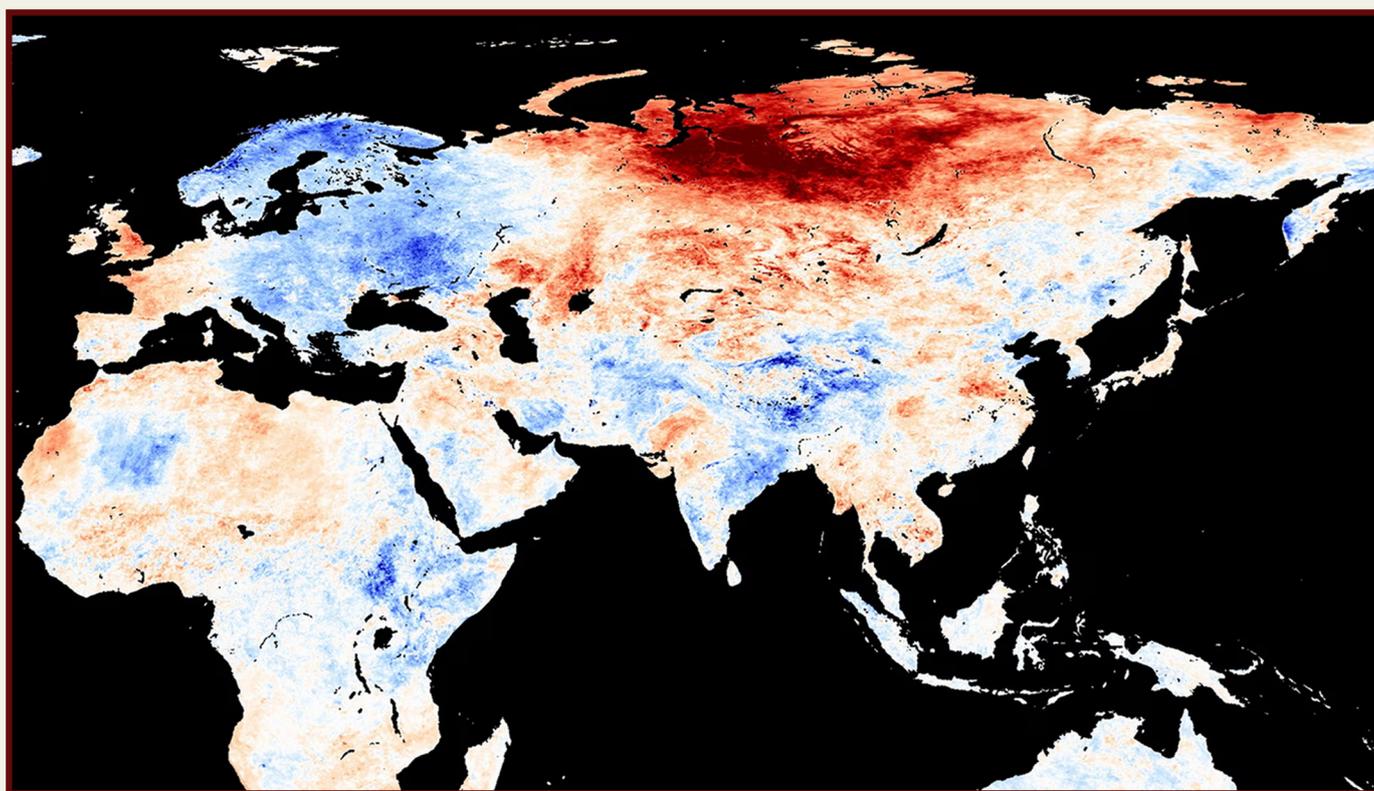


# ОБ УГРОЗЕ ПРОРЫВА

## МАГМАТИЧЕСКОГО ПЛЮМА В СИБИРИ

### И ПУТЯХ РЕШЕНИЯ ДАННОЙ ПРОБЛЕМЫ



# **ОБ УГРОЗЕ ПРОРЫВА МАГМАТИЧЕСКОГО ПЛЮМА В СИБИРИ И ПУТЯХ РЕШЕНИЯ ДАННОЙ ПРОБЛЕМЫ**

# Содержание

Краткое описание геодинамической модели изменения климата на Земле в текущий период времени .....	4
Смещение ядра в сторону Сибири в 1998 году.....	16
Сибирь и Сибирская Арктика нагреваются в 3–4 раза быстрее остального мира.....	21
Косвенные признаки подъёма Сибирского плюма.....	25
Таяние вечной мерзлоты.....	27
Проявления грязевого вулканизма.....	29
Нагрев почв.....	31
Температура приземного воздуха.....	32
Увеличение количества молний.....	34
Истощение озонового слоя.....	36
Строение, возможные размеры и локализация магматического плюма, исходя из литературных и наблюдаемых данных.....	38
Локализация магматического плюма.....	44
Рост сейсмической активности как признак дестабилизации тектонических плит.....	48
Обоснование неизбежности извержения Сибирского плюма .....	74
Сценарий 1. Одновременное извержение Сибирского плюма.....	76
Активизация супервулканов и вулканических систем.....	83
Кислотные дожди.....	85
Вулканическая зима.....	86
Сценарий 2. Постепенное извержение Сибирского плюма.....	88
Последствия постепенного прорыва Сибирского плюма для России.....	94
Последствия постепенного прорыва Сибирского плюма для всего мира.....	95
Долгосрочные последствия постепенного прорыва Сибирского плюма для планеты.....	96
Сценарий 3. Плановая контролируемая дегазация.....	97
Существующие методики вулканической геоинженерии.....	97
Пример программы плановой дегазации Сибирского плюма.....	104
Обоснование выбора места заложения научно-исследовательских скважин для мониторинга динамики современного магматического плюма Сибири.....	106
Особенности бурения и проведения блокировки магматических каналов во время плановой дегазации.....	110
Выбор оптимального времени для бурения скважин во время плановой дегазации.....	111
Сценарии результатов проведения плановой дегазации Сибирского плюма.....	112
Выводы.....	114
Приложение 1.....	115
Список литературы.....	117

## Краткое описание геодинамической модели изменения климата на Земле в текущий период времени

Последние 30 лет на Земле происходит беспрецедентный и синхронный рост климатических изменений, аномалий и экстремальных явлений во всех оболочках планеты и её геофизических параметров. Прогресс этих изменений ускоряется экспоненциально. Комплексный анализ научных данных показывает, что основными причинами роста аномалий во всех оболочках Земли являются астрономические циклы, происходящие во всей Солнечной системе каждые 12 000 лет.

Гипотеза о внешнем астрономическом влиянии подтверждается наблюдением на других планетах Солнечной системы и их спутниках схожих климатических, геодинамических и магнитных аномалий, происходящих в текущий период времени синхронно с изменениями на Земле. Так, например, на Уране, Юпитере и Венере фиксируется увеличение скорости ветров и размеров ураганов. В то же время на

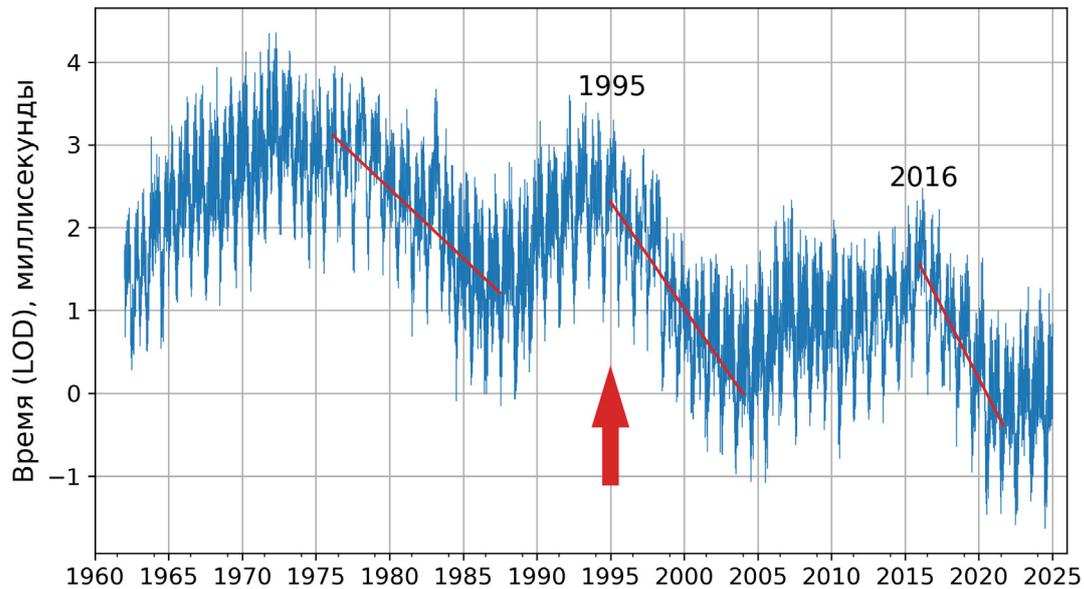
Марсе наблюдается таяние ледяных шапок на полюсах, а также на Венере и Марсе продолжает расти вулканическая активность. Кроме того, на Марсе усиливается сейсмическая активность, что указывает на появление аномальной геодинамической активности.

Критические изменения в системе Земли в результате астрономической цикличности 12 000 лет в текущем цикле начались с 1995 года, когда были зафиксированы значительные геофизические аномалии, включая резкое ускорение вращения Земли (рис. 1) и смещение её оси<sup>1</sup> (рис. 2), начало резкого дрейфа северного магнитного полюса<sup>2</sup> (рис.3). Данные изменения указывают на значительные изменения в ядре Земли.

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

<sup>2</sup>Дьяченко, А.И. (2003) Магнитные полюса Земли. Москва: МЦНМО.

### Отклонение длительности суток



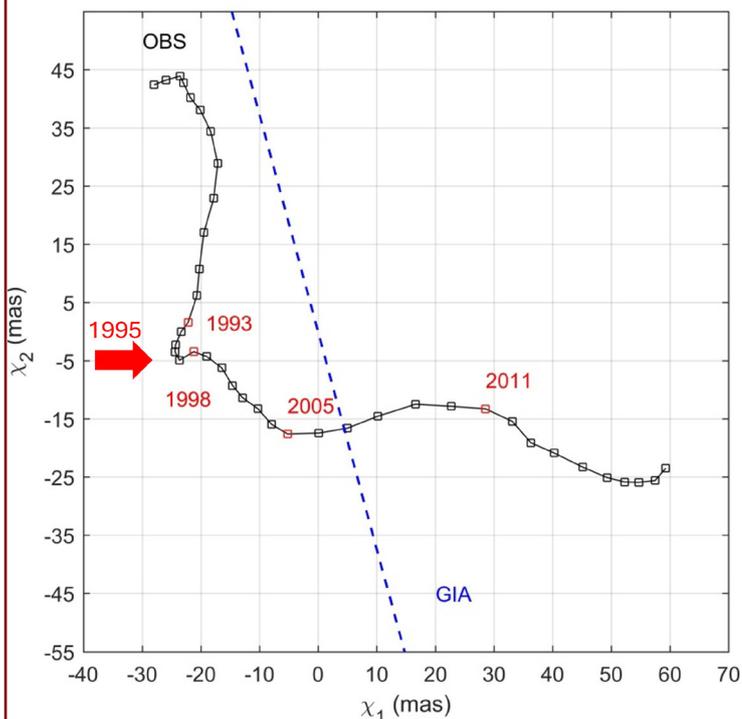
**Рис. 1**

**Отклонение длительности суток в миллисекундах за период с 1962 по 2023 год.**

Источник данных: Центр ориентации Земли в Парижской обсерватории (IERS Earth Orientation Center of the Paris Observatory). Длина дня — параметры ориентации Земли:

[https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04\\_14\\_62-NOW\\_IAU1980-LOD&id=223](https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223)

На рисунке красные линии — это линии трендов, которые показывают, с какой скоростью сокращаются сутки. Например, линия слева более пологая, в то время как линия справа, линия ускорения с 2016 года, уже практически вертикальная, то есть сутки сокращаются в разы быстрее, а значит, планета вращается быстрее.



**Рис. 2**

**Долгосрочная траектория наблюдаемого возбуждения после удаления годовых и чандлеровских циклов методом скользящего среднего (чёрная линия с квадратами) и направление полярного дрейфа, обусловленного GIA (синяя штриховая линия).**

Размер подмножества скользящего среднего принят равным 84 месяцам, для которых наименьшим общим кратным являются 12 месяцев (годовой цикл) и 14 месяцев (цикл Чандлера), согласно исследованию Liu et al. (2017).

Источник: Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48(7).

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



**Рис. 3**

**Скорость движения северного магнитного полюса (км/год)**

Источник: данные положения северного магнитного полюса NOAA

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

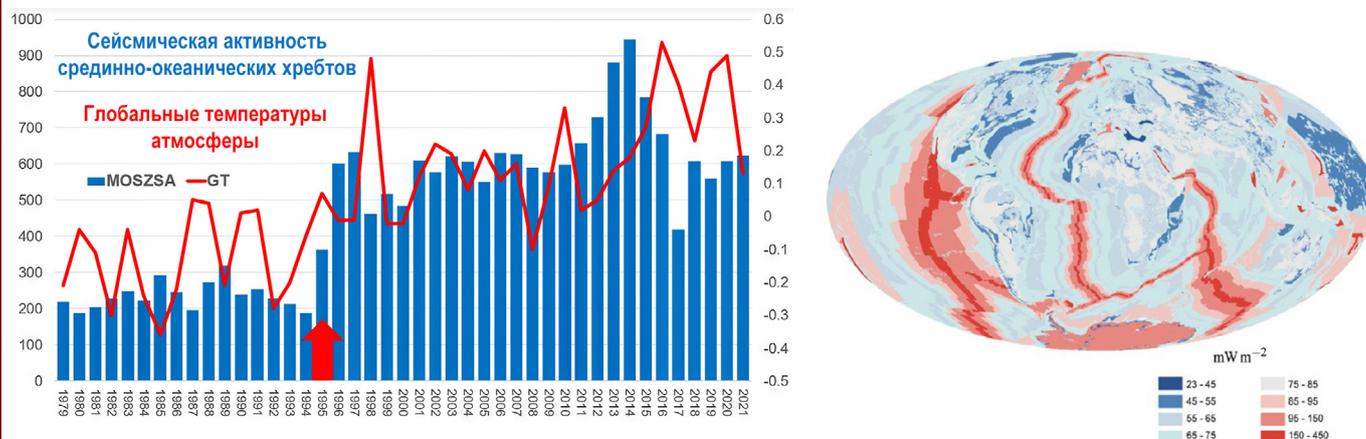
Согласно гипотезе, в этот момент времени Солнечная система начала входить в зону, в которой внешнее космическое воздействие начало оказывать существенное влияние на планеты, а именно на их ядра. Изменения, произошедшие с ядром Земли в 1995 году, указывают на увеличение нагрева внешнего ядра, из чего можно сделать вывод, что к ядру Земли начала поступать дополнительная энергия. Такие глубокие изменения в ядре Земли требуют в квадриллионы раз больше энергетических затрат, чем человечество произвело за всё время жизни цивилизации.

Поступление к ядру Земли внешнего воздействия привело к активизации процессов, связанных с расплавлением мантии, и подъёму магмы к поверхности, что вызвало цепную реакцию сейсмической и вулканической активности, а также способствовало увеличению нагрева из недр и росту климатических катаклизмов по всему миру.

Так, например, с 1995 года наблюдается значительный рост сейсмической активности, который проявляется в увеличении частоты, магнитуды и энергии землетрясений. Эта тенденция наблюдается как на континентах, так и на океаническом дне (рис. 4), и охватывает регионы, которые ранее не проявляли сейсмической активности, что указывает на глобальный характер изменений.

Важно отметить, что рост числа землетрясений магнитудой 5,0 и выше не связан с улучшением технологий сейсмомониторинга (рис. 5), а отражает реальные изменения в геодинамической системе Земли. Суммарные данные Международного сейсмологического центра подтверждают, что количество землетрясений значительно увеличилось за последние 25 лет и продолжает расти (рис. 6).

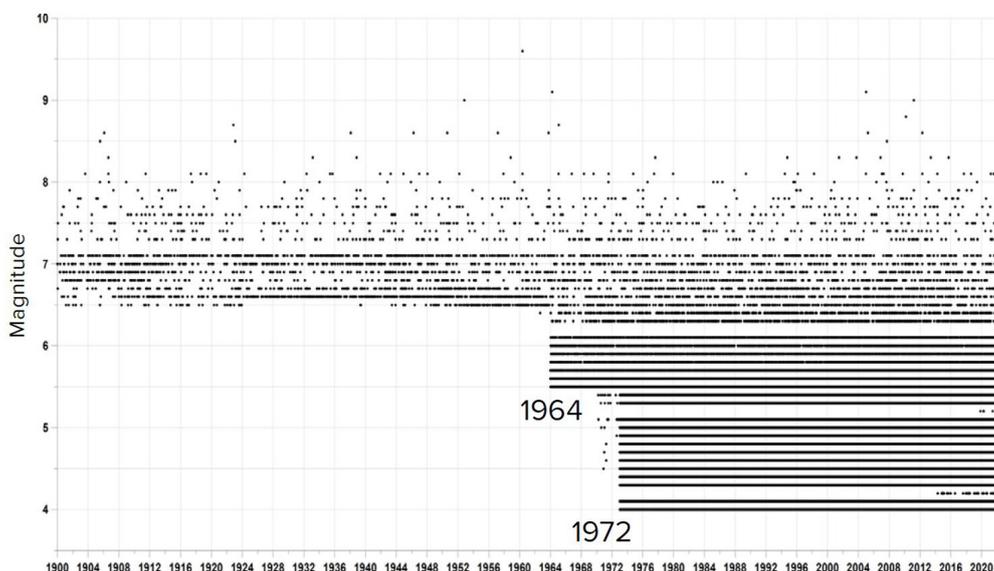
## Рост числа землетрясений на дне океана по срединно-океаническим хребтам



**Рис. 4**  
**Одновременный рост числа землетрясений на дне океана и глобальных температур атмосферы (слева). Геотермальный нагрев срединно-океанических хребтов (справа), Davies & Davies, 2010 г.**

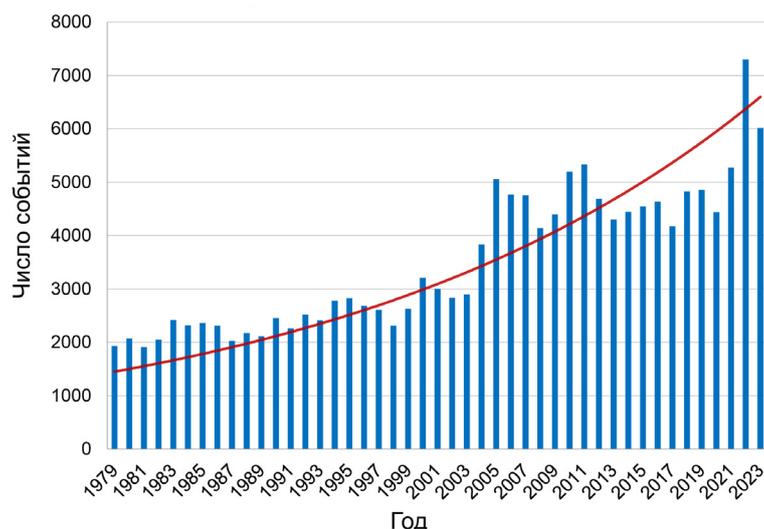
Источник: Viterito, A. (2022). 1995: An important inflection point in recent geophysical history. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29 (5) <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271>

Схема иллюстрирует резкий скачок количества землетрясений в 1995 году на дне океана по срединно-океаническим хребтам и тесную корреляцию сейсмичности на дне океана с температурами атмосферы, что указывает на дополнительный глубинный источник нагрева как океана, так и атмосферы.



**Рис. 5**  
**На графике чёрными точками отображены землетрясения разной силы в отдельные годы. До 1964 года фиксировались только землетрясения магнитудой от 6,5 и выше. С 1964 (с установкой более чувствительных датчиков) — от 5,5 и выше. С 1972 — от 4,0 и выше, независимо от местоположения.**

### Землетрясения в ISC M5+ 1979–2023



**Рис. 6**

**Землетрясения магнитудой 5,0 и выше с 1979 по 2023 год, согласно базе данных ISC.**

Выборка данных была произведена по алгоритму максимальных значений магнитуды, содержащихся в базе данных ISC по каждому из событий (см. Приложение 1).

Кроме того, наблюдается увеличение сейсмической активности вблизи вулканов, а также и на супервулканах, таких как Йеллоустон в США, Кампи Флегрей в Италии, Таупо в Новой Зеландии, и на других вулканах, которые извергались в прошлые циклы 12 000 лет. Также растёт общее количество дней извержений вулканов, что сопровождается аномальными извержениями, при которых выбрасываемая лава перегрета и имеет нетипичный состав, характерный для магмы из более глубоких слоёв мантии<sup>3,4,5,6,7</sup>.

Особое внимание вызывает увеличение числа глубокофокусных землетрясений, происходящих на глубинах более 300 км, иногда достигающих до 750 км под поверхностью Земли. Эти явления возникают

не в земной коре, а в мантии, где материал мантии обычно деформируется плавно, а не разрушается, что делает природу таких землетрясений необычной.

Так как эти землетрясения происходят в условиях экстремального давления и высоких температур, можно сделать вывод, что эти мощные взрывы сопоставимы по энергии с одновременной детонацией множества атомных бомб внутри мантии Земли. Кроме того, глубокофокусные землетрясения часто вызывают сильные землетрясения в земной коре, усиливая их разрушительное воздействие<sup>8,9</sup>.

<sup>3</sup>Castro, J., & Dingwell, D. (2009). Rapid ascent of rhyolitic magma at Chaitén volcano, Chile. *Nature*, 461, 780-783. <https://doi.org/10.1038/nature08458>

<sup>4</sup>Smirnov, S. Z., et al. (2021). High explosivity of the June 21, 2019 eruption of Raikoke volcano (Central Kuril Islands): Mineralogical and petrological constraints on the pyroclastic materials. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 418, 107346. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107346>

<sup>5</sup>Why the Tongan eruption will go down in the history of volcanology. (2022). *Nature*, 602, 376-378. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-00394-y>

<sup>6</sup>Halldórsson, S. A., Marshall, E. W., Caracciolo, A., et al. (2022). Rapid shifting of a deep magmatic source at Fagradalsfjall volcano, Iceland. *Nature*, 609, 529-534. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04981-x>

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

<sup>8</sup>Михайлова, Р.С. (2014) 'Сильные землетрясения в мантии и их влияние в ближней и дальней зоне', Геофизическая служба РАН. Доступно по адресу: <http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mihaylova.pdf>

<sup>9</sup>Михайлова, Р.С., Улубиева, Т.Р. и Петрова, Н.В. (2021) 'Гиндукушское землетрясение 26 октября 2015 г. с Mw=7,5, 10~7: предшествующая сейсмичность и афтершоковая последовательность', *Землетрясения Северной Евразии*, 24(2015), сс. 324-339. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.31>

С 1995 года наблюдается стремительный экспоненциальный рост числа таких глубинных землетрясений (рис. 7, 8), что совпадает с другими геодинамическими аномалиями, начавшимися в тот же период.

Рост этих внутримантийных взрывов указывает на увеличение энергии в глубинах планеты и интенсивное плавление мантии, что может привести к масштабным извержениям вулканов.



