108081. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2023GL108081>

Why the Tongan eruption will go down in the history of volcanology [Por qué la erupción de Tonga quedará en la historia de la vulcanología] (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 [La historia perdida de la Tierra sobre erupciones que alteraron el planeta, revelada]. *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 [Contribución significativa de la grave pérdida de ozono al calentamiento superficial en la región Siberia-Ártico durante la primavera de 2020]. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL092509. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2021GL092509>

Zonenshain, L. P., & Kuzmin, M. I. (1993). Deep Geodynamics of the Earth [Geodinámica profunda de la Tierra]. *Geology and Geophysics*, 34(4), 3-13.

Zotov, L. V., Barkin, Yu. V., & Lyubushin, A. A. (2009). Geocenter motion and its geodynamics [Movimiento del geocentro y su geodinámica]. En Proceedings of the Conference “Space Geodynamics and Modeling of Global Geodynamic Processes”, pp. 98-101. Siberian Branch of RAS.