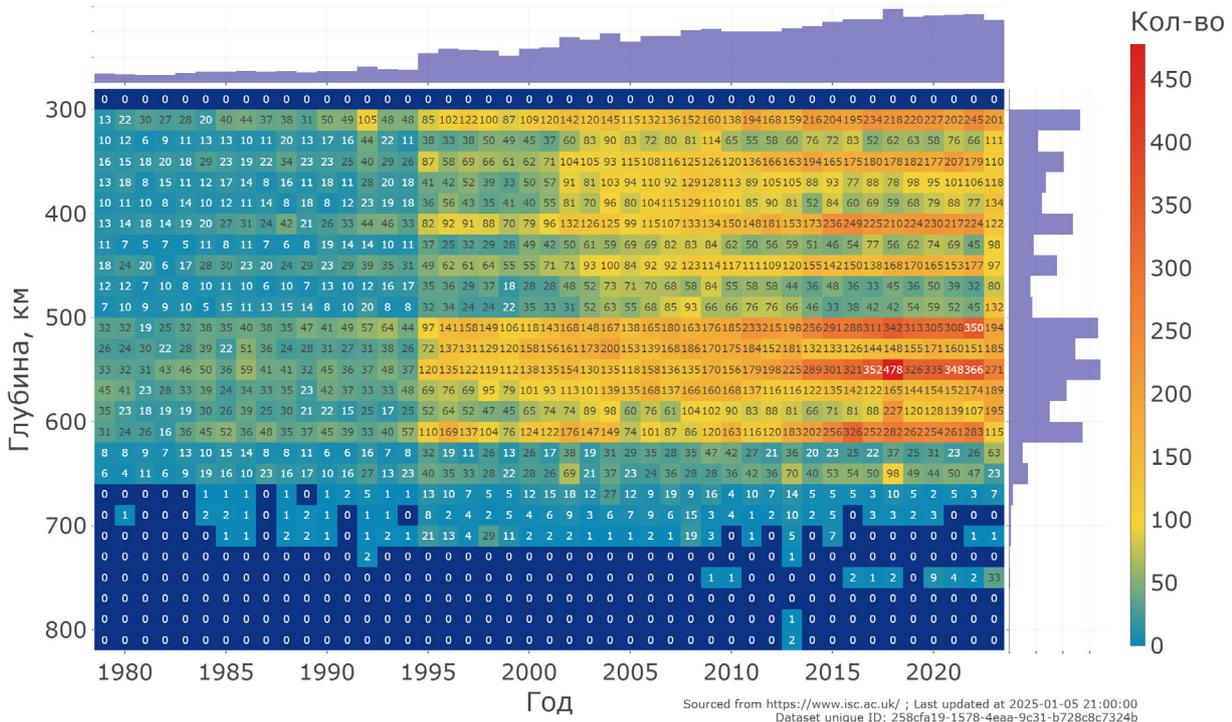
**Рис. 7**  
**Экспоненциальный рост количества глубокофокусных землетрясений на планете с 1979 года магнитудой выше 3,0.**

График построен согласно выборке данных по специальному алгоритму медианных значений магнитуды (см. Приложение 1), содержащихся в базе данных ISC по каждому из событий. База данных: ISC.

График показывает геометрическую прогрессию роста числа землетрясений на глубинах более 300 км в верхней мантии Земли, где среда считается пластичной и неспособной трескаться. Существенный скачок наблюдается в 1995 году, как и скачки роста многих других геодинамических аномалий. Рост числа глубокофокусных землетрясений не связан с увеличением количества датчиков.

## Аномальный рост количества глубоководных землетрясений

### Глубоководные землетрясения М3+



**Рис. 8**

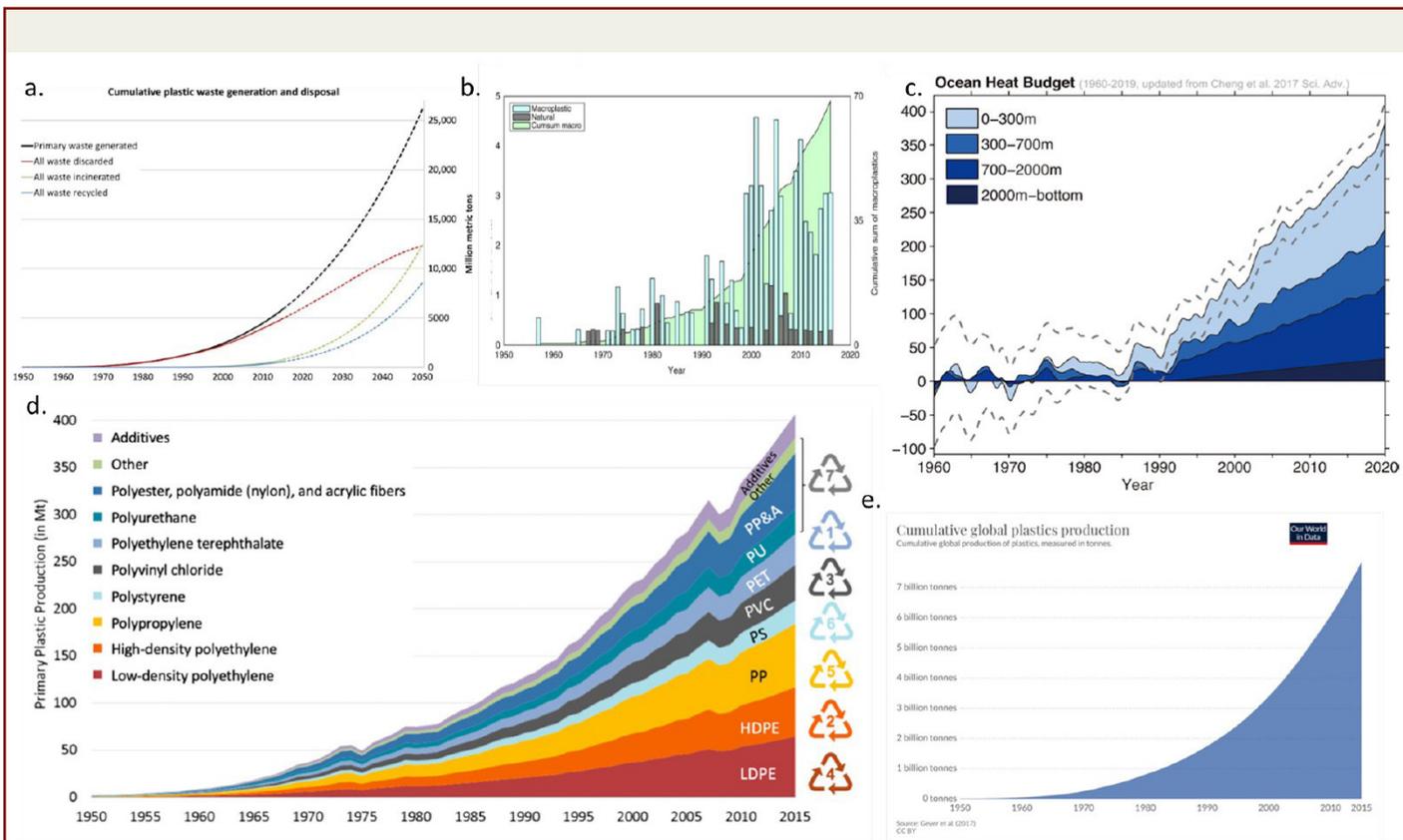
**Схема количества глубоководных землетрясений по годам и глубинам магнитудой выше 3,0.**

База данных: ISC.

Рост глубоководных землетрясений указывает на расплавление мантии, нагреваемой от ядра. Расплавленная магма в мантии из-за центробежных сил начинает резко подниматься к поверхности Земли, размывая и нагревая литосферу изнутри больше обычного. Именно подъём магмы вызывает увеличение геотермального потока из недр, активацию магматических плюмов под ледниками Западной Антарктиды, центральной Гренландии, что ускоряет таяние ледников и вечной мерзлоты снизу вверх.

В настоящее время океан нагревается как никогда ранее, что значительно усиливает экстремальные природные явления:

наводнения, ураганы и тропические циклоны. Океан играет ключевую роль в регулировании тепла на планете, так как он способен поглощать и перераспределять избыточное тепло, предотвращая катастрофические последствия. Однако сейчас, когда усиливается нагрев Земли из-за геодинамической активности, вызванной астрономическими циклами, океан утратил свою функцию отводить тепло от недр. Это произошло из-за антропогенного загрязнения океана. Пластиковые отходы разлагаются до микро- и нанопластика, снижая теплопроводность воды (рис. 9).



**Рис. 9**  
**График изменения температуры океана за 1960–2019 гг. и сопоставление его с графиками роста производства синтетических полимеров, использования их в разных отраслях хозяйства и утилизации отходов пластика в океане (из разных источников).**

**а) Суммарное количество произведённых и утилизированных пластиковых отходов**

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

**б) Суммарное количество макропластика в океане и годовые показатели**

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

**с) Изменение температуры Мирового океана за 1960–2019 гг. (Purkey and Johnson, 2010; с обновлением данных Cheng и др., 2017)**

Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>

**д) Мировое производство первичного пластика по типам**

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

**е) Суммарное количество производимого пластика с 1950 года**

Источник данных: Plastic Marine Pollution Global Dataset

Повышение температуры воды происходит не только на поверхности, но и по всей толще, а также на дне океана. Причиной нагрева океана является поднимающаяся магма, которая особенно сильно нагревает океаническую кору, более тонкую и уязвимую по сравнению с континентальной.

Исторические данные исследований геологических и ледяных кернов свидетельствуют о том, что Земля сталкивалась с подобными катастрофическими циклами каждые 12 000 лет<sup>10</sup>. А каждые 24 000 лет планетарные катастрофы были в разы сильнее, о чём говорят исследования пепловых слоёв извержений вулканов в кернах льда<sup>11</sup> (рис. 10) и другие геохронологические исследования. Именно в такой цикл входит сейчас Земля. Однако текущий цикл усугубляется антропогенным фактором, таким как загрязнение океана, что ещё больше ухудшило функцию океана регулировать энергетический баланс Земли.

По мере нагревания океана пластиковые отходы разлагаются на микро- и нанопластик, что дополнительно снижает теплопроводность океана. Эта потеря теплопроводности критически важна в периоды усиленной геодинамической активности, вызванной астрономическими циклами. Накопление избыточной энергии в недрах Земли привело

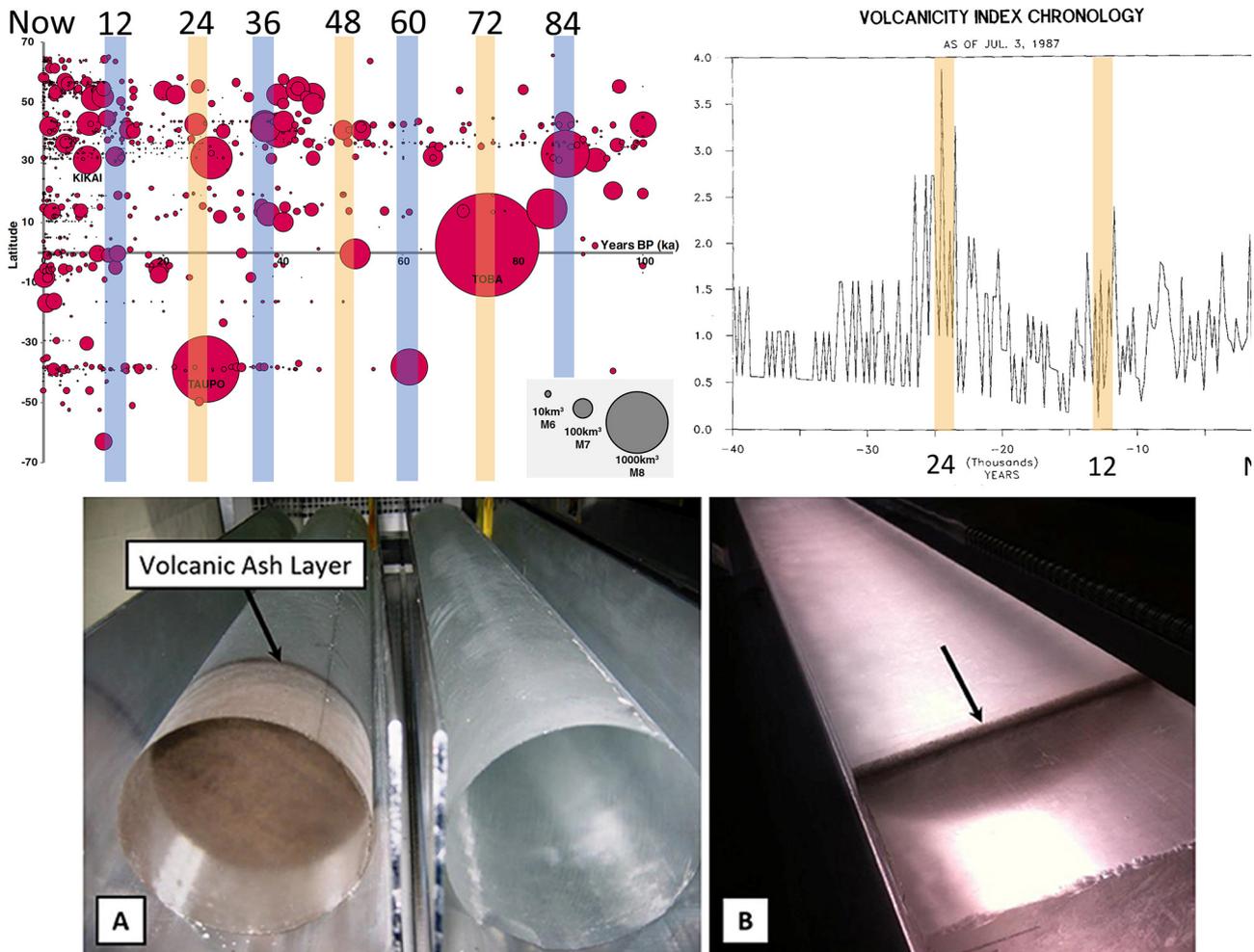
к увеличению числа глубокофокусных землетрясений и быстрому формированию новых магматических очагов, что ещё больше усугубляет нестабильность планеты. Этот замкнутый цикл ускоряет нагревание и дестабилизацию планеты, приближая Землю к неминуемой гибели.

Математическое моделирование показывает, что экономические и социальные системы мира могут рухнуть в течение ближайших 4–6 лет из-за нарастающего ущерба от климатических катастроф. Экспоненциальный рост числа катастрофических событий угрожает сделать Землю непригодной для жизни в течение следующего десятилетия (рис. 11). В отличие от предыдущих циклов, текущее состояние планеты усугубляется загрязнением, вызванным деятельностью человека, что оставляет мало надежды на выживание экосистем и самой планеты Земля. **Важно понимать, что решение проблемы загрязнения и нагрева океана может замедлить развитие катаклизмов, но не остановит их.**

<sup>10</sup>Арушанов, М.Л. (2023) Динамика климата. Космические факторы. Hamburg: LAMBERT Academic Publishing.

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

## Катастрофические извержения вулканов с циклом 12 000 лет



**Рис. 10**

**Данные исследований пепловых слоёв извержений вулканов за последние 100 000 лет в кернах льда Антарктики и Арктики из работ различных авторов.**

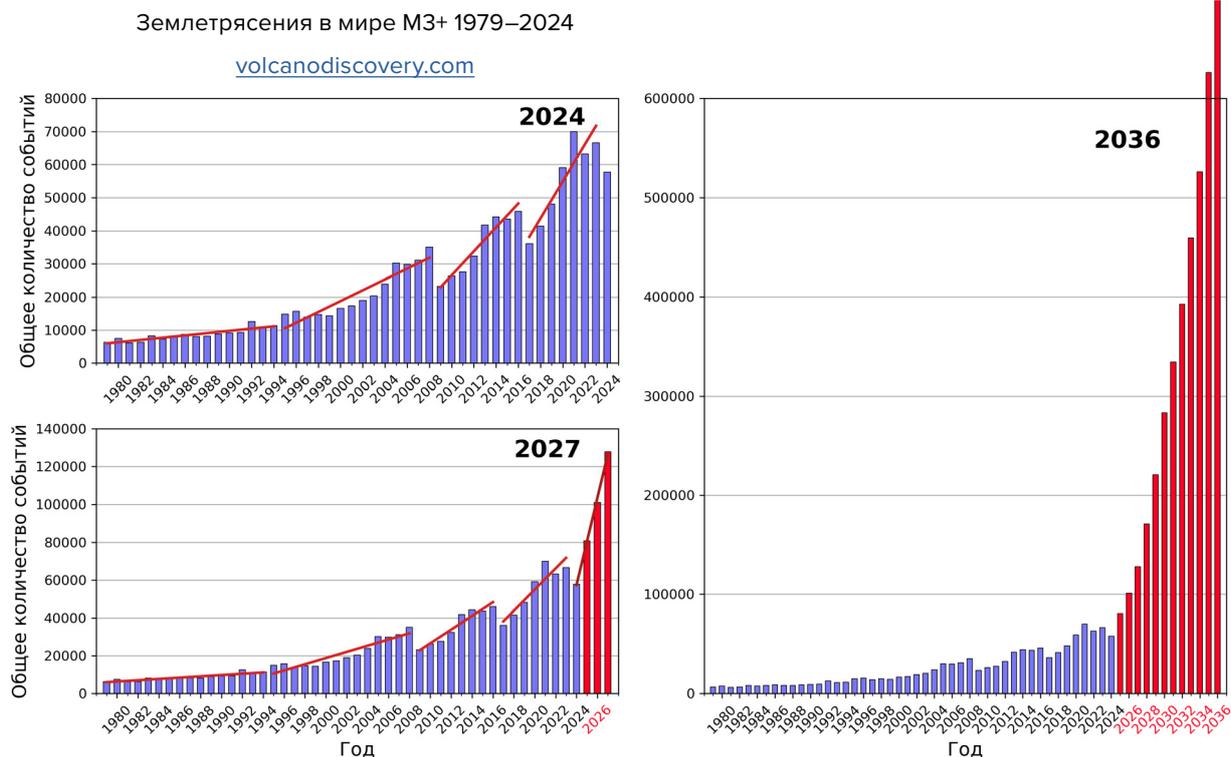
Источник:

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

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

Графики иллюстрируют катастрофическую вулканическую активность каждые 12 000 лет и ещё более сильную — каждые 24 000 лет (с учётом погрешности определений возраста). Такие катастрофические события приводили к резким перепадам температур, стихийным бедствиям, вулканическим зимам и массовым вымираниям видов. Многие супервулканы, извергавшиеся в прошлые циклы, начали показывать аномальную активность в наши дни, особенно с 1995 года.

## Прогрессия нарастания катаклизмов на примере землетрясений



**Рис. 11**  
**Модель экспоненциального роста количества природных катаклизмов на примере землетрясений до 2036 года**

Графики демонстрируют геометрическую прогрессию роста количества и силы землетрясений на планете с учётом текущего тренда. На каждом следующем этапе количество землетрясений увеличивается в 3 раза.

Уже к 2028 году на Земле будет происходить 1 000 землетрясений в день магнитудой выше 3,0, тогда как уже сейчас в день происходит 125 землетрясений магнитудой выше 3,0. С высокой вероятностью уже через 6 лет на Земле каждый день будут происходить землетрясения, по своей разрушительности эквивалентные землетрясению в Турции и Сирии 6 февраля 2023 года.

Данный доклад посвящён дополнительной угрозе, вызванной изменениями в ядре в результате поступления к нему дополнительной энергии.

В 1997–1998 годах учёные, используя спутниковые данные исследований Центра масс Земли, зафиксировали беспрецедентное явление — скачок внутреннего ядра Земли. В результате этого события ядро планеты сместилось на

север, по линии от Западной Антарктиды к Восточной Сибири и полуострову Таймыр в Российской Федерации. В результате этого сдвига ядра произошёл неконтролируемый подъём магмы в этом направлении, за счёт чего под Сибирью начал стремительно подниматься огромный магматический плюм.

На данный момент Сибирский плюм уже достиг подошвы земной коры в районе севера Восточно-Сибирского кратона и начал приподнимать плиту, а это значит, что раскалённая магма уже начала прожигать себе путь на поверхность. Неконтролируемый прорыв Сибирского плюма может привести к глобальному вымиранию, не оставив человечеству никаких шансов на выживание, так как, согласно расчётам, такое извержение будет в 1 000 раз превосходить по мощности самое сильное извержение супервулкана Йеллоустон.

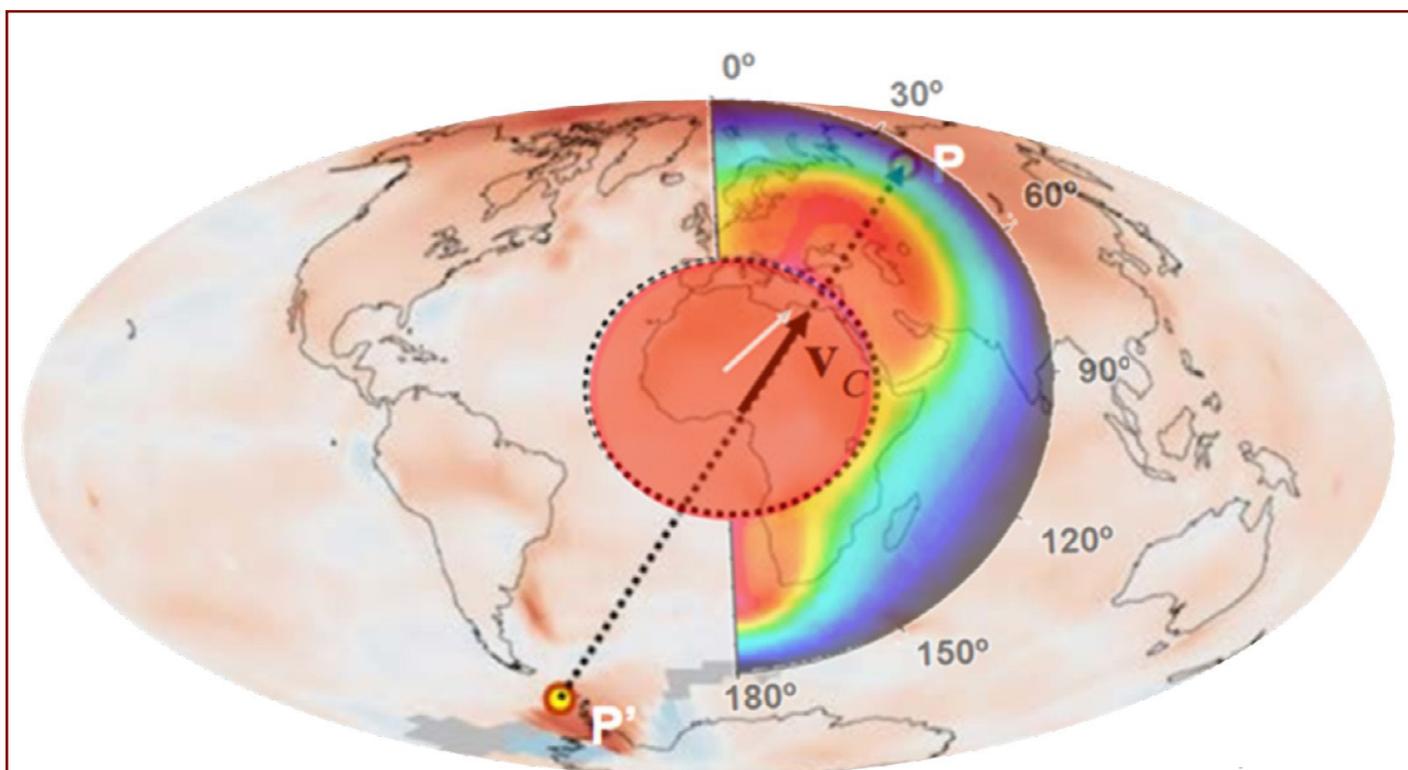
Подобные извержения магматического плюма в Сибири уже происходили 250 млн лет назад и привели к великому пермскому вымиранию. Существует три варианта дальнейшего развития событий, которые описаны в данном докладе.

Также в докладе предложены шаги по решению проблемы подъёма Сибирского плюма и минимизации рисков его неконтролируемого прорыва.

## Смещение ядра в сторону Сибири в 1998 году

В 1997–1998 годах учёные, используя спутниковые данные исследований Центра масс Земли, зафиксировали беспрецедентное явление — скачок внутреннего ядра Земли<sup>12,13</sup>. В результате

этого события ядро планеты сместилось на север, по линии от Западной Антарктиды к полуострову Таймыр на севере Восточной Сибири (рис. 12).



**Рис. 12**

**Скачок ядра в 1997–1998 гг. и тепловые волны в магме, вызванные смещением ядра. Ю. В. Баркин.**

Карта иллюстрирует вектор смещения внутреннего ядра по линии от Западной Антарктиды к Восточной Сибири, к полуострову Таймыр. Схема нанесена на карту тепловых аномалий атмосферы.

Источник: Геофизические следствия относительных смещений и колебаний ядра и мантии Земли. Презентация Ю. В. Баркина, Москва, ИФЗ, ОМТС. 16 сентября 2014 года.

<sup>12</sup> Баркин, Ю.В. (2011) 'Синхронные скачки активности природных планетарных процессов в 1997-1998 гг. и их единый механизм', в Геология морей и океанов: Материалы XIX Международной научной конференции по морской геологии. Т.5. Москва: ГЕОС, сс. 28-32.

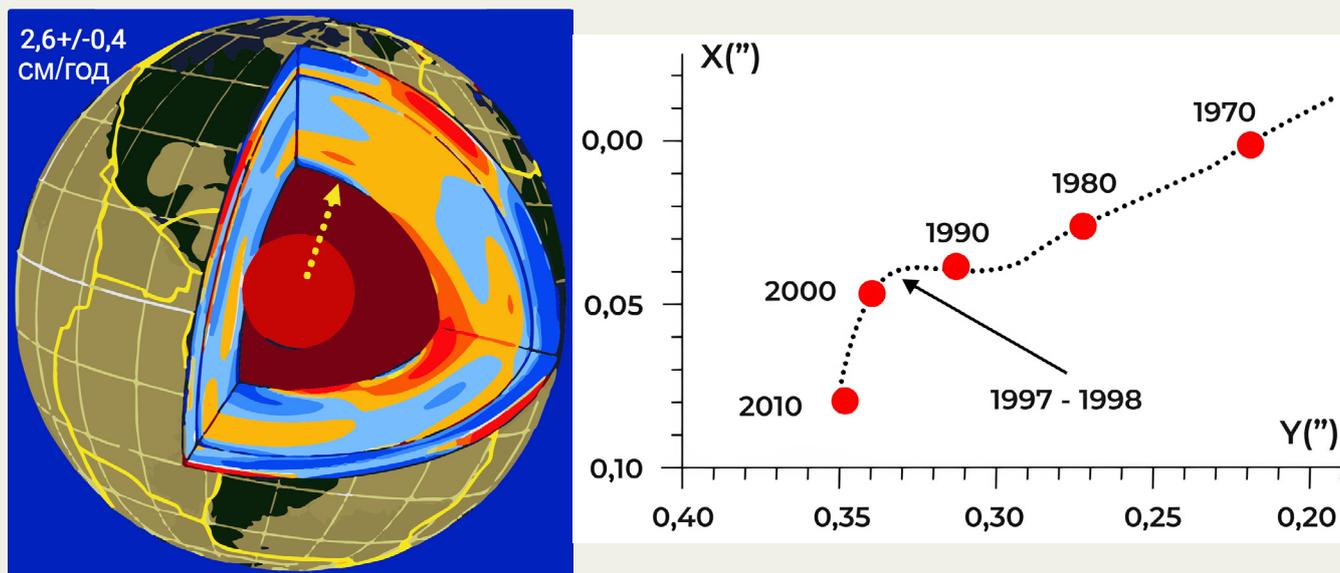
<sup>13</sup> Smolkov, G. Ya. (2018). Exposure of the solar system and the earth to external influences. Physics & Astronomy International Journal, 2(4), 310-321. <https://doi.org/10.15406/paij.2018.02.00104>

Одновременно с этим четыре разных научных коллектива, независимо друг от друга, зафиксировали аномальные изменения различных геофизических параметров Земли. По спутниковым данным коллектив авторов из МГУ им. Ломоносова и Института физики Земли РАН установили скачок центра масс Земли в 1998 году<sup>14</sup> (рис. 13).

В тот же период Международная служба вращения Земли (МСВЗ) зафиксировала резкое ускорение вращения планеты. В это время на станции Медичина в Италии учёные зафиксировали скачок силы тяжести<sup>15</sup>. Одновременно с этим наблюдалось

резкое изменение формы Земли<sup>16</sup>, зарегистрированное с помощью системы лазерной дальнометрии со спутников США.

По мнению доктора физико-математических наук, профессора Ю. В. Баркина, доктора технических наук, профессора Г. Я. Смолькова<sup>17</sup>, доктора географических наук, профессора М. Л. Арушанова<sup>18</sup>, академика РАН, заслуженного профессора МГУ им. Ломоносова, доктора геолого-минералогических наук В. Е. Хаина<sup>19</sup> и многих других учёных, скачок ядра стал причиной изменений во всех оболочках Земли.



**Рис. 13**

**Внутреннее строение Земли, направление векового дрейфа центра масс Земли и траектория его полюса на поверхности Земли в 1990–2010 гг., с поворотом почти на  $90^\circ$  в 1997–1998 гг. в направлении полуострова Таймыр.**

Источник: Г. Я. Смольков // Гелиогеофизические исследования. Выпуск 25, 14–29, 2020. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569> (дата доступа: 01.02.2024)

Источник графика: Ю. В. Баркин, Р. К. Клиге, 2012.

<sup>14</sup> Зотов, Л.В., Баркин, Ю.В. и Любушин, А.А. (2009) 'Движение геоцентра и его геодинамика', в Труды конференции «Космическая геодинамика и моделирование глобальных геодинамических процессов», Новосибирск, 22-26 сентября. Новосибирск: Гео, сс. 98-101.

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

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

<sup>17</sup> Баркин, Ю.В. и Смольков, Г.Я. (2013) 'Скачкообразные изменения трендов геодинамических и геофизических явлений в 1997-1998 гг.', в Всероссийская конференция по солнечно-земной физике, посвященная 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В.Е. Степанова, Иркутск, 16-21 сентября.

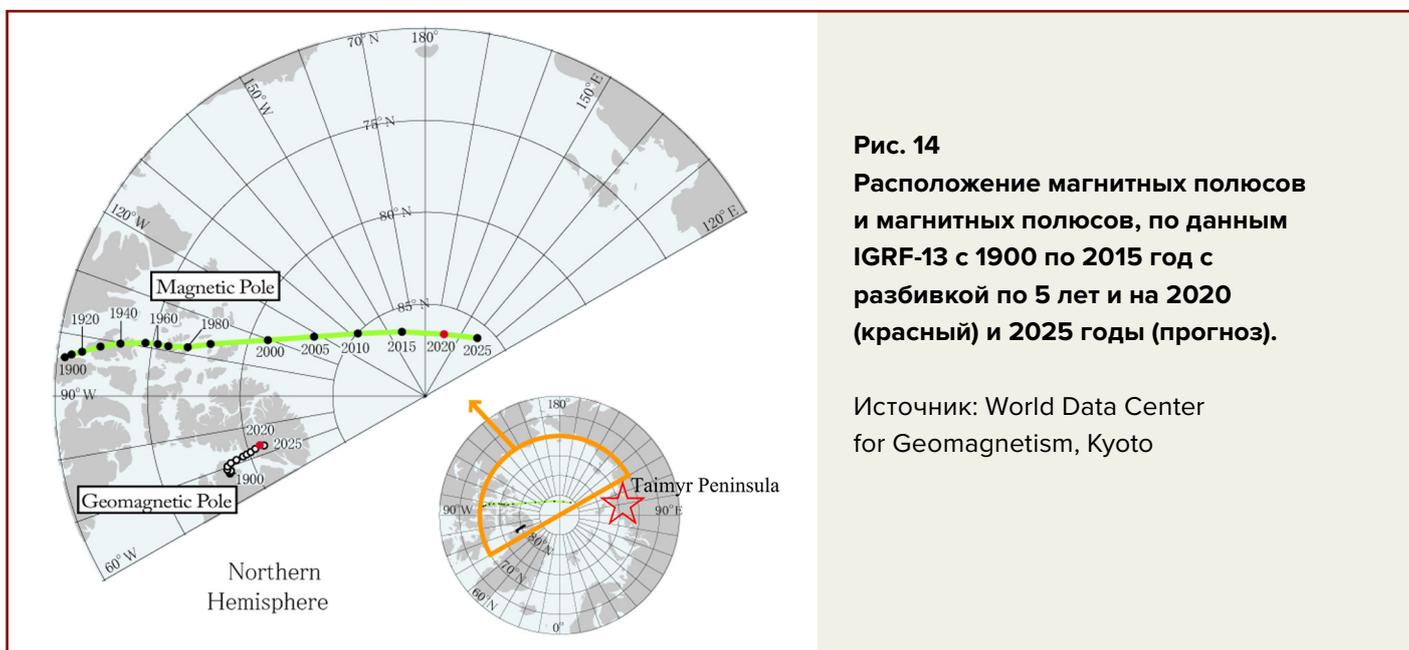
<sup>18</sup> Арушанов, М.Л. (2023) 'Причины изменения климата Земли как результат космического воздействия, развеивающие миф об антропогенном глобальном потеплении', *Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft*, 53, сс. 4-14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979>

<sup>19</sup> 'Коммюнике и первый доклад IC GCGE GEOCHANGE «Глобальные изменения окружающей среды: угроза для развития цивилизации» (2010) Том 1. Лондон. ISSN 2218-5798.

Важно отметить, что именно в этом направлении в 1995 году начался резкий дрейф северного магнитного полюса. С начала прошлого века он двигался в среднем со скоростью 10 км/год, а затем внезапно увеличил свою скорость, достигнув в максимуме 57 км/год, и изменил траекторию, направившись к Сибири и полуострову Таймыр<sup>20</sup> (рис. 3, 14).

Это указывает на то, что условия для сдвига ядра в направлении полуострова Таймыр начали формироваться уже в 1995 году за счёт разжижения внешнего жидкого ядра Земли. В 2013 году учёные из университета Лидса установили, что эти изменения магнитного поля начали происходить из-за ускорения потока жидкого железа во внешнем ядре Земли<sup>21</sup> (рис. 15), которое, вероятно, началось в 1995 году.

По литературным данным, обнаружена корреляция между частотой инверсий магнитного поля и интенсивностью мантийного магматизма<sup>22,23,24</sup>. При этом известно, что инверсии магнитного поля, вероятно, связаны с процессами, протекающими во внешнем ядре вблизи границы ядро-мантия<sup>25</sup>. Корреляция между изменением интенсивности мантийного магматизма и частотой инверсий магнитного поля Земли указывает на то, что возмущения магнитного поля Земли возникают во внешнем ядре вследствие изменения интенсивности теплопередачи на подошвах плюмов, располагающихся на границе ядро-мантия.



**Рис. 14**  
**Расположение магнитных полюсов и магнитных полюсов, по данным IGRF-13 с 1900 по 2015 год с разбивкой по 5 лет и на 2020 (красный) и 2025 годы (прогноз).**

Источник: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto

<sup>20</sup>Дьяченко А.И. Магнитные полюса Земли. // М.: МЦНМО, 2003. 48 с.

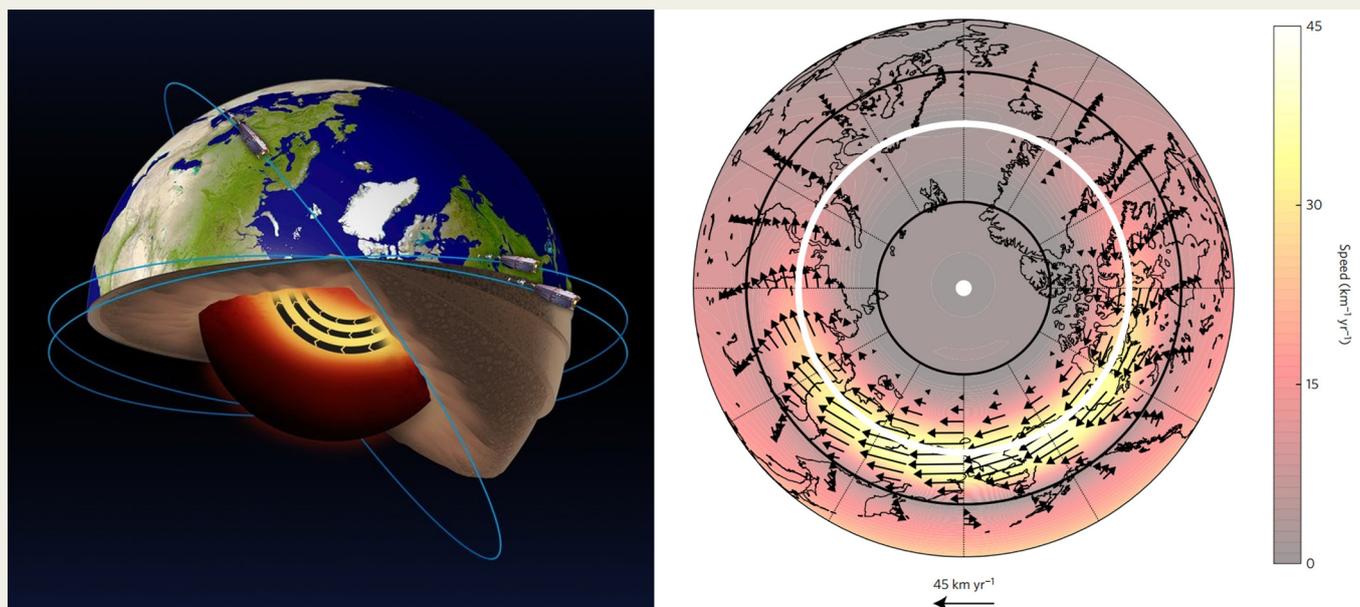
<sup>21</sup>Livemore, P. W., Hollerbach, R., & Finlay, C. C. (2017). An accelerating high-latitude jet in Earth's core. *Nature Geoscience*, 10, 62–68. <https://doi.org/10.1038/ngeo2859>

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

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

<sup>24</sup>Зоненшайн, Л.П. и Кузьмин, М.И. (1993) 'Глубинная геодинамика Земли', *Геология и геофизика*, 34(4), сс. 3-13.

<sup>25</sup>Добрецов, Н.Л., Кирдяшкин, А.Г. и Кирдяшкин, А.А. (2001) *Глубинная геодинамика*. Новосибирск: Издательство СО РАН, филиал «ГЕО».



**Рис. 15**

**Анализ спутниковых данных ЕКА Swarm показал наличие реактивной струи в жидкой железной части ядра Земли на глубине 3 000 км под поверхностью, а также то, что это реактивное течение ускоряется.**

Источник: ЕКА

Livermore, P. W., Hollerbach, R., & Finlay, C. C. (2017). An accelerating high-latitude jet in Earth's core.

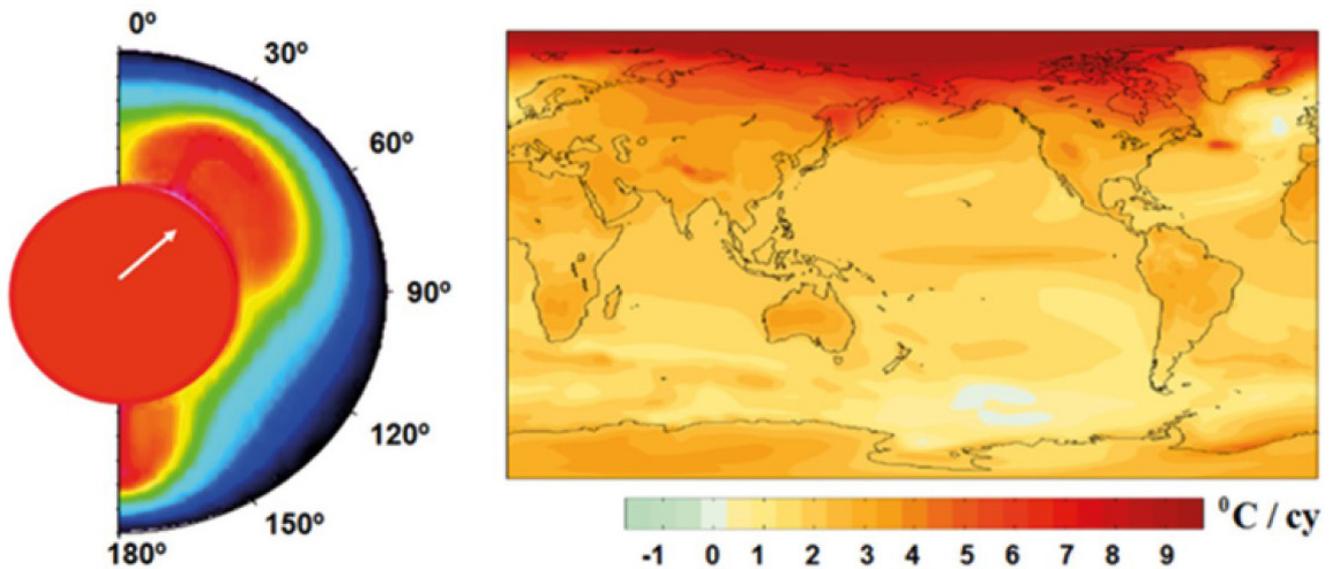
Nature Geoscience, 10, 62–68. <https://doi.org/10.1038/ngeo2859>

Увеличение суммарной тепловой мощности плюмов происходит вследствие как зарождения новых плюмов, так и увеличения тепловой мощности уже активных плюмов. Можно предположить, что геодинамические возмущения во внешнем ядре и мантии возникают в периоды зарождения и излияния плюма на поверхность<sup>26</sup>. Таким образом, современный дрейф северного магнитного полюса по направлению к полуострову Таймыр может являться дополнительным подтверждением, указывающим на изменения во внешнем жидком ядре Земли и резкий подъём плюма от границы ядро-мантия под Сибирью.

Таким образом, в результате внешнего космического воздействия на ядро Земли в 1995 году начался нагрев внутреннего ядра и расплавление внешнего, из-за

чего резко ускорился дрейф северного магнитного полюса. Разжижение внешнего ядра стало условием, из-за которого в 1997–1998 гг. произошёл сдвиг ядра в направлении Сибири, к полуострову Таймыр. Согласно гипотезе, выдвинутой доктором наук, профессором Ю. В. Баркиным, сдвиг ядра вызвал асимметричную подачу тепла в направлении Сибири (рис. 16). Важно заметить, что перенос тепла в мантии осуществляется в первую очередь за счёт конвективного перемешивания. То есть можно констатировать, что скачок ядра в первую очередь вызвал подъём магмы в направлении к Сибири. В дальнейшем стал наблюдаться аномальный нагрев атмосферы в этом регионе Сибири, и с каждым годом этот нагрев усиливается.

<sup>26</sup>Кирдяшкин, А.А. и Кирдяшкин, А.Г. (2013) 'Взаимодействие термохимического плюма с мантийными свободно-конвективными течениями и его влияние на плавление и перекристаллизацию мантии', Геология и геофизика, 54(5), сс. 707-721.



**Рис. 16**

**Вынужденная относительная раскочка ядра и мантии и схема асимметричной подачи тепла в верхние слои мантии (слева). Линейные тренды потепления поверхности (в °С в столетие), по данным NCAR CCSM3, усреднённым по специальному сценарию [http://www.realclimate.org/bitz\\_fig3.png](http://www.realclimate.org/bitz_fig3.png) (справа).**

Источник: Баркин Ю. В. Циклические инверсионные изменения климата в Северном и Южном полушариях Земли // Геология морей и океанов: Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. — М.: ГЕОС. 2009. С. 4–8.

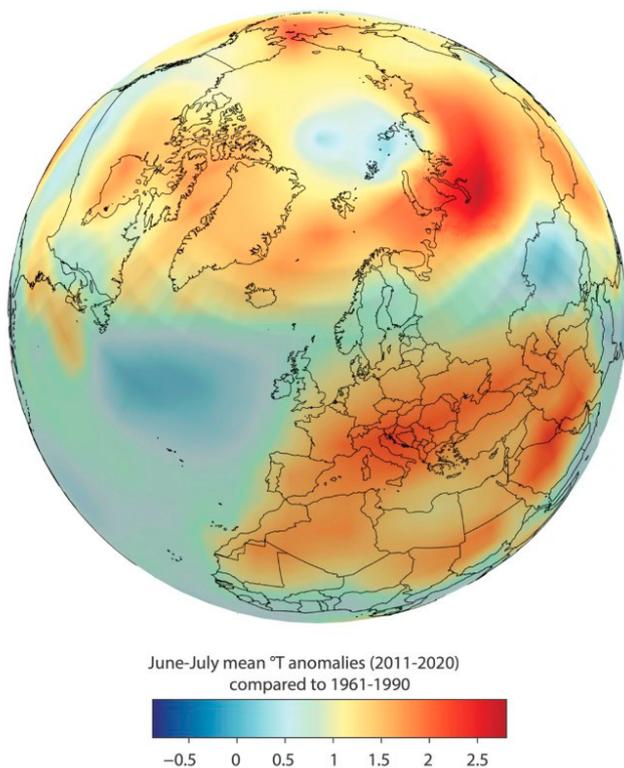
## Сибирь и Сибирская Арктика нагреваются в 3–4 раза быстрее остального мира

По данным различных организаций, территория России, в частности Арктический регион, испытывает экстремальный нагрев.

По данным учёных Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) на 2021 год, Россия нагревается в 3 раза быстрее, чем остальной мир, а её Арктические и Сибирские регионы нагреваются в 4 раза быстрее, чем в среднем по миру.

В 2022 году глава Росгидромета Игорь Шумаков заявил со ссылкой на данные Всемирной метеорологической

организации<sup>27</sup>, что территория России теплеет в 2,5 раза быстрее остальной планеты, причём наиболее быстрыми темпами растёт температура северной полярной области страны, особенно в последние десятилетия. Сибирь входит в число регионов с самым сильным потеплением в мире (рис. 17), что является беспрецедентным за последние 7 000 лет, исходя из восстановленных климатических условий, согласно исследованиям древесных колец<sup>28</sup>.



**Рис. 17**  
Средние аномалии температуры в июне-июле в Северном полушарии (полуострова Ямал и полуострова Таймыр) за последнее десятилетие наблюдений (2011–2020 гг.). Температуры выражены как аномалии относительно базового климата 1961–1990 гг. с использованием набора данных HadCRUT.5.

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

<sup>27</sup>ТАСС (2024) 'Территория России теплеет в 2,5 раза быстрее остальной планеты' [Электронный ресурс]. Доступно по адресу: <https://tass.ru/obschestvo/16009287> (Дата обращения: 31.12.2024)

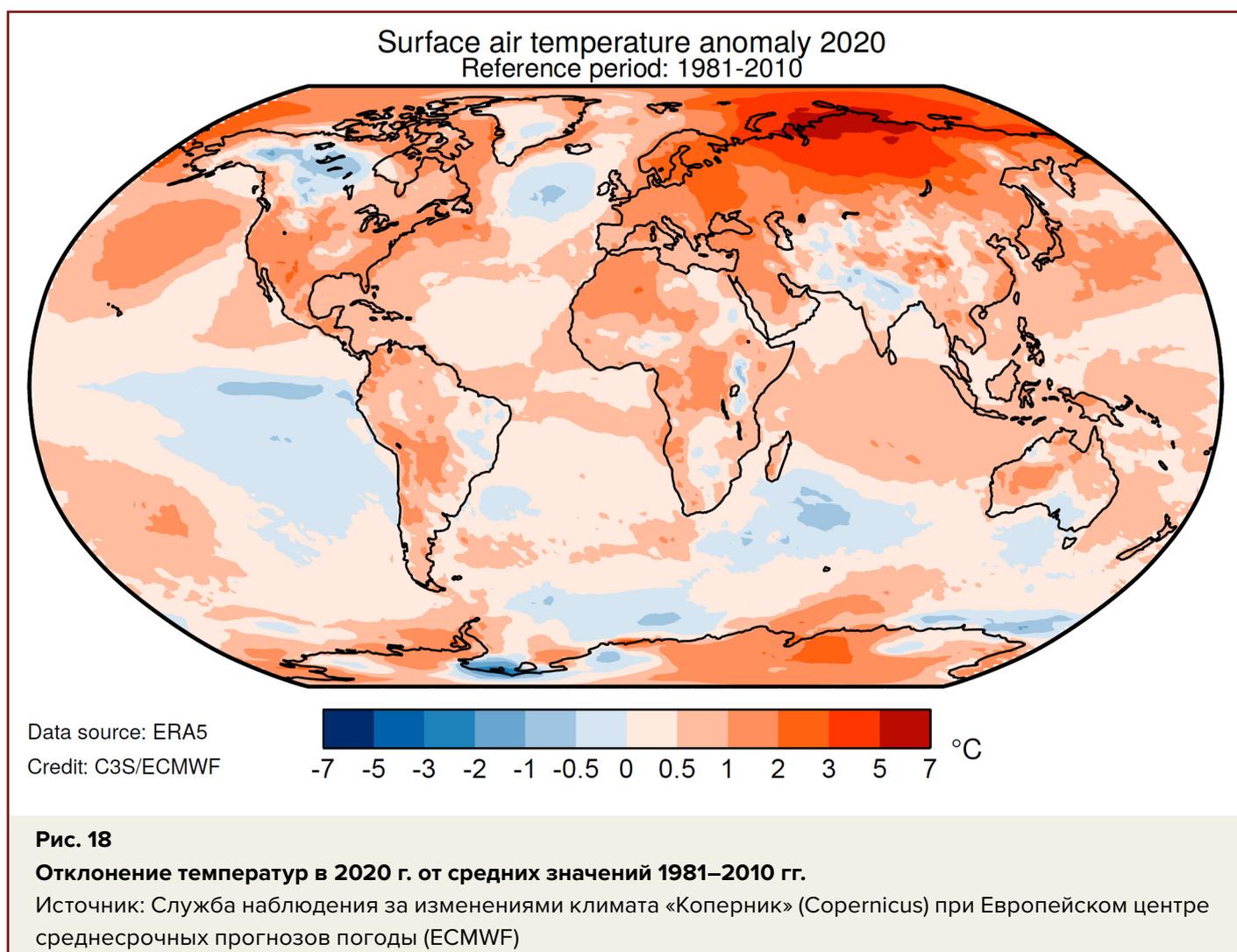
<sup>28</sup>Hantemirov, R. M., Corona, C., Guillet, S., et al. (2022). Current Siberian heating is unprecedented during the past seven millennia. *Nature Communications*, 13, 4968. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x>

Американский Центр изучения климата Вудвелл (WCRC)<sup>29</sup> провёл масштабное исследование для оценки того, как изменение климата повлияло на температуру, влажность почвы, толщину снежного покрова, уровень осадков и другие важнейшие климатические параметры в различных регионах Арктики. Для этого учёные объединили и систематизировали данные, собранные с помощью спутников, самолётов, дронов и наземных метеорологических станций за последние 40 лет.

Последующий анализ этих данных позволил исследователям выделить около двух десятков климатических «горячих точек». Сильнее

всего потепление затронуло приполярные и центральные регионы Восточной Сибири, где среднегодовые температуры каждое десятилетие повышались на 1,1 градуса Цельсия, что в разы выше общемировых темпов потепления. Ещё быстрее температура росла на Таймыре: по 1,7 градуса за декаду. Аналогичным образом температура в сибирской тайге увеличивались с конца 1980-х годов со скоростью 0,6 градуса за десятилетие.

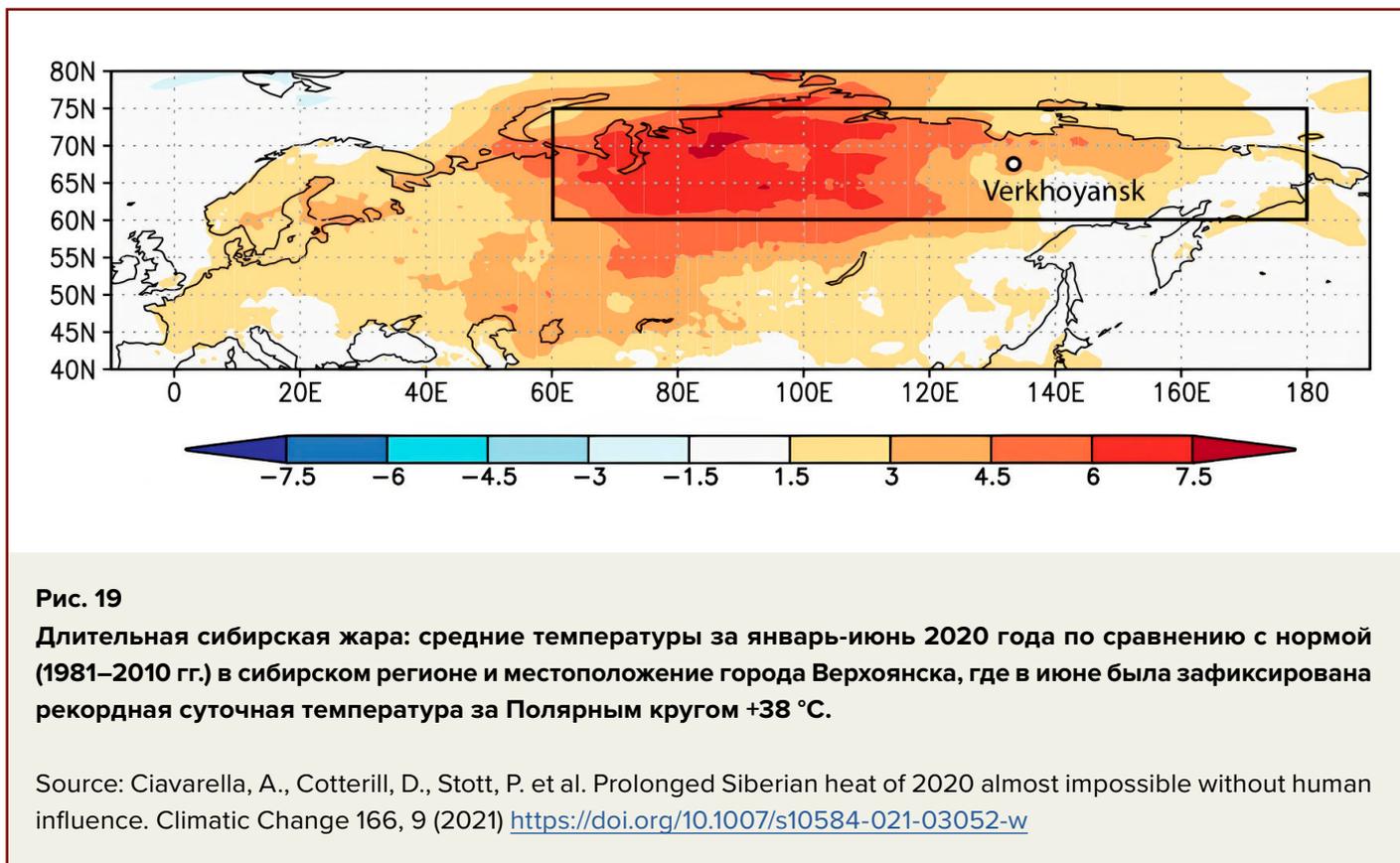
Волны тепла в Сибири в последние годы достигли нового тревожного уровня, особенно в 2020 году, когда температура резко выросла во всём регионе (рис. 18).



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

Температуры в Сибири были более чем на 5 °С выше среднего с января по июнь, а в июне - до 10 °С выше среднего (относительно уровня 1981–2010 гг.). Этот чрезвычайно жаркий период привёл к превышению местных рекордов тепла, в том числе на метеостанции Верхоянск, которая 20 июня зафиксировала

абсолютный рекорд +38 °С (рис. 19). Российская метеорологическая служба заявила, что эта измеренная температура была самой высокой из когда-либо зарегистрированных за Полярным кругом.



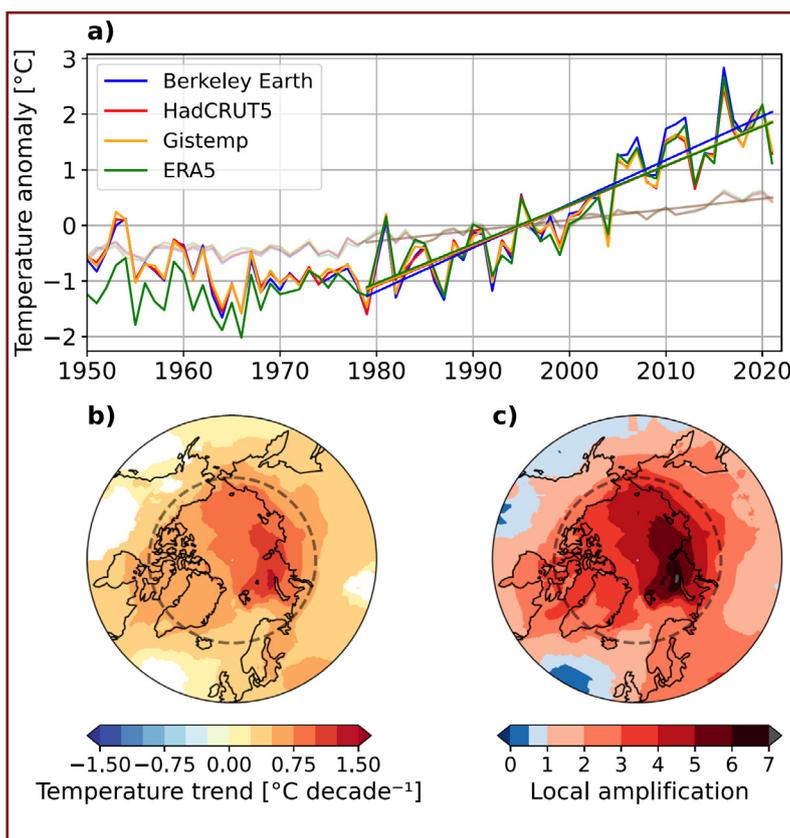
Данные волны тепла не находятся над Сибирью постоянно, но имеют характер пульсирующих колебаний. Это обусловлено тем, что вызывающие эти волны тепла внедрения магмы имеют волнообразный характер. В атмосфере, где воздушные массы свободно перемещаются и смешиваются, волны тепла могут спадать через несколько месяцев, как это было в 2020 году, в отличие от волн тепла в водных условиях.

Согласно исследованиям 2022 года, Сибирская Арктика нагревается почти в 4 раза быстрее, чем земной шар, что является более высоким соотношением, чем ранее учитывалось в климатических моделях, что является крайне неожиданным для учёных<sup>30</sup> (рис. 20).

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

Важно отметить, что данное потепление Арктического региона происходит именно в области полуострова Таймыр. Такую аномалию именно в акваториальной зоне Сибири можно объяснить тем, что океаническая кора более тонкая и быстрее проводит тепло, а вода обладает большей теплоёмкостью, чем

атмосфера. Поэтому именно океаническая вода интенсивно накапливает и задерживает тепло от поднимающегося магматического плюма, несмотря на то, что подъём плюма происходит под континентальной корой в относительном удалении от побережья.



**Рис. 20**  
**Динамика среднегодовой температуры в Арктике.**

а) Аномалии среднегодовой температуры в Арктике ( $66,5^{\circ}$ – $90^{\circ}$  с. ш.) (тёмные цвета) и в мировом масштабе (светлые цвета) за период 1950–2021 гг., полученные на основе различных наборов данных о результатах наблюдений. Аномалии температуры рассчитаны относительно средних значений за 30-летний период, 1981–2010 гг. Пунктирная линия на (b) и (c) означает Полярный круг ( $66,5^{\circ}$  с. ш.).

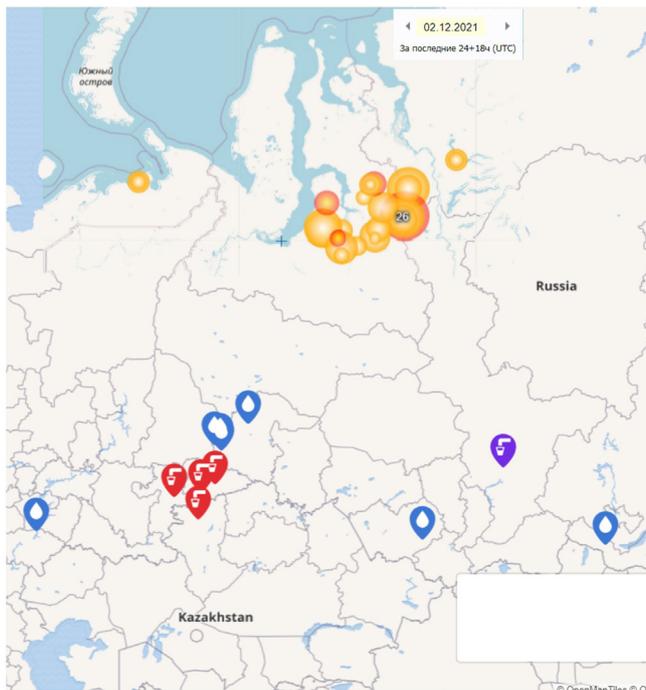
Источник: Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 3, 168.

<https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>

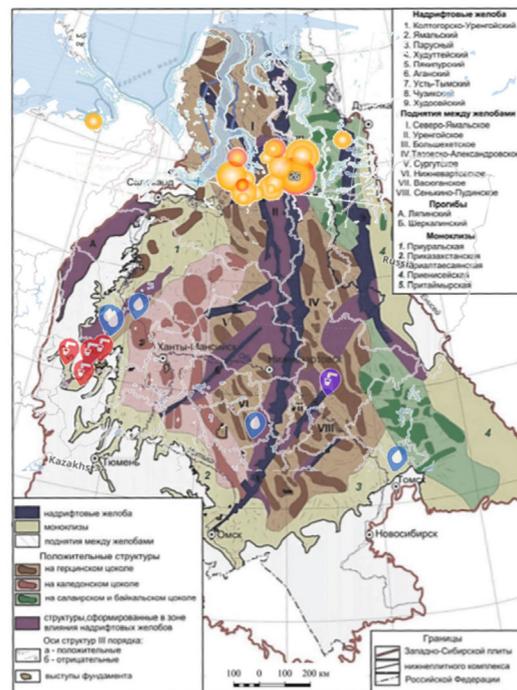
# Косвенные признаки подъёма Сибирского плюма

В результате внедрения магматического очага в земную кору под Сибирью происходит не только нагрев атмосферы, но и целый ряд других аномалий: таяние вечной мерзлоты снизу вверх, рост сейсмической активности в регионе, подъём горячих вод к поверхности, из-за чего в колодцах закипает вода, беспрецедентные лесные пожары по всей Сибири, в том числе и под снегом.

Максимальная локализация пожаров под снегом стала проявляться последние годы на юге полуостровов Таймыр, Ямал и Гыдан в полярных регионах. Важным фактором является то, что проявления пожаров под снегом («зомби-пожаров») — закипания воды в колодцах — отмечаются над зонами глубинных разломов (рис. 21).



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



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

Рис. 21

Карта локализации зимних пожаров под снегом за Полярным кругом в 2021 году



**Фотографии пожаров под снегом в Свердловском регионе**

В северных широтах наблюдается увеличение выбросов метана и водорода из недр, растёт количество воронок от природных взрывов газа, а на Арктическом шельфе усиливается грязевой вулканизм. Подогрев снизу вызывает деградацию многолетнемёрзлого грунта и разрушение газогидратов, что приводит к

высвобождению газов, воронкам взрывов и увеличению грязевого вулканизма. Высвобождаемый из недр газ влияет на состояние атмосферы, вызывая дополнительные тепловые, геохимические и электромагнитные аномалии. Рассмотрим эти процессы подробнее.

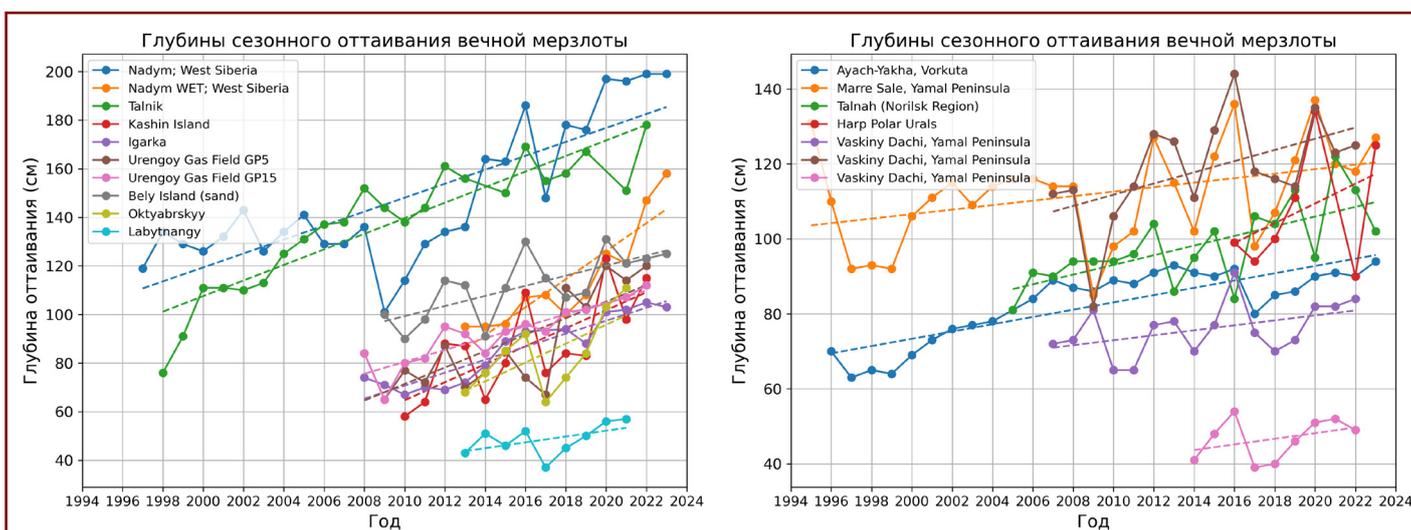
## Таяние вечной мерзлоты

Ещё одним из маркеров дополнительного геотермального тепла, поступающего от мантийного плюма, является состояние многолетнемерзлого грунта. Авторами доклада был проведён анализ данных глубины сезонного оттаивания вечной мерзлоты на территории России с 1994 по 2023 год. База данных была составлена на основе измерений, проводимых в рамках международной программы циркумполярного мониторинга активного слоя и приповерхностной вечной мерзлоты (CALM), и доступна на сайте [permafrost.su](https://permafrost.su).

В настоящее время на территории России действуют 58 площадок, осуществляющих наблюдения за многолетнемерзлыми породами по стандартизированной методике, и на 46 из них проводятся измерения на

протяжении более 10 лет, что позволяет выявлять долгосрочные тенденции. Анализ массива данных позволил выявить площадки, на которых наблюдается устойчивый тренд увеличения глубины оттаивания, что говорит о дополнительном нагреве этой зоны.

Были выделены две группы данных: площадки с более явным трендом увеличения глубины оттаивания на глубинах от 40 см до 200 см (рис. 22, а) и площадки с менее интенсивной скоростью оттаивания многолетнемерзлого грунта на глубинах от 40 см до 140 см (рис. 22, б).



**Рис. 22**

**Динамика глубины сезонного оттаивания вечной мерзлоты в различных регионах с разной интенсивностью: а) с более выраженным ростом глубины оттаивания; б) с менее выраженным ростом глубины оттаивания.**

Источник данных: <https://permafrost.su>

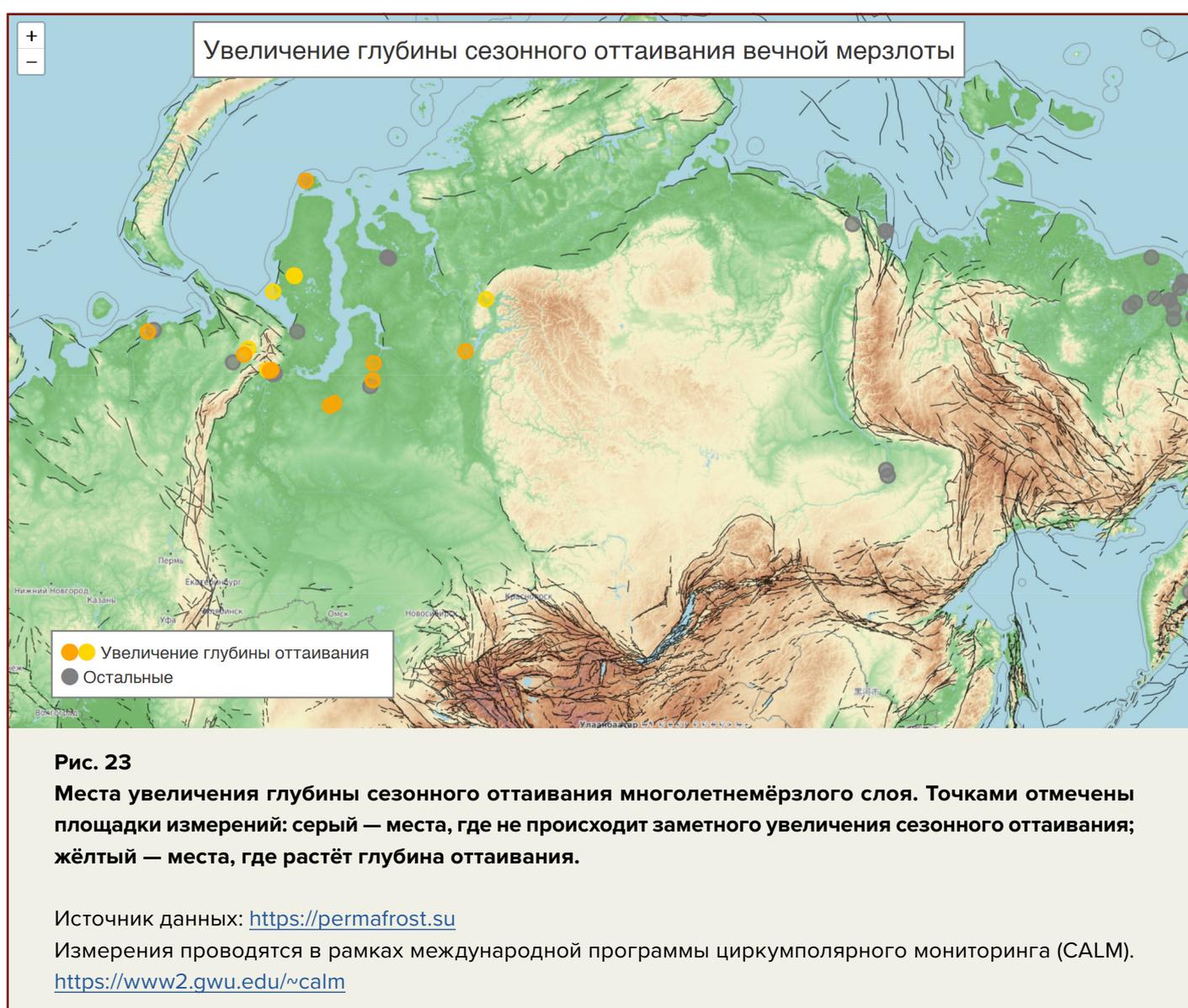
Измерения проводятся в рамках международной программы циркумполярного мониторинга (CALM):

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

Для наглядности все исследуемые точки были нанесены на карту и отмечены оранжевым и жёлтым цветом соответственно (рис. 23). Важно отметить, что эти точки в основном сконцентрированы в определённом районе: на севере Западной Сибири, на полуострове Ямал и южнее полуостровов Гыдан и Таймыр.

Такая локализация участков максимального оттаивания вечной мерзлоты соответствует

области пониженных скоростей сейсмических волн в мантии, в предполагаемой зоне расположения растекания головы магматического плюма. Это, в свою очередь, и является причиной повышения температуры грунта, в том числе и в пределах мёрзлого слоя.

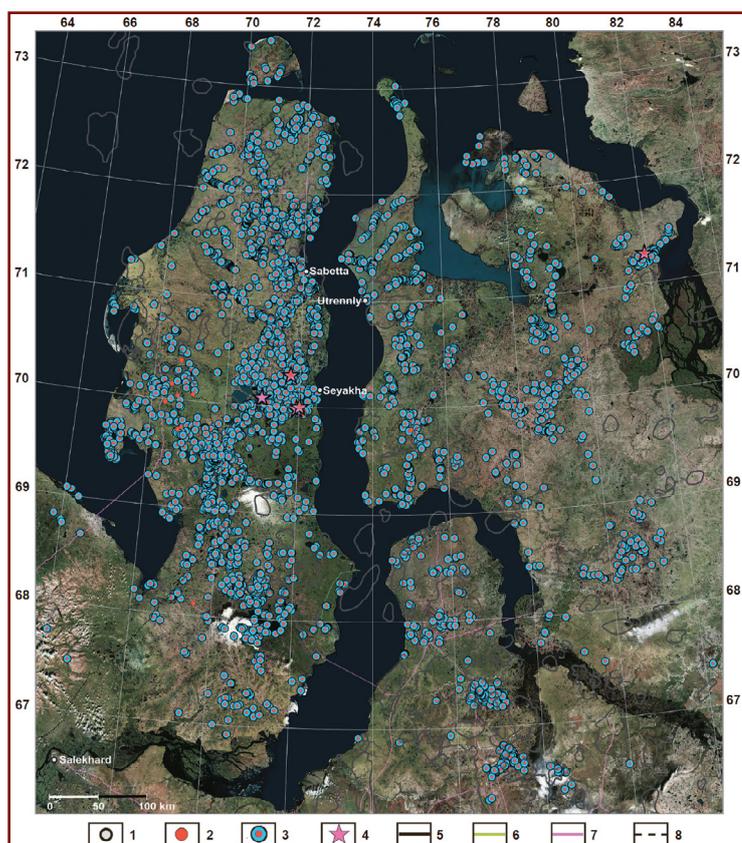


## Проявления грязевого вулканизма

Дополнительный нагрев от поднимающейся магмы приводит к деградации многолетнемёрзлых пород и воздействует на законсервированные в этих грунтах газогидраты, высвобождая большие объёмы заключённых в них газов. В дополнение к этому происходит миграция газа из залежей газовых месторождений и сильно газонасыщенных пластовых вод, что снижает упруго-прочностные свойства грунтов и способствует разжижению глин, приводя к возможным процессам грязевого вулканизма. Грязевой вулканизм — это геологический процесс извержения смеси газа, воды и обломочного материала через

трещины земной коры под действием внутреннего геостатического давления.

Именно такие процессы обнаружили учёные Российской академии наук (РАН) на арктическом полуострове Ямал<sup>31</sup>. В результате комплекса геолого-геофизических исследований с использованием данных дистанционного зондирования Земли в период с 2014 по 2022 год было выявлено более 3 000 зон мощных выбросов газа с формированием кратеров на дне термокарстовых озёр, рек и прибрежной части Карского моря (рис. 24).



**Рис. 24**  
**Распространение зон мощных выбросов газа на севере Западной Сибири.**

Обозначения:

1 — населённые пункты, 2 — обособленные кратеры выбросов газа, 3 — кратеры выбросов газа на дне водоёмов, 4 — грязевулканические проявления, 5 — контуры нефтегазовых месторождений, 6 — нефтепроводы, 7 — газопроводы, 8 — железная дорога. Основа карты — мозаика космоснимков базы ESRI

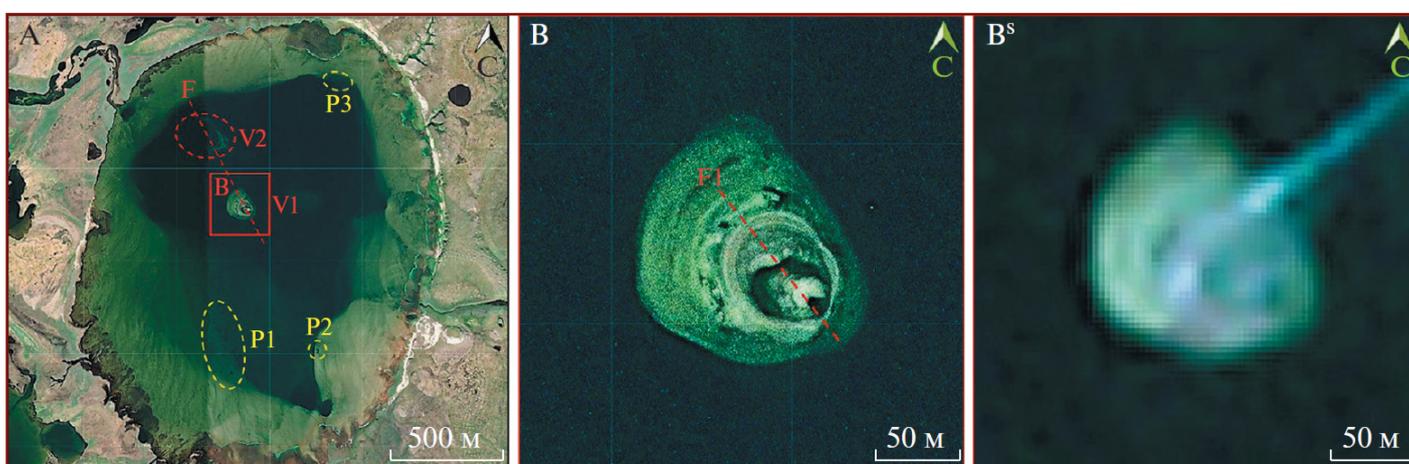
Источник: Богоявленский В. И., Никонов Р. А., Богоявленский И. В. Новые данные об интенсивной дегазации земли в Арктике на севере Западной Сибири: термокарстовые озёра с кратерами выбросов газа и грязевыми вулканами. Арктика: экология и экономика 13, 353–368 (2023). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

<sup>31</sup>Богоявленский, В.И., Никонов, Р.А. и Богоявленский, И.В. (2023) 'Новые данные об интенсивной дегазации земли в Арктике на севере Западной Сибири: термокарстовые озёра с кратерами выбросов газа и грязевыми вулканами', Арктика: экология и экономика, 13, сс. 353-368. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>

В 2022–2023 гг., по данным дистанционного зондирования Земли, на дне термокарстовых озёр Лабварто и Ямбуто впервые были обнаружены крупные грязевулканические постройки, периодически проявляющие активный грязевой вулканизм<sup>32</sup> (рис. 25). Термокарстовое озеро — это водоём, который образуется в результате оттаивания многолетней мерзлоты. Таким образом, не только оттаивание озера, но и разжижение

глины глубоко под озером указывает на глубинный источник нагрева.

Согласно авторам исследования, ранее во всём Циркумарктическом регионе столь явные грязевулканические постройки на дне термокарстовых озёр были неизвестны.



**Рис. 25**

**Космоснимок WorldView-2 термокарстового озера Лабварто (А) и его увеличенный фрагмент (В) с дополнением фрагмента космоснимка Sentinel-2 (B<sup>s</sup>). Обозначения: P1, P2 и P3 — пометки; V1 и V2 — грязевые вулканы; F и F1 — прогнозируемые разломы.**

Источник: Богоявленский В. И. Новые данные о грязевом вулканизме в Арктике на полуострове Ямал. Доклады Российской академии наук. Науки о Земле 512, 92–99 (2023)

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

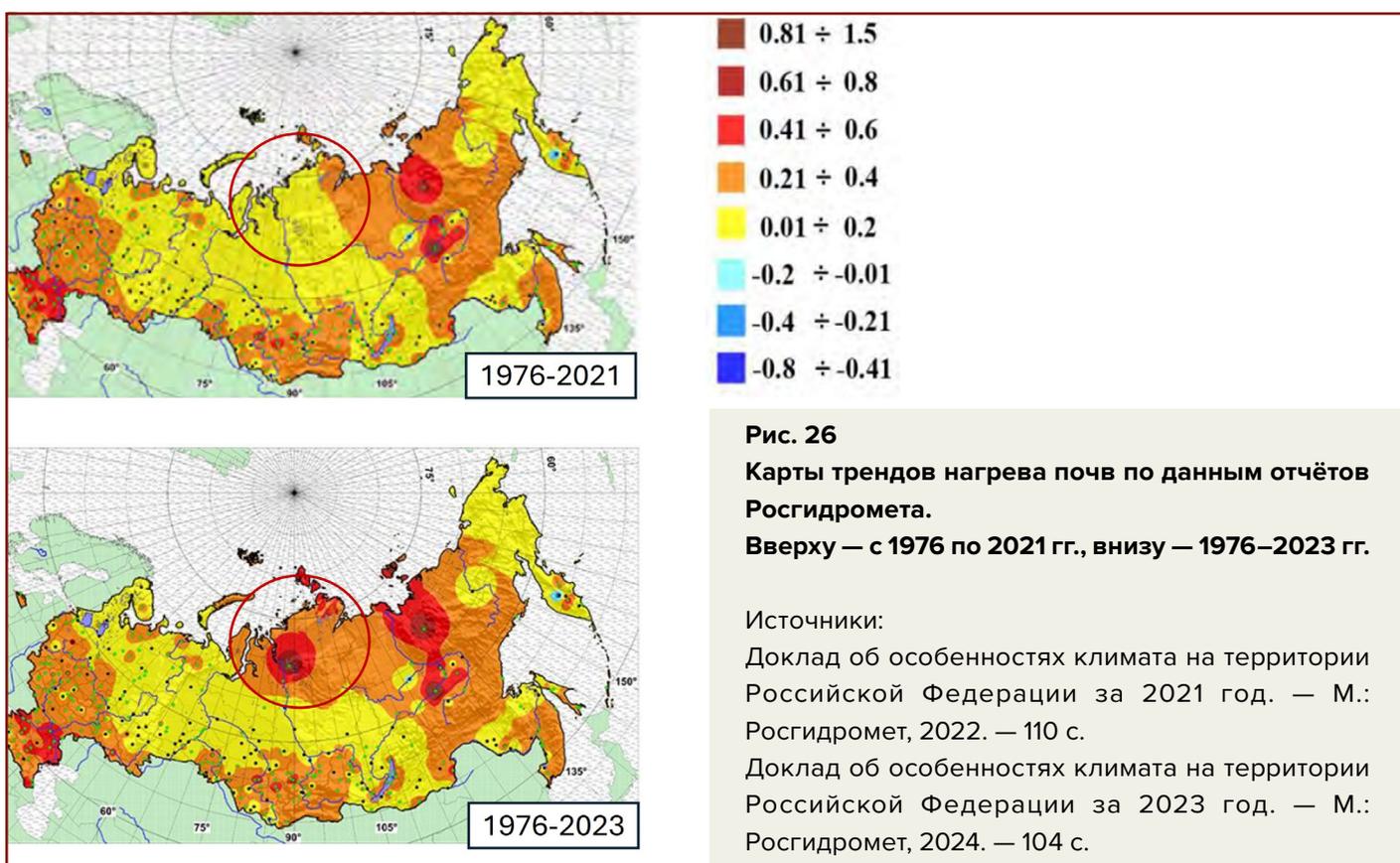
<sup>32</sup>Богоявленский, В.И. (2023) 'Новые данные о грязевом вулканизме в Арктике на полуострове Ямал', Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 512, сс. 92-99. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>

## Нагрев почв

На основе данных Росгидромета за 2021–2023 гг., были проанализированы карты температур почв на глубинах 80, 160 и 320 см. Наиболее информативным оказалось сравнение температурных трендов за периоды 1976–2021 и 1976–2023 гг. (рис. 26). Между 2021 и 2023 годами на карте трендов проявилась чёткая аномалия южнее полуостровов Гыдан и Таймыр, которая территориально совпадает с областью пониженных скоростей сейсмических волн в мантии, выявленных методами

сейсмотомографии под литосферой Сибирского региона.

Принимая во внимание значительную глубину измерений (320 см) и широкий охват наблюдений (466 метеостанций России), можно предположить, что обнаруженная температурная аномалия связана с увеличением геотермального тепла в связи с подъёмом магматического плюма.

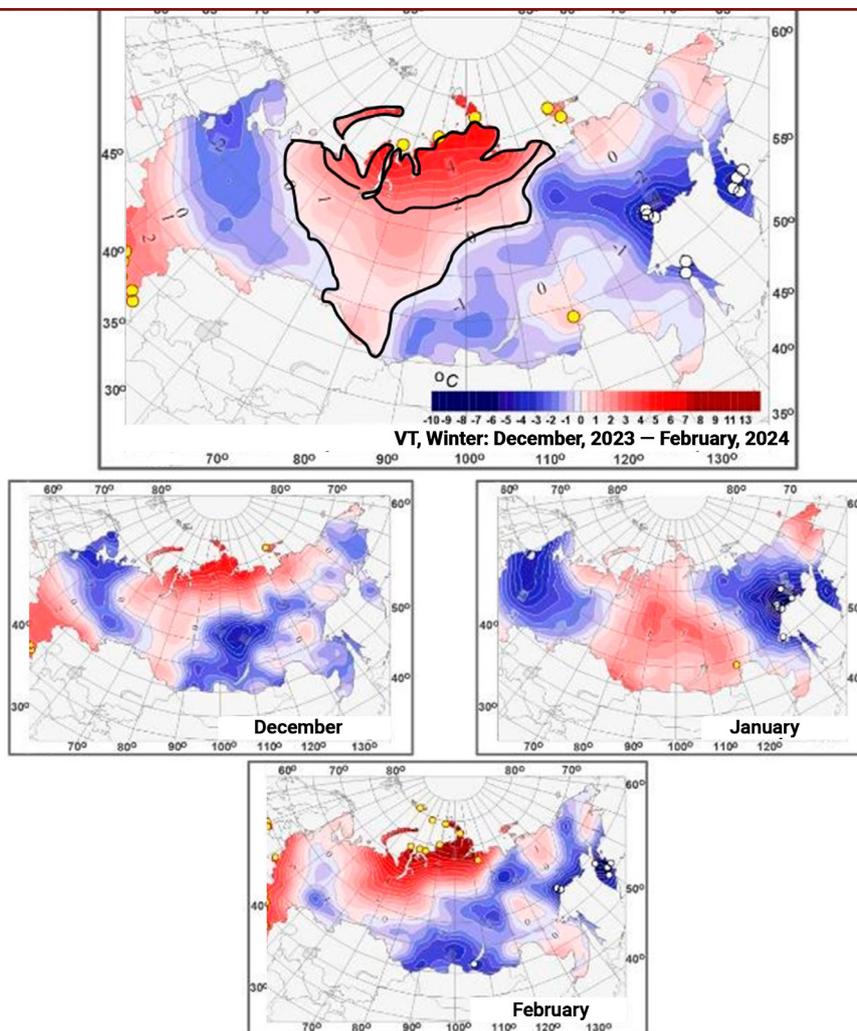


## Температура приземного воздуха

Данные температурных наблюдений за зимний период 2023–2024 гг. также отражают аномальный характер приземных температур воздуха (рис. 27). Карта средних температурных аномалий за период с декабря 2023 по февраль 2024 года показывает в районе полуостровов Гыдан

и Таймыр повышение температуры на 2,0–4,5 °С относительно нормы.

Учитывая северное расположение данной территории, такое значительное повышение температуры в зимний период может быть связано с тепловым воздействием мантийного плюма.



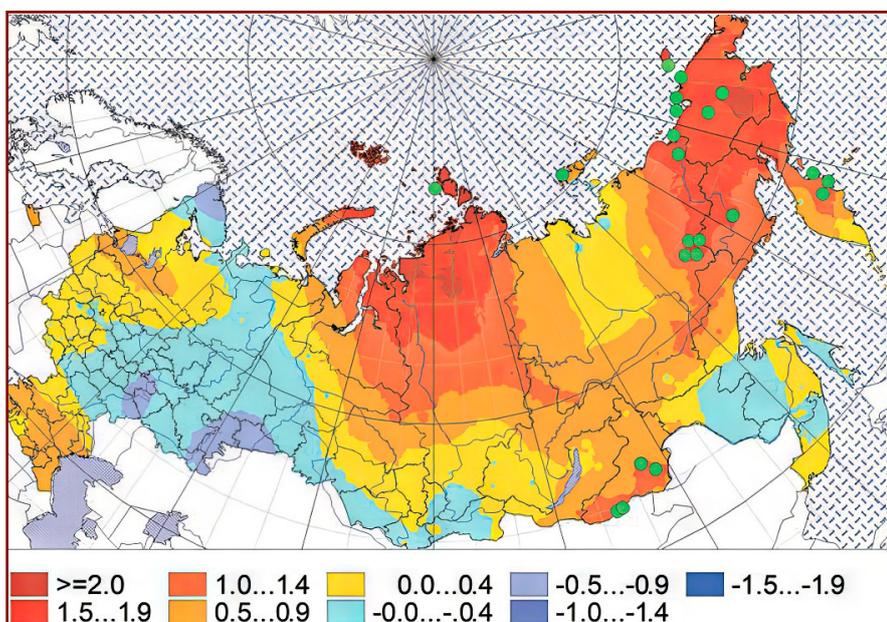
**Рис. 27**

**Поля средней сезонной и средних месячных аномалий температуры приземного воздуха (°С) на территории России зимой 2023-2024 гг.**

Источник: Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. — М.: Росгидромет, 2024.

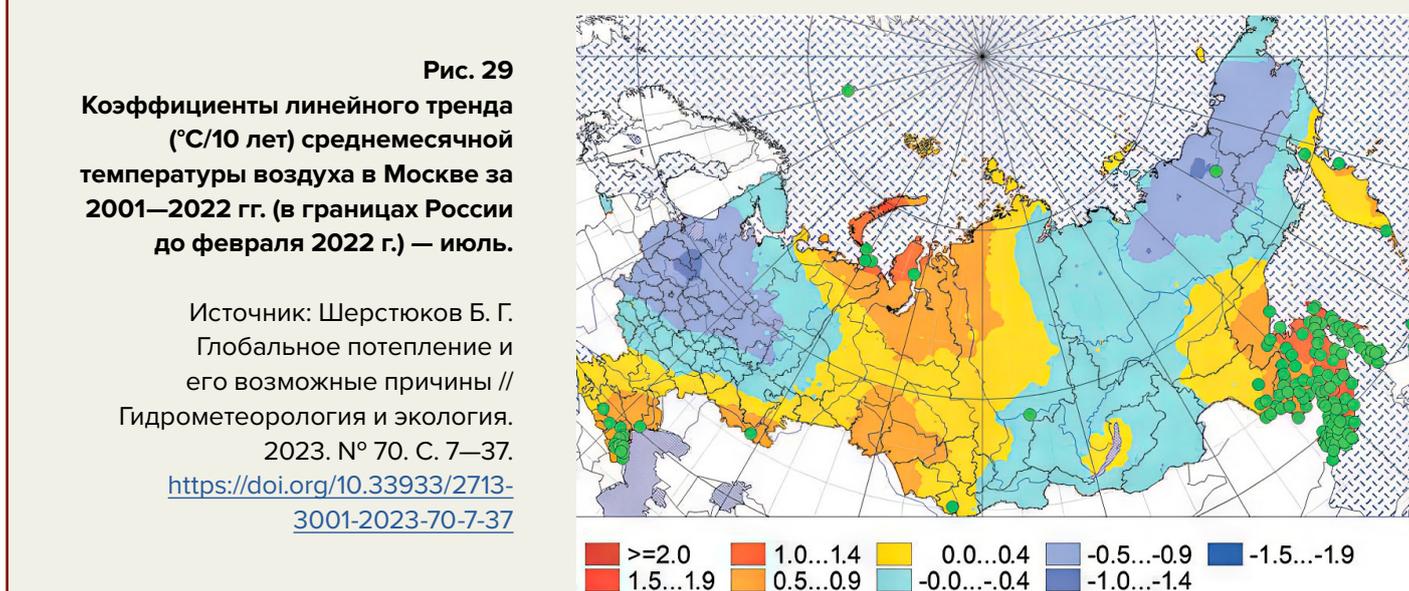
Отметим, что анализ карт среднемесячных температур<sup>33</sup> за январь и июль в период 2001–2022 гг. показывает устойчивую температурную аномалию в исследуемом регионе (рис. 28, 29). Таким образом, можно констатировать, что данная аномалия

наблюдается не только в последние 2 года, но и стабильно проявляется на протяжении всего 23-летнего периода наблюдений, что подтверждает выводы о влиянии внедрения плюма на приземные температуры.



**Рис. 28**  
Коэффициенты линейного тренда (°C/10 лет) среднемесячной температуры воздуха за 2001–2022 гг. (в границах России до февраля 2022 г.) — январь.

Источник: Шерстюков Б. Г. Глобальное потепление и его возможные причины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 7–37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>



**Рис. 29**  
Коэффициенты линейного тренда (°C/10 лет) среднемесячной температуры воздуха в Москве за 2001–2022 гг. (в границах России до февраля 2022 г.) — июль.

Источник: Шерстюков Б. Г. Глобальное потепление и его возможные причины // Гидрометеорология и экология. 2023. № 70. С. 7–37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

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

## Увеличение количества молний

Обеспокоенность научного сообщества вызывает рост количества гроз и ударов молний в Арктике. Количество ударов молний в Арктике выше 65° с. ш. утроилось с 2010 по 2020 год<sup>34</sup> (рис. 30). Особенностью является то, что большая часть этих ударов молний сосредоточена в области севера Сибири, а в районе севера Канады

и Гренландии практически отсутствуют (рис. 31, 32). Молнии продвигаются к Северному полюсу, так как в августе 2019 года широко сообщалось о том, что несколько ударов молний были обнаружены всего в нескольких сотнях километров от Северного полюса<sup>35</sup>.

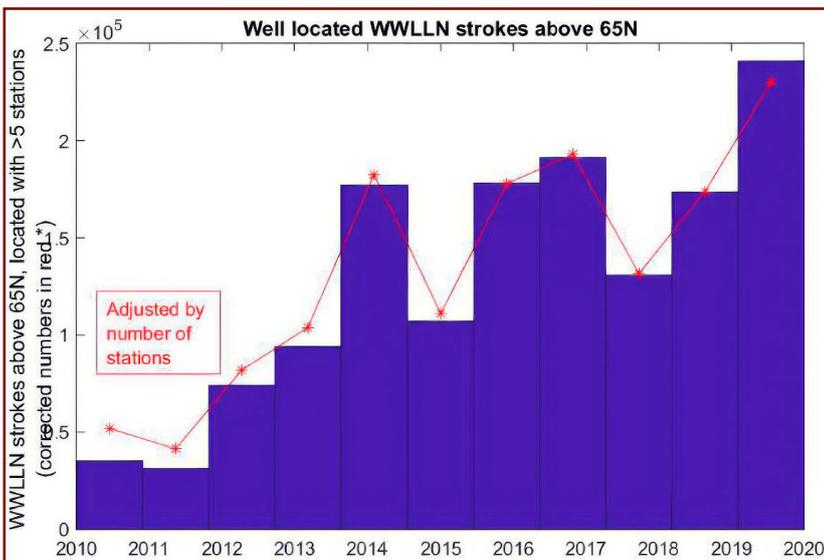


Рис. 30

Корректно зафиксированные разряды молний WWLLN выше 65°N (отмечены синим), а красная линия графика показывает корректировку, основанную на общем количестве станций WWLLN. WWLLN — Всемирная сеть обнаружения молний (World Wide Lightning Location Network).

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

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

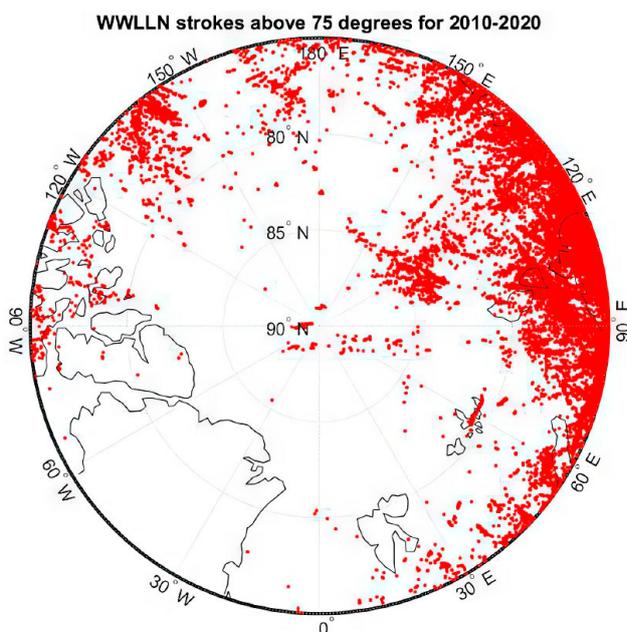


Рис. 31

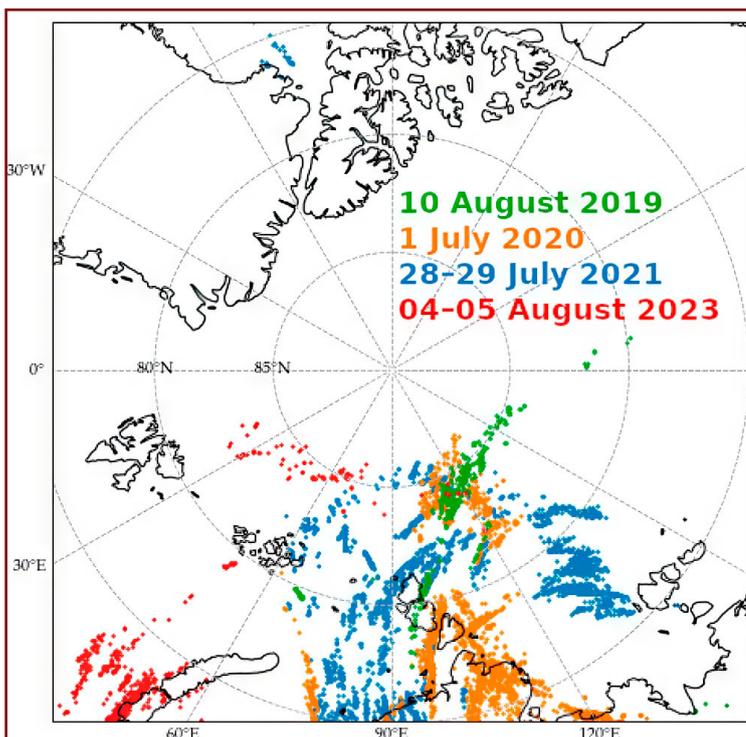
Глобальное распределение ударов молний WWLLN в июне, июле и августе 2010–2020 гг. выше 75° с. ш. WWLLN — Всемирная сеть определения местоположения молний.

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

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

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

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



**Рис. 32**

**Места молний, обнаруженные WWLLN во время гроз в 2019–2023 гг.**

**Зелёный — 2019 г., оранжевый — 2020 г., синий — 2021 г., красный — 2023 г.**

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

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

Большинство молний в полярных регионах (к северу от 80° с. ш.) каждое лето вызвано всего несколькими интенсивными грозовыми днями. Однако эти грозы стали новой особенностью региона, поскольку в предыдущие годы здесь гроз было очень мало. Причина этого фиксированного местоположения в течение последних нескольких лет заключается в экстремальной летней жаре, наблюдаемой на севере Сибири с температурами, достигающими 35 °С в летние месяцы. Но также предполагается, что увеличение общей ионизации атмосферы в этом регионе вследствие внедрения магматического плюма также является важным фактором увеличения количества молний. Это происходит в результате перехода тепловой энергии в электрическую по эффекту Юткина в процессе внутримантийных взрывов, которые происходят при контакте потоков магмы разной температуры. В результате из недр высвобождается огромное количество энергии, приводящее к увеличению

статического напряжения на поверхности почвенного слоя, изменению поверхностного потенциала, повышению ионизации воздуха и, как следствие, увеличению количества молний.

Также происходит выделение значительных объёмов газов через трещины в коре. Это может влиять на формирование облаков, а также на локальные погодные условия. Внедрение магмы является ключевым фактором прогрева поверхности, увеличения влажности и возникновения тепловых аномалий, приводящих к грозовым облакам и молниям.

Поскольку для возникновения гроз и молний требуется сочетание холодного воздуха, тёплого воздуха и конвективной неустойчивости, расположение Сибирского мантийного плюма создает оптимальные условия для их формирования.

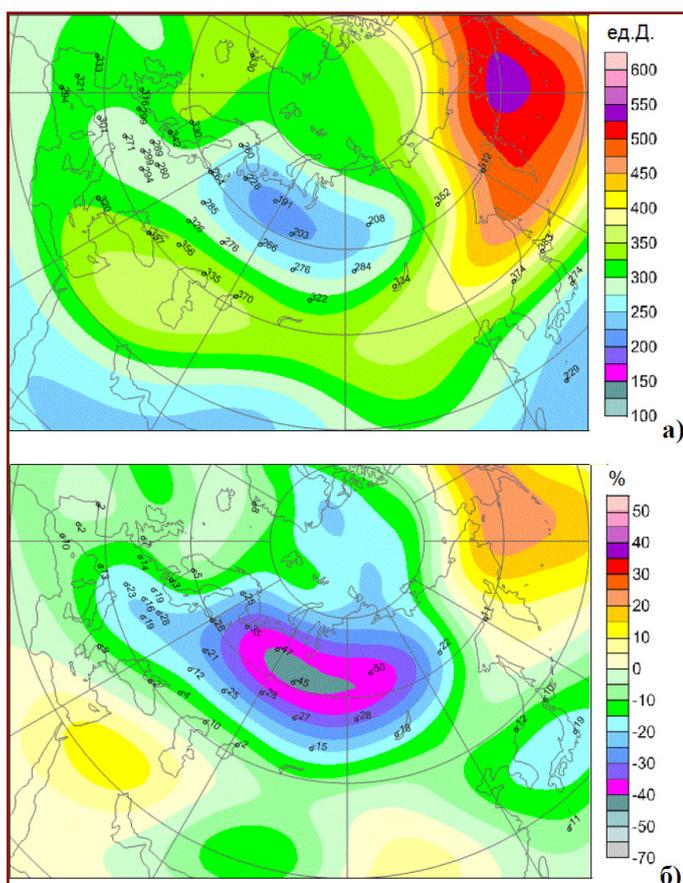
## Истощение озонового слоя

Магматическая активность в недрах сопровождается выходом значительного количества вулканических газов, среди которых водород, метан, углекислый газ. Выбросы водорода, согласно работам В. Л. Сывороткина<sup>36</sup>, вызывают разрушение озонового слоя. Так как подъём магмы имеет пульсационный характер, то дегазация и последующее разрушение озонового слоя будут также иметь спорадическое, то есть эпизодическое проявление.

Аномалии озонового слоя наблюдаются над севером Сибири начиная с 1997–1998 гг., то есть после смещения ядра Земли в направлении к полуострову Таймыр. Эпизоды истощения

озонового слоя наблюдались в 2011, 2016, 2020 гг.<sup>37</sup>. Максимальный дефицит содержания озона был зафиксирован в 2016 году<sup>38</sup>. В конце января 2016 года (впервые с начала наблюдений в 1973 году) над севером Урала и Сибири была зарегистрирована озоновая аномалия с общим содержанием озона 190–200 е.Д., что на 40–45 % меньше средних многолетних значений, с продолжительностью существования данной явления до 1 недели (рис. 33).

Значительное сокращение общего содержания озона также было зафиксировано при помощи инструмента OMI, установленного на спутнике AURA (США) (рис. 34).



**Рис. 33**

**Общее содержание озона (а) и его отклонения от нормы (б) 28 января 2016 г. по спутниковым данным WOUDC [<http://woudc.org/>], числа на карте — измерения общего содержания озона на станциях озонометрической сети.**

Источник:

Никифорова М. П., Варгин П. Н., Звягинцев А. М., Иванова Н. С., Кузнецова И. Н., Лукьянов А. Н. (2016). Озоновая мини-дыра над Северным Уралом и Сибирью. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, № 360, с. 168–180. В материалах Гидрометеорологической конференции, 9–10 февраля, Том 4, с. 91–96. Воронеж: Научно-исследовательские публикации.

<sup>36</sup>Сывороткин, В.Л. (2018) 'Глубинная дегазация в полярных регионах планеты и изменение климата', Актуальные проблемы нефти и газа, 23. doi:10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art48

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

<https://doi.org/10.1029/2021GL092509>

<sup>38</sup>Никифорова, М.П. (2017) 'Экстремально низкие значения общего содержания озона над северным Уралом и Сибирью в конце января 2016 года', Атмосфера и океан. Оптика, 30(1). doi:10.15372/AOO20170102

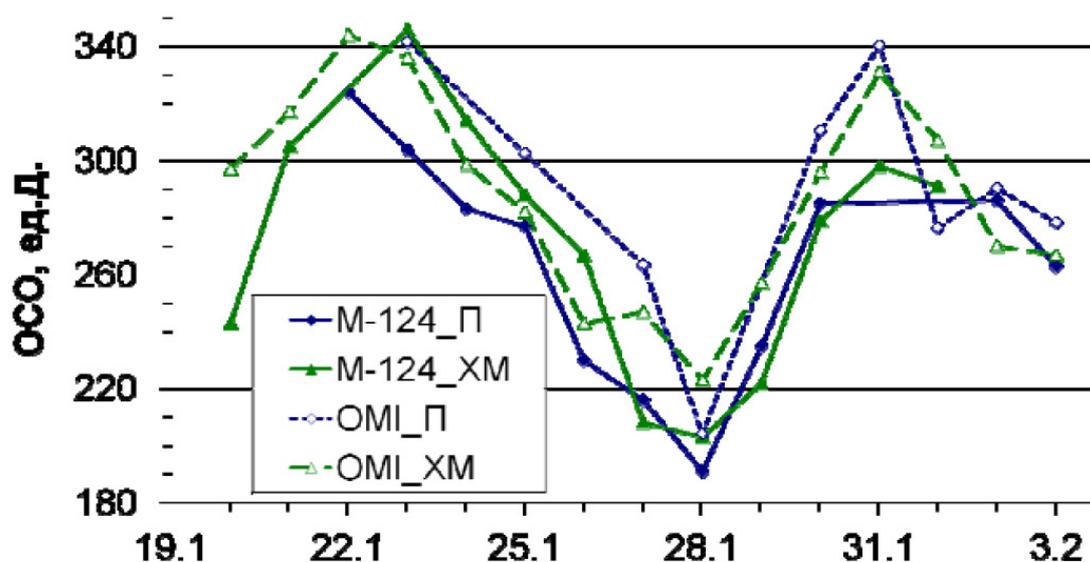


Рис. 34

Общее содержание озона по данным измерений с помощью наземного озонметра М-124 и инструмента OMI на спутнике AURA (США) на станциях Печора (П) и Ханты-Мансийск (ХМ) в период с 20 января по 3 февраля 2016 г.

Источник: Никифорова М. П., Варгин П. Н., Звягинцев А. М., Иванова Н. С., Кузнецова И. Н., Лукьянов А. Н. (2016). Озоновая мини-дыра над Северным Уралом и Сибирью. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, № 360, с. 168–180. В материалах Гидрометеорологической конференции, 9–10 февраля, Том 4, с. 91–96. Воронеж: Научно-исследовательские публикации.

Важно отметить, что средний многолетний сезонный ход общего содержания озона во внетропических широтах Северного полушария имеет минимум в сентябре, а максимум — в марте-апреле. Но в 2016 году деградация озона образовалась нетипично рано, в январе 2016 года, и общее содержание озона в этот месяц

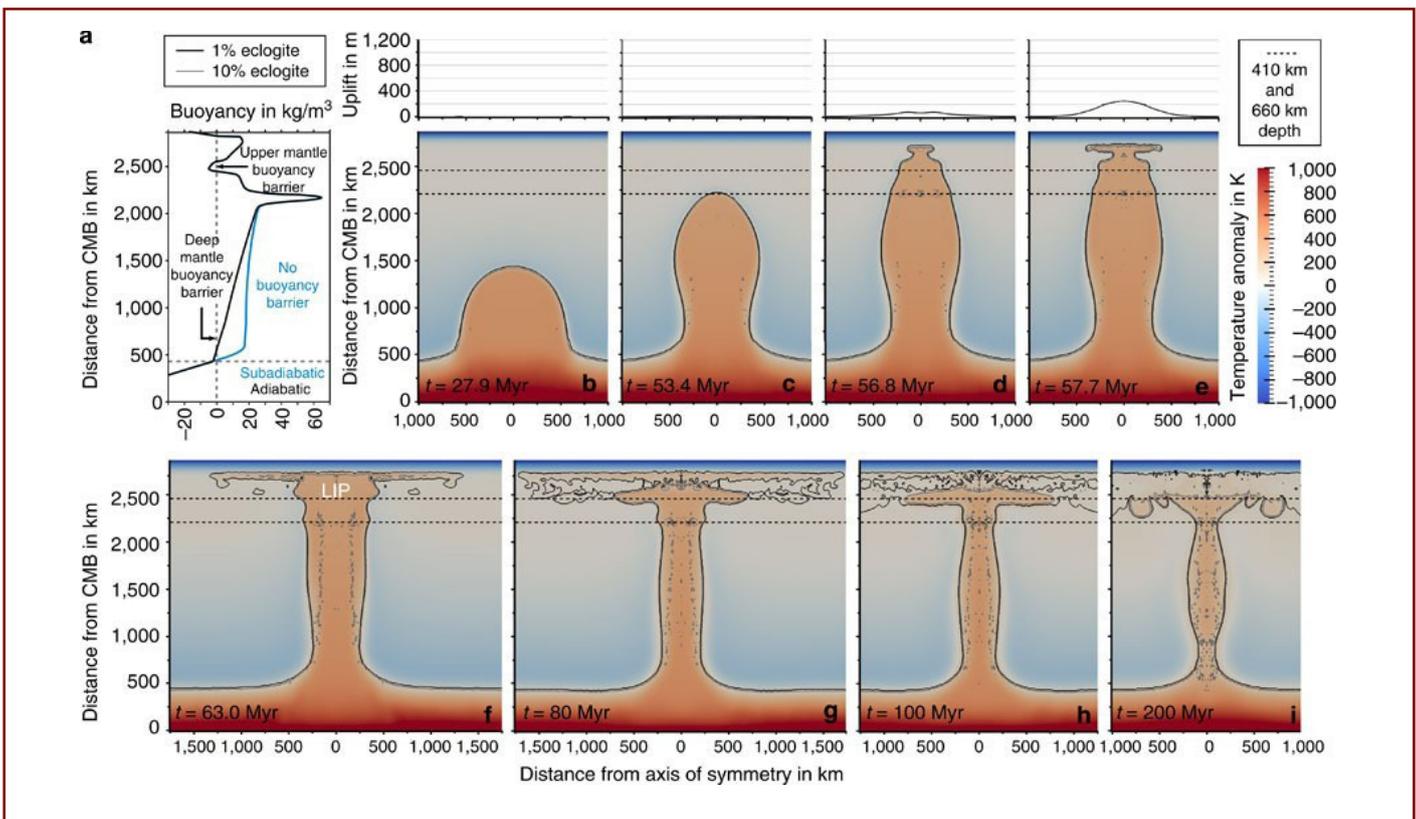
было минимальным за всю историю инструментальных наблюдений.

Таким образом, деградация озонового слоя над Сибирским регионом может быть дополнительным индикатором выхода газов по разломам в результате продвижения магматического плюма к поверхности.

# Строение, возможные размеры и локализация магматического плюма, исходя из литературных и наблюдаемых данных

Строение плюма можно условно сравнить с грибом. У него есть так называемый хвост, который поднимает раскалённый материал от границы ядро-мантия. Верхняя часть плюма, которая внедряется в процессе подъёма,

— это голова плюма. Когда плюм достигает границы (подошвы) литосферы, упираясь в тугоплавкий слой застывших пород, голова плюма начинает растекаться под литосферой, как шляпка гриба (рис. 35).



**Рис. 35**  
**На рисунке изображена модель эволюции магматического плюма, например, такого же, который сформировал Сибирские траппы 250 млн лет назад.**

График слева (a) показывает, как магма поднимается через разные слои мантии Земли. Основная часть изображения (b-i) — это своего рода «временная лента», показывающая этапы развития плюма. Сначала формируется «столб» горячей магмы, поднимающийся от основания

мантии. Постепенно этот столб достигает верхних слоёв мантии. В верхней части он расширяется, формируя «грибовидную» шапку. Со временем плюм становится тоньше и начинает распадаться на отдельные части. Цвета на схеме показывают температуру: красные и оранжевые участки — самые горячие, синие — более холодные.

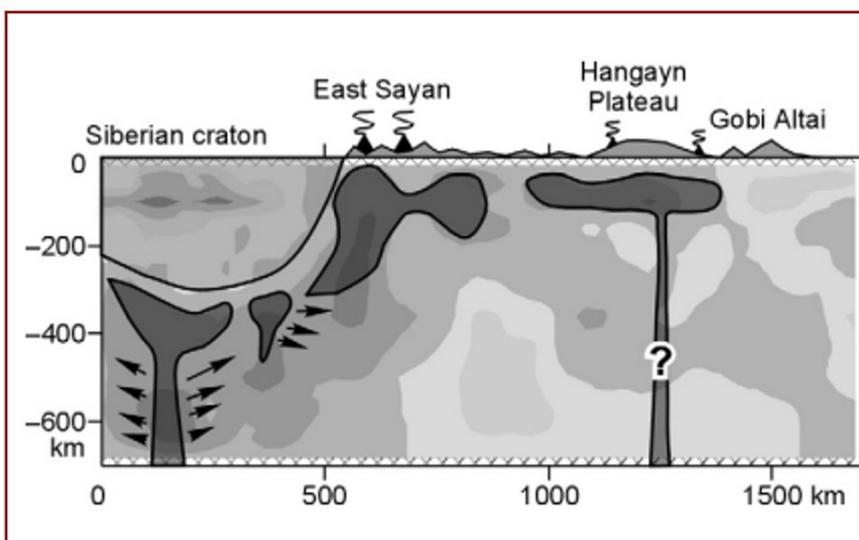
Источник: Dannberg, J., Sobolev, S. Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept. Nat Commun 6, 6960 (2015). <https://doi.org/10.1038/ncomms7960>

Согласно литературным данным, по мере приближения плюма к литосфере его радиус удваивается при растекании, а скорость резко снижается<sup>39</sup>. Горячий материал, который поступает из “хвоста”, давит и прожигает литосферу, образует трещины, и тогда там, где ослабленные места, будут формироваться вторичные плюмы — верхние магматические камеры уже внутри земной коры. Такие же камеры есть, например, у Йеллоустона, Кампи Флегрей и других супервулканов. Это то самое место, где может произойти прорыв коры и массовое извержение магмы на поверхность.

Важно отметить, что, согласно существующим представлениям, подъём плюма к поверхности может занимать по времени десятки миллионов лет. Однако эти данные базируются на теоретических расчётах, в то время как практические наблюдения за современной эволюцией геодинамических процессов говорят об обратном. Наблюдения за процессами в Сибири указывают на то, что подъём плюма может произойти в течение нескольких десятилетий.

Исходя из литературных данных<sup>40</sup>, известно, что аналогичный магматический суперплюм, который вызвал многочисленные извержения базальтов в Евразии (в Сибири) на границе пермского и триасового периодов (250 млн лет назад), имел следующие размеры: 4 000 км с запада на восток и 3 000 км с севера на юг. А голова плюма, как предполагается, имела диаметр от 1 000 до 2 000 км.

Известно, что Западно-Сибирская плита более молодая и тонкая, толщиной 35–40 км. Восточно-Сибирская платформа наоборот — старая и толстая, более холодная, 40–45 км толщиной. Её называют Сибирским кратоном. По данным сейсмотомографии, учёные предполагают<sup>41</sup>, что под южным окончанием Восточно-Сибирской платформы сейчас наблюдаются небольшие магматические очаги, которые растекаются под Сибирским кратоном (рис. 36), из-за того что плита более холодная.



**Рис. 36**  
Схематическое изображение обтекания Сибирского кратона небольшими магматическими очагами (слева показаны стрелками)

Источник: Кулаков И. Ю. Структура верхней мантии под Южной Сибирью и Монголией по данным региональной сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 3. С. 187–196.

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

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

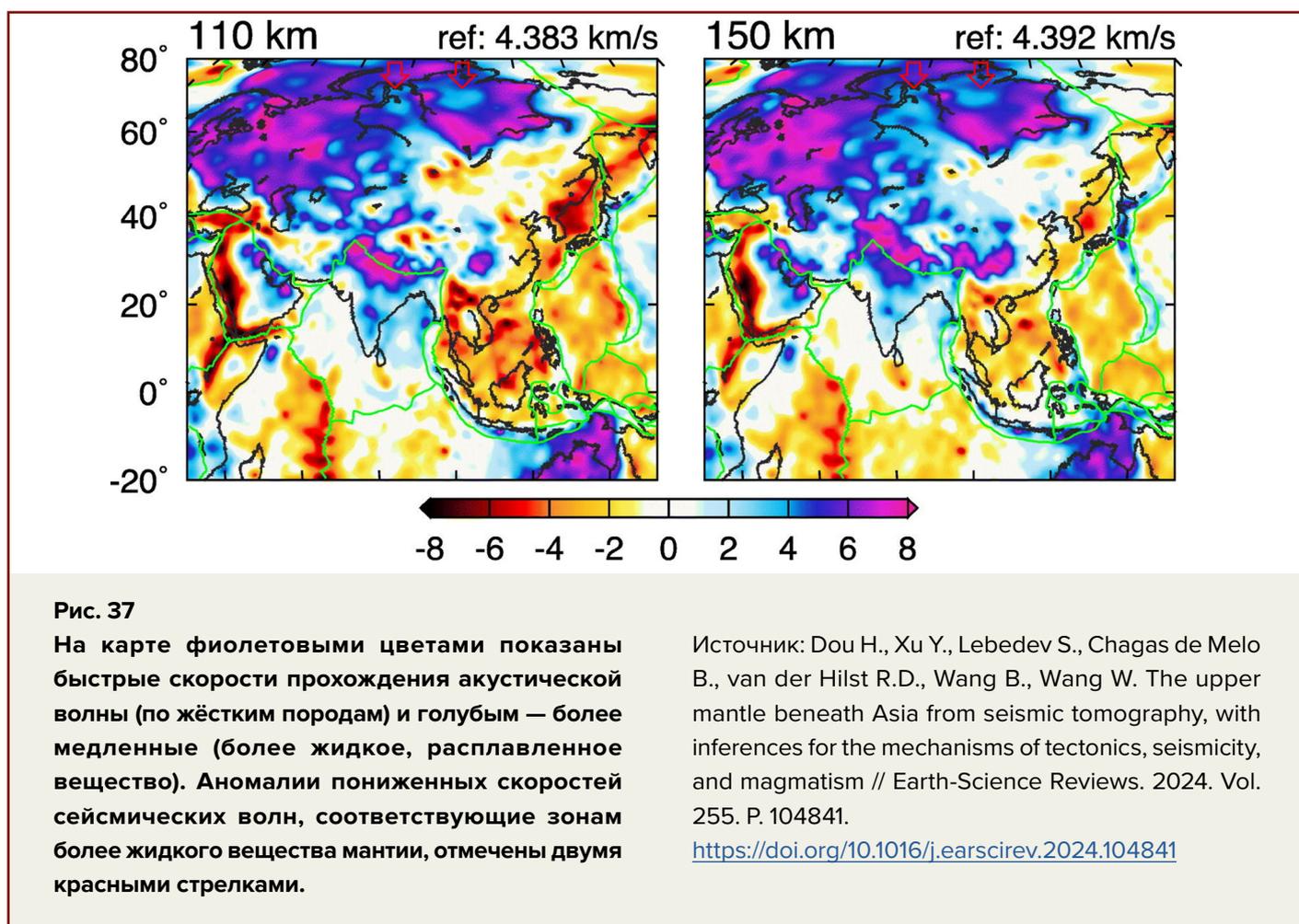
<sup>40</sup>Львова, Е.В. (2010) 'Тектоника мантийных плюмов: эволюция основных представлений', Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, 5, сс. 21-29.

<sup>41</sup>Кулаков, И.Ю. (2008) 'Структура верхней мантии под Южной Сибирью и Монголией по данным региональной сейсмической томографии', Геология и геофизика, 49(3), сс. 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012>

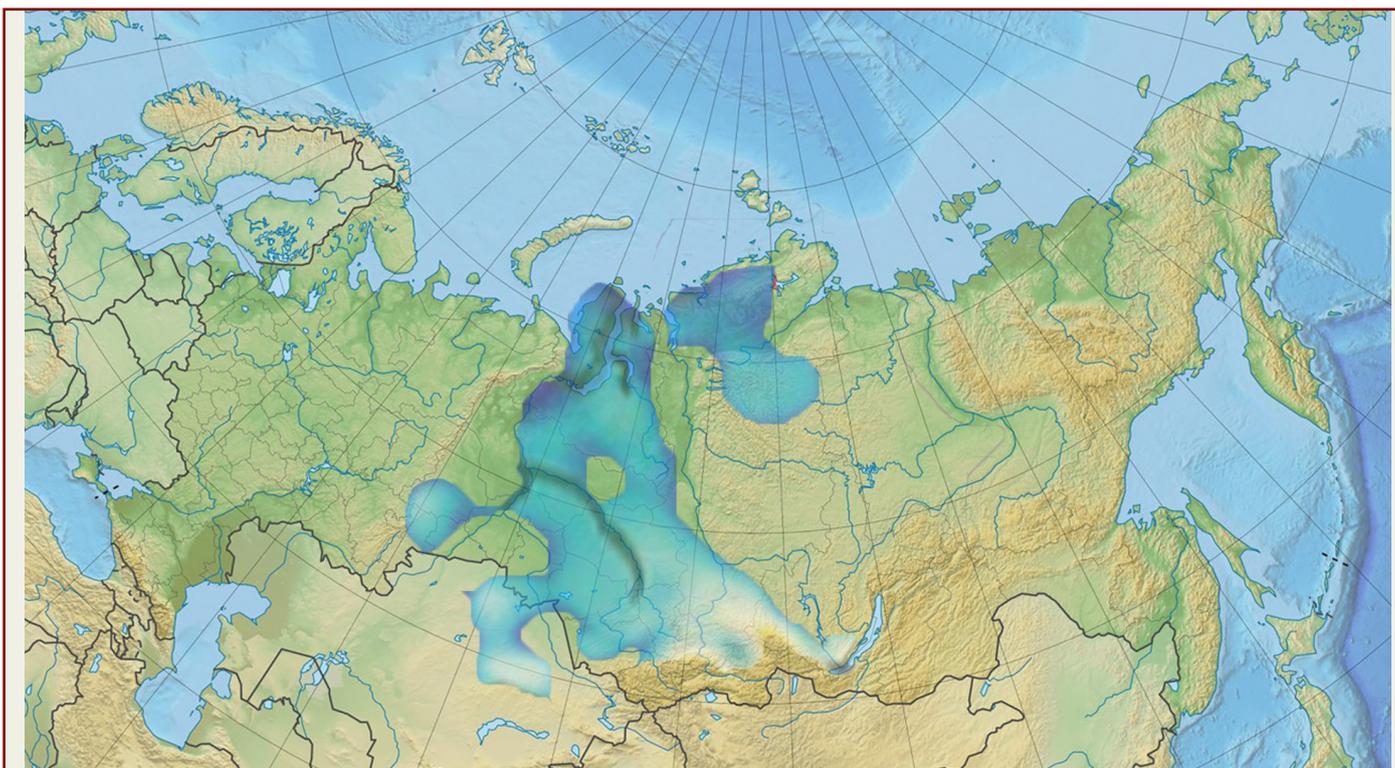
Согласно гипотезе, на данный момент современный Сибирский плюм растекается под подошвой Восточно-Сибирской платформы и частично под Западно-Сибирской плитой. Растекание может происходить, согласно литературным данным, на глубинах 50–60 км, а нога плюма предпологаемо наблюдается наиболее чётко на глубинах 100 км. Внедрение вторичных плюмов, вероятно, уже происходит на глубинах 40 км.

Некоторые сейсмотомографические модели показывают аномалии пониженных скоростей<sup>42</sup> (более жидкая среда) на

глубинах 110–150 км, что соответствует более жидкой среде в недрах южнее полуостровов Гыдан и Таймыр (рис. 37). Это видно на картах скоростей по данным статьи, опубликованной в августе 2024 года. Эти аномалии предположительно можно ассоциировать с двумя притоками магматического вещества, то есть хвостами плюма (рис. 38). Если данная модель верна, то диаметр каждого хвоста, который поднимается под Восточно-Сибирским кратоном, — около 600–700 км.



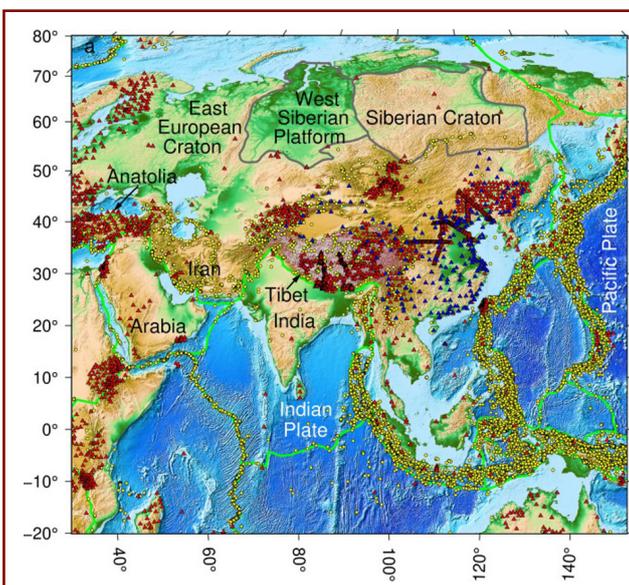
<sup>42</sup>Dou H., Xu Y., Lebedev S., Chagas de Melo B., van der Hilst R.D., Wang B., Wang W. The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism // Earth-Science Reviews. 2024. Vol. 255. P. 104595. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104595



**Рис. 38**  
 На физическую карту России нанесены и адаптированы аномалии пониженных сейсмических скоростей, по данным Dou et al., 2024

Но важно отметить, что в представленном в статье сейстотомографическом анализе (Dou et al., 2024) территории Сибири использовались данные менее чем с 10 сейсмических датчиков (рис. 39), которые все расположены по границам плит и практически отсутствуют внутри Западной и Восточной

Сибири. В анализе использовались данные всех общедоступных широкополосных записей землетрясений с 1994 года и до 4 сентября 2023 года. Для сравнения: на карте красными треугольниками отмечены датчики, используемые в анализе для Азии, их количество исчисляется тысячами.



**Рис. 39**  
 Расположение датчиков (красные треугольники), используемых при сейстотомографическом анализе.

Источник:  
 Dou H., Xu Y., Lebedev S., Chagas de Melo B., van der Hilst R.D., Wang B., Wang W. The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism // Earth-Science Reviews. 2024. Vol. 247. P. 104595.  
 DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104595

Ещё одно исследование, проведённое китайскими учёными в 2023 году, подтверждает то, что сейчас под воздействием магмы под Сибирью плавится и истончается кора<sup>43</sup> (рис. 40). Этот процесс прогрессирует и снижает прочность плиты. В работе авторы представляют модель электропроводности мантии для Северной Азии, построенную на основе геомагнитных данных. Модель показывает большую аномалию с высокой электропроводностью, которая находилась в переходной зоне мантии под Сибирскими траппами на момент их извержения. Учёные интерпретировали её как термическую аномалию со следами расплава в районе существующей Пермской аномалии (рис. 41).

В целом сейсмотомографические модели, исследующие глубины от 40 до 110 км в районе Восточно-Сибирского

кратона, показывают отличные друг от друга результаты. При этом для территории Сибири наблюдается явный недостаток сейсмологических данных для построения точных моделей.

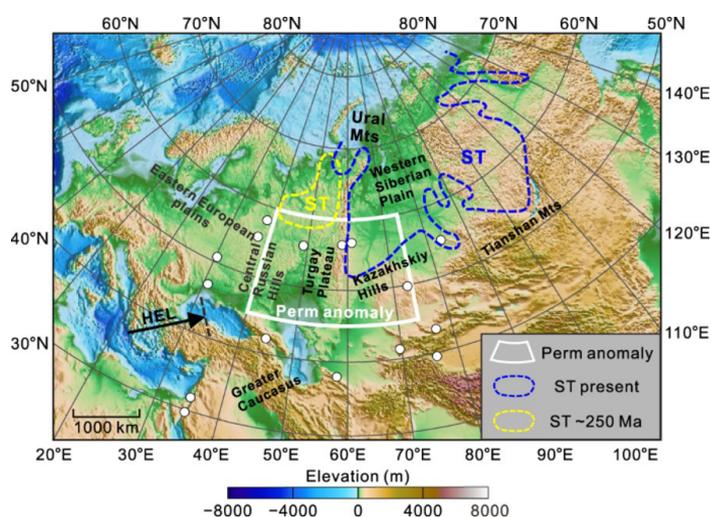
Современные томографические модели строятся на основе сейсмических данных, собранных за длительный период — около 30 лет. С точки зрения классических представлений о развитии мантийных плюмов, которое длится миллионы лет, 30-летний период считается крайне коротким. Однако имеющиеся данные указывают на то, что именно за этот промежуток времени в структуре Сибирского плюма произошли ключевые изменения. Эти наблюдения приводят к пониманию необходимости пересмотра существующих представлений о скорости развития мантийных плюмов и методах их изучения.

#### Рис. 40

Белые точки обозначают станции, чьи С-ответы используются в этом исследовании. Диапазон Пермской аномалии показан зоной, очерченной белыми линиями. Текущее (синее) и прошлое (жёлтое) местоположения Сибирских траппов обозначены пунктирными линиями.

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

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



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

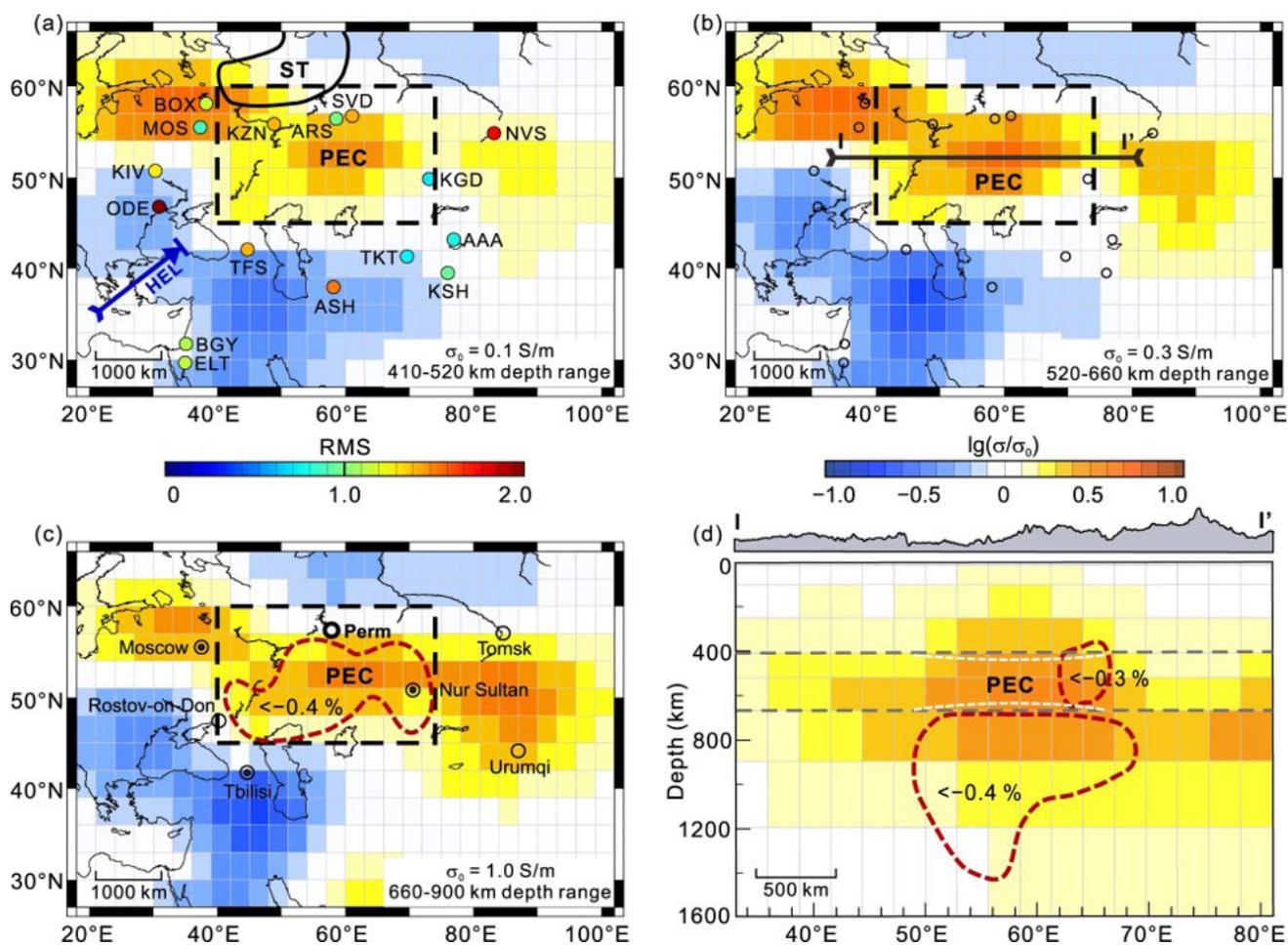


Рис. 41

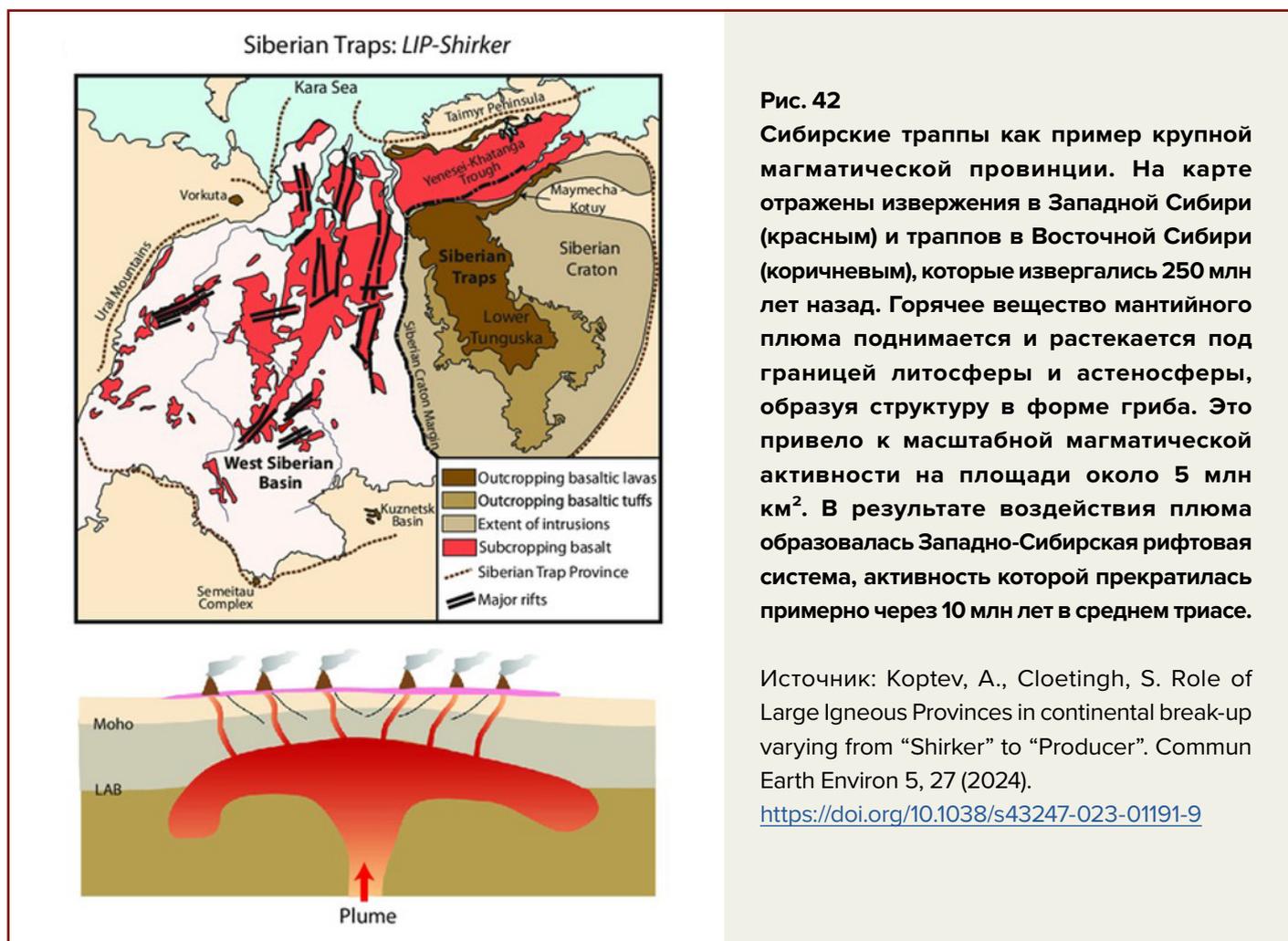
Учёные из Цзилиньского университета (Jilin University) и Университета Шицзячжуан Тедао (Shijiazhuang Tiedao University) использовали данные геомагнитного поля (geomagnetic field data) от 16 станций в Северной Азии для вычисления электрической проводимости мантии на разных глубинах. Они обнаружили заметное увеличение проводимости по отношению к средней по всему миру проводимости в области под Сибирскими траппами (жёлто-коричневые области на рисунках). Учёные установили, что

данные области на глубинах от 400 до 900 км в среднем на 250 градусов горячее, чем окружающая мантия. В этих областях присутствует доля расплавленной мантии.

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

Стоит отметить, что предыдущие излияния 250 млн лет назад (на рубеже пермского и триасового периода) происходили также в этом же регионе. Эпицентр располагался под Восточно-Сибирским кратоном (под

плато Путарана), а излияния происходили по всей Западной и Восточной Сибири (рис. 42).



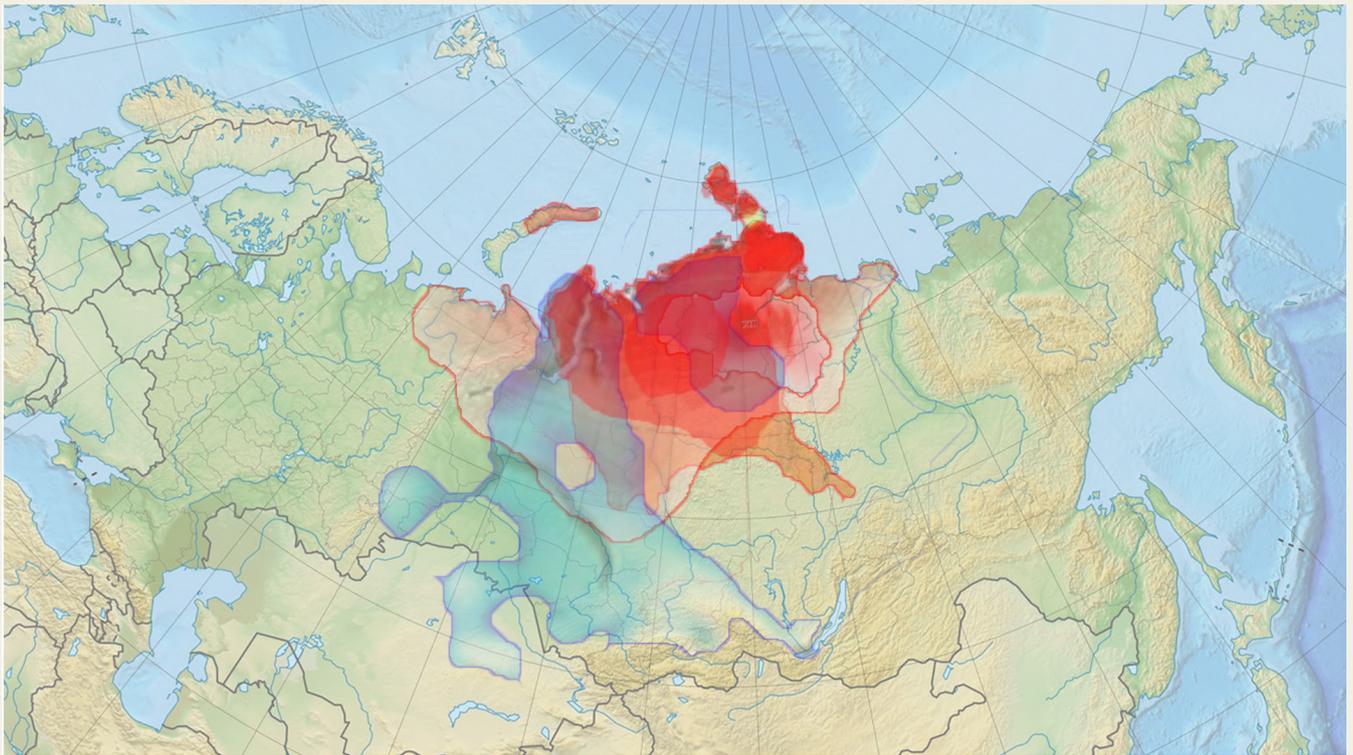
**Рис. 42** Сибирские траппы как пример крупной магматической провинции. На карте отражены извержения в Западной Сибири (красным) и траппов в Восточной Сибири (коричневым), которые извергались 250 млн лет назад. Горячее вещество мантийного плюма поднимается и растекается под границей литосферы и астеносферы, образуя структуру в форме гриба. Это привело к масштабной магматической активности на площади около 5 млн км<sup>2</sup>. В результате воздействия плюма образовалась Западно-Сибирская рифтовая система, активность которой прекратилась примерно через 10 млн лет в среднем триасе.

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

## Локализация магматического плюма

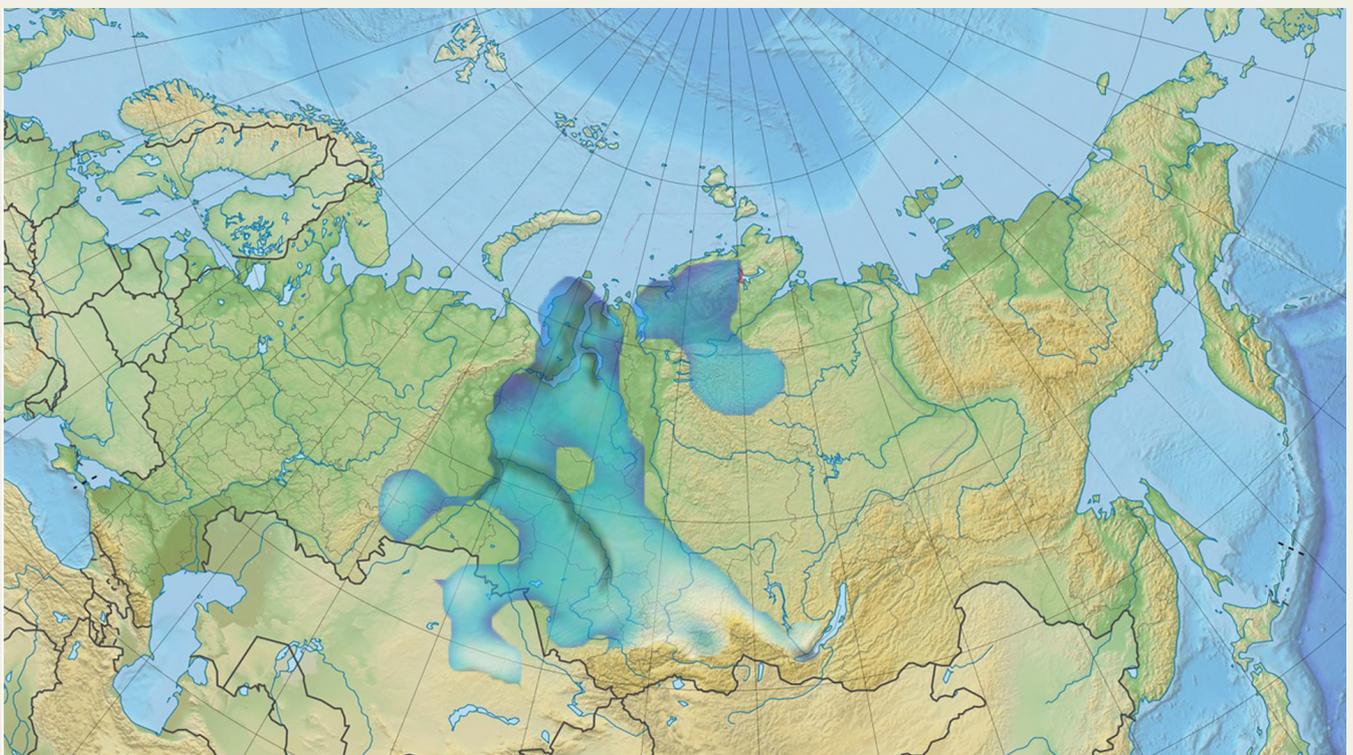
Если обобщить представленный выше анализ данных о температурных аномалиях почв, глубине оттаивания вечной мерзлоты, приповерхностных температурах, аномалиях пониженных сейсмических скоростей

в мантии и магнитной аномалии, то это позволит определить текущее положение и размеры плюма (рис. 43).



**Рис. 43**

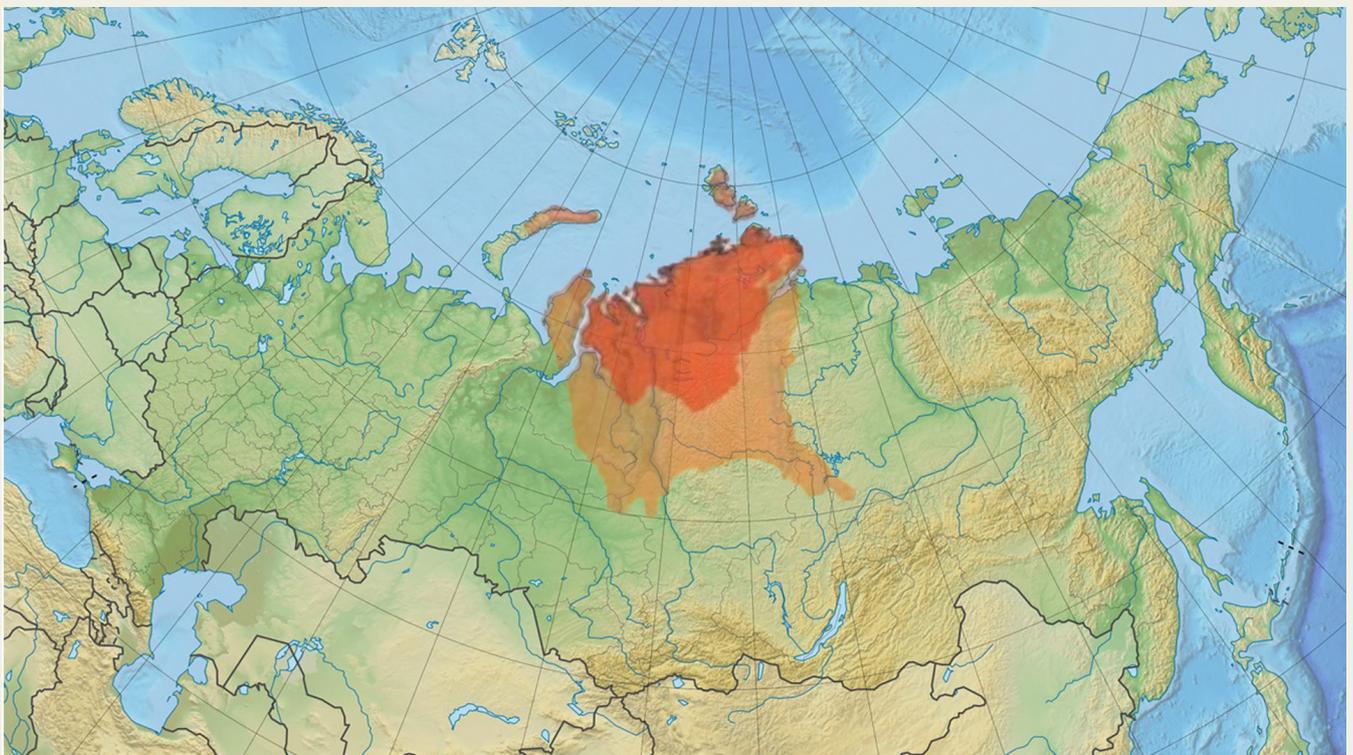
**А. Карта с наложением основных аномалий по разным параметрам, которые приведены ниже:**



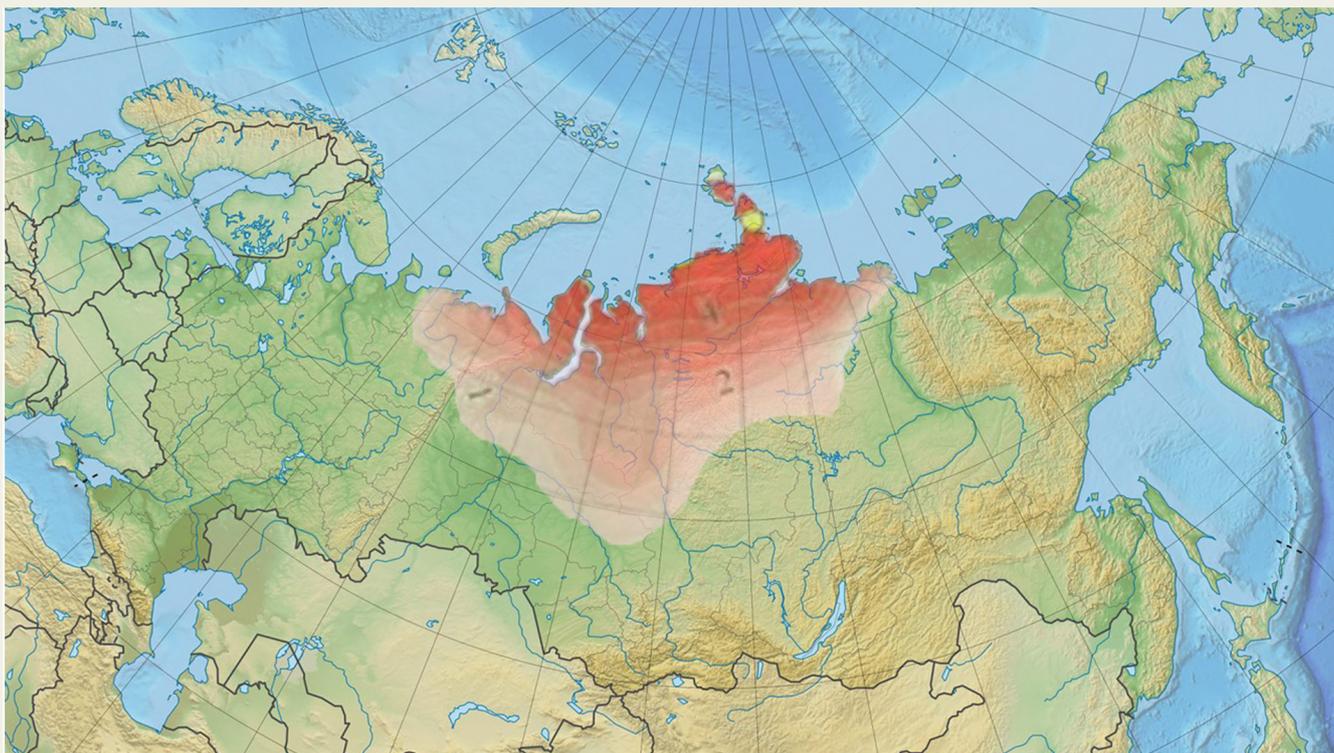
**Б. Карта аномалий с пониженными скоростями (более жидкое вещество) на глубине 110 км по сейсмотомографии, по данным Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023)**



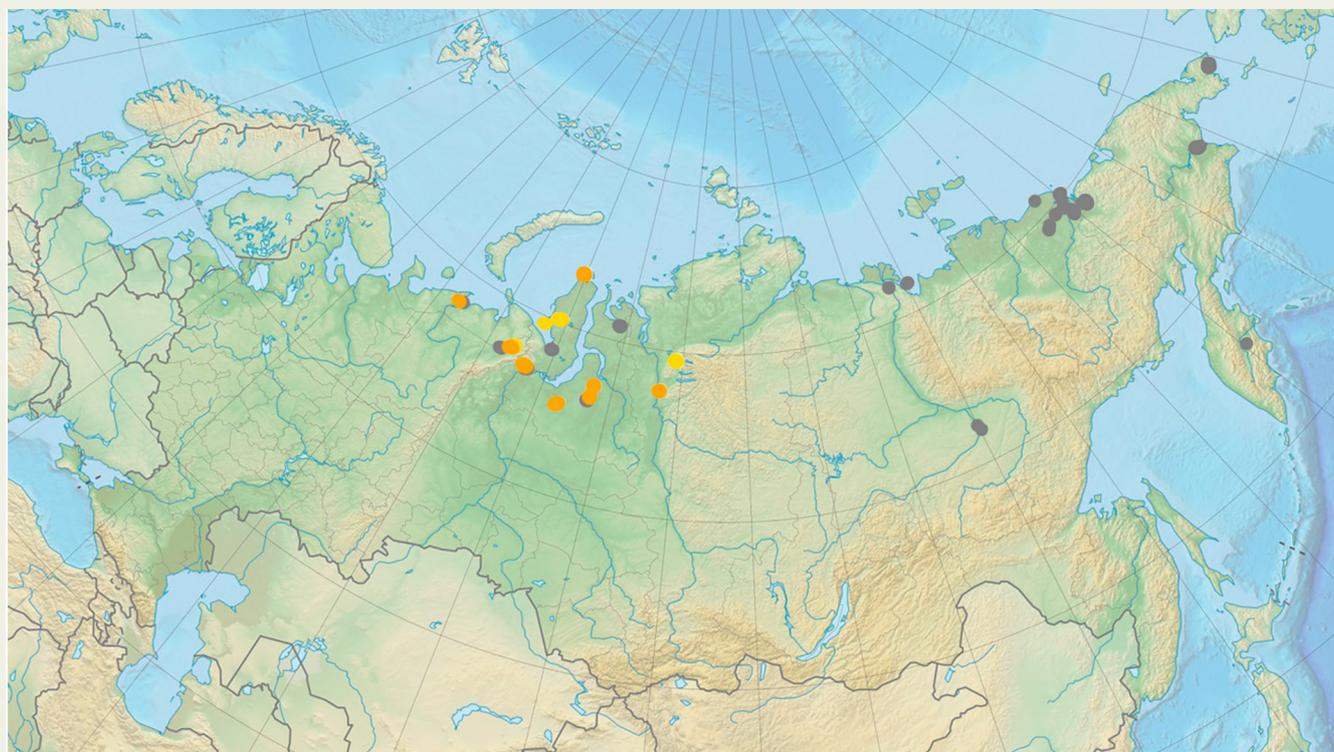
**В. Новая аномалия нагрева почвы при сравнении трендов за периоды 1976–2021 и 1976–2023 гг. по данным Росгидромета, (2021, 2023)**



**Г. Тренд среднемесячной температуры воздуха за январь 2001–2021 гг., по данным Шерстюкова, (2023)**



**Д. Среднесезонная температура с декабря 2023 по февраль 2024 года, по данным Росгидромета, (2024)**



**Е. Места увеличения глубины сезонного оттаивания многолетнемёрзлого слоя.**

Источник данных: <https://permafrost.su/>

Согласно гипотезе, восходящая часть плюма находится южнее полуостровов Гыдан и Таймыр и имеет несколько ветвей. Диаметр головы плюма оценивается в 1 200–1 500 км, а зона растекания магматических потоков может достигать 2 500–3 000 км. Эта область охватывает тектонические структуры Западно-Сибирской плиты и Восточно-Сибирского кратона. В настоящее время головная часть плюма воздействует на основание Восточно-Сибирского кратона, распространяя магматические потоки под его территорией. Этот процесс, вероятно,

влияет на повышение сейсмической активности в районе краевых частей плиты, например в зоне Байкала и даже Урала. Причиной таких аномалий именно в краевых частях плит является дестабилизация плит вследствие размягчения подстилающей астеносферы и незначительного подъёма центральной части Сибирского блока земной коры, то есть тектонических структур Западно-Сибирской плиты и Восточно-Сибирского кратона вместе с тектонической структурой Верхояно-Чукотской складчатой системы.

## **Рост сейсмической активности как признак дестабилизации плит в результате активности Сибирского магматического плюма**

Методика анализа сейсмической активности включала скачивание и специальную обработку данных, полученных на сайте Международного сейсмологического центра (International Seismological Centre — ISC). Поскольку данные содержат различные источники из разных стран и исследовательских институтов, а также разные типы магнитуд ( $M_w$ ,  $M_s$ ,  $M_b$ ,  $M_L$ ,  $M_D$  и т. д.), то был выполнен определённый алгоритм обработки данных для выбора подходящего типа магнитуды из различных источников (см. Приложение 1). Основная идея алгоритма обработки заключалась в выборе медианного значения среди наиболее распространённых типов магнитуд для каждого из событий, так как на каждое событие различные источники передавали в базу данных ISC разные типы и значения магнитуд. Такая обработка в среднем приводит к небольшому снижению величины магнитуды относительно максимального переданного значения, но, как показал опыт, медианный алгоритм даёт адекватное

поведение Закона Гутенберга — Рихтера и других закономерностей и достаточно хорошо согласуется с данными других сейсмологических баз, таких как IRIS и USGS.

Полученные в результате алгоритма данные были отфильтрованы по типам событий в базе ISC (см. Приложении 1), чтобы исключить события, вызванные человеческой деятельностью в ходе горнодобывающих работ: взрывы, возможные взрывы, горные удары и т. д. Также, поскольку на территории России находится много горнодобывающих предприятий, база данных ISC была сопоставлена с данными Единой геофизической службы РАН<sup>44</sup> на январь 2025 года, в которой указаны все известные взрывы и горные удары на территории России. Данные события также были исключены, чтобы гарантировать, что в полученных данных не осталось событий, соответствующих взрывам.

<sup>44</sup>Федеральный исследовательский центр Единая геофизическая служба Российской академии наук <http://www.ceme.gsras.ru/zr/contents.html>

Рассмотрим результаты анализа данных в регионе подъёма магматического плюма и краевых частях крупных тектонических блоков, на который он оказывает непосредственное влияние. Так как Сибирский кратон считается относительно стабильной асейсмичной платформой, то появление даже небольшого количества землетрясений в его пределах будет являться аномалией.

На рис. 44 показана плотность распределения землетрясений на территории России. В районе Сибири наибольшее скопление землетрясений закономерно наблюдается в складчатых областях: Верхоянского кряжа на востоке, по хребту Гаккеля на севере, Уральских гор на западе, в Алтай-Саянском регионе на юге. Единичные события присутствуют и на территории

самой Сибири: несколько землетрясений магнитудой около 4,0 зафиксированы южнее полуострова Таймыр. Рассмотрим подробнее динамику землетрясений на локальных участках в области Сибирского плюма и сопредельных регионов.

По геологическим структурам выделены области, где мантийный плюм может оказывать разное влияние (рис. 45). Была выбрана область самого плюма, где воздействие может быть связано с проникновением и давлением магмы и флюидной фазы (магматических газов). В краевых частях Восточно-Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты более вероятно влияние плюма на сейсмичность за счёт дестабилизации положения плотных блоков земной коры.

Плотность землетрясений M3+ на территории Сибири

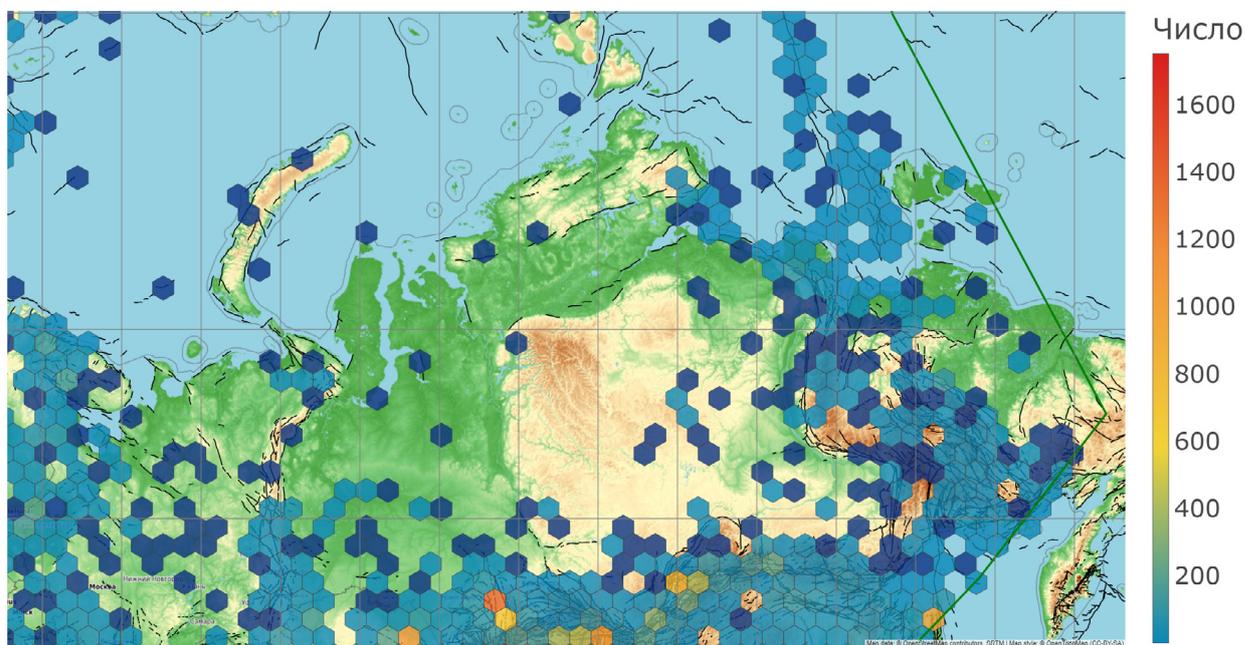
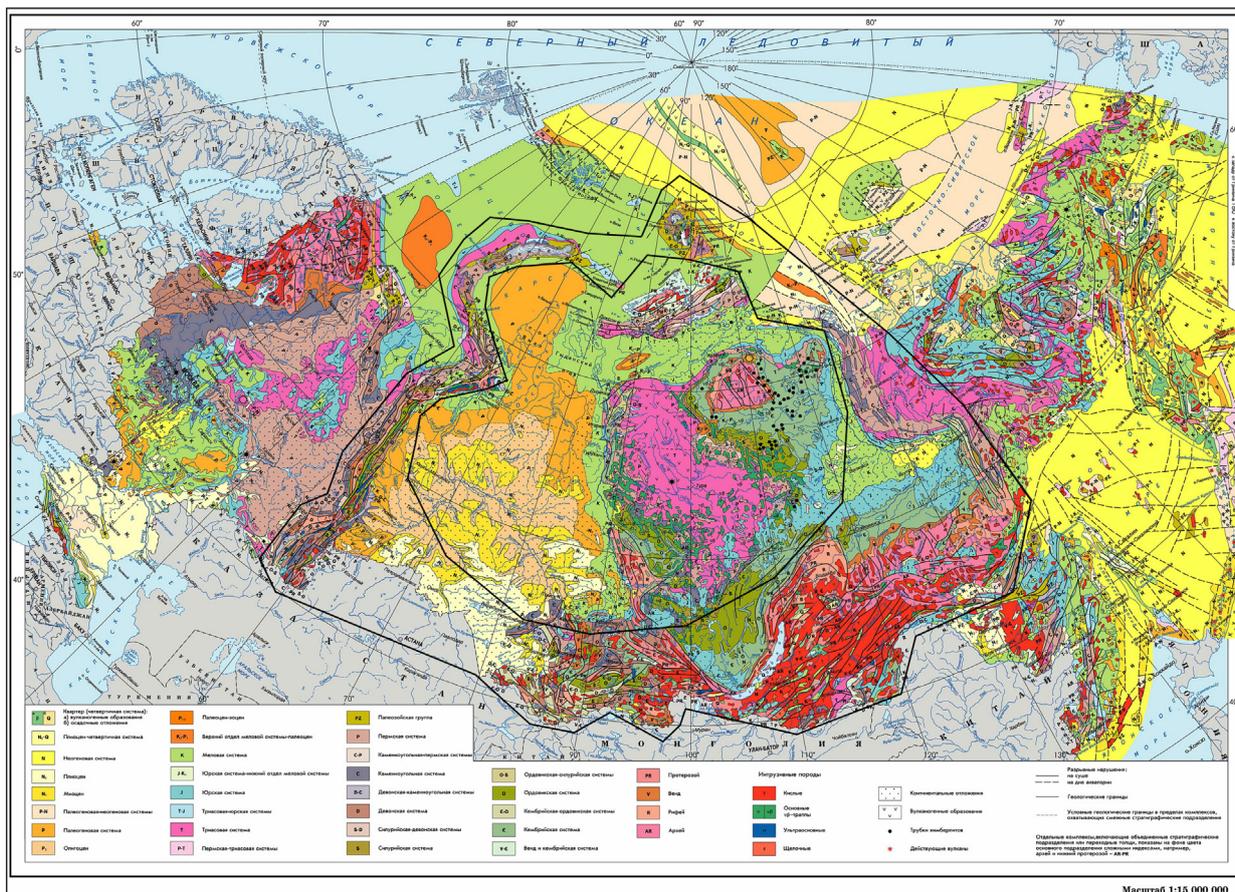


Рис. 44

Плотность землетрясений магнитудой от 3,0 на территории Сибири с 1990 по 2024 г.

База данных: ISC



**Рис. 45**

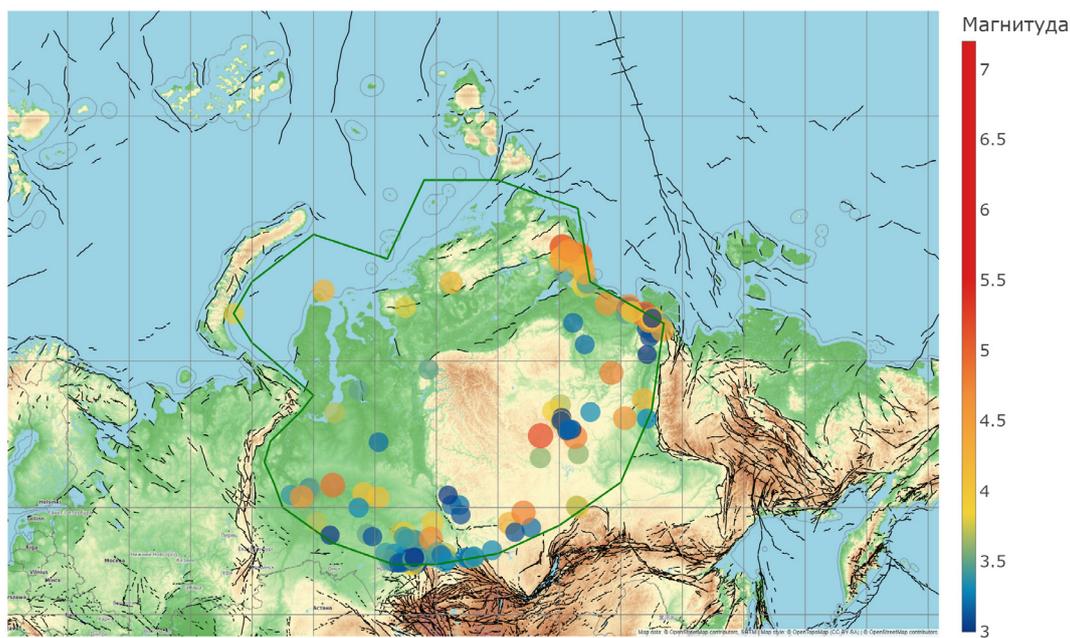
**Выделенный по геологическим структурам полигон в области внедрения и растекания Сибирского плюма (внутренний чёрный полигон) для анализа сейсмичности. Внешний чёрный полигон соответствует области краевых эффектов от давления Сибирского плюма на плиты.**

Итак, рассмотрим землетрясения в центральной области Сибирского плюма. На рис. 46 представлена карта расположения землетрясений магнитудой от 3,0 и выше. Землетрясения регистрируются на юге полуострова Таймыр. Особо настораживает, что недавно, в августе и сентябре 2024 года, в этом регионе произошли два землетрясения магнитудой 3,5 и 3,8 соответственно. Землетрясения с аналогичными магнитудами зафиксированы в южной части полуострова Гыдан (M 3,5) и на полуострове Ямал (M 3,7 и M 4,2) на глубине 10 км. Эти землетрясения

были зафиксированы в зоне локализации головы Сибирского плюма, что является тревожной тенденцией, о которой будет рассказано далее.

В выделенной области Сибирского плюма с 1990 по 2024 год в общей сложности зафиксировано 205 землетрясений магнитудой от 3,0. В 1995 году наблюдалось увеличение количества землетрясений (рис. 47), что согласуется с общепланетарной тенденцией роста сейсмичности в 1995 году, связанной с магматической активизацией.

### Землетрясения М3+ в области Сибирского плюма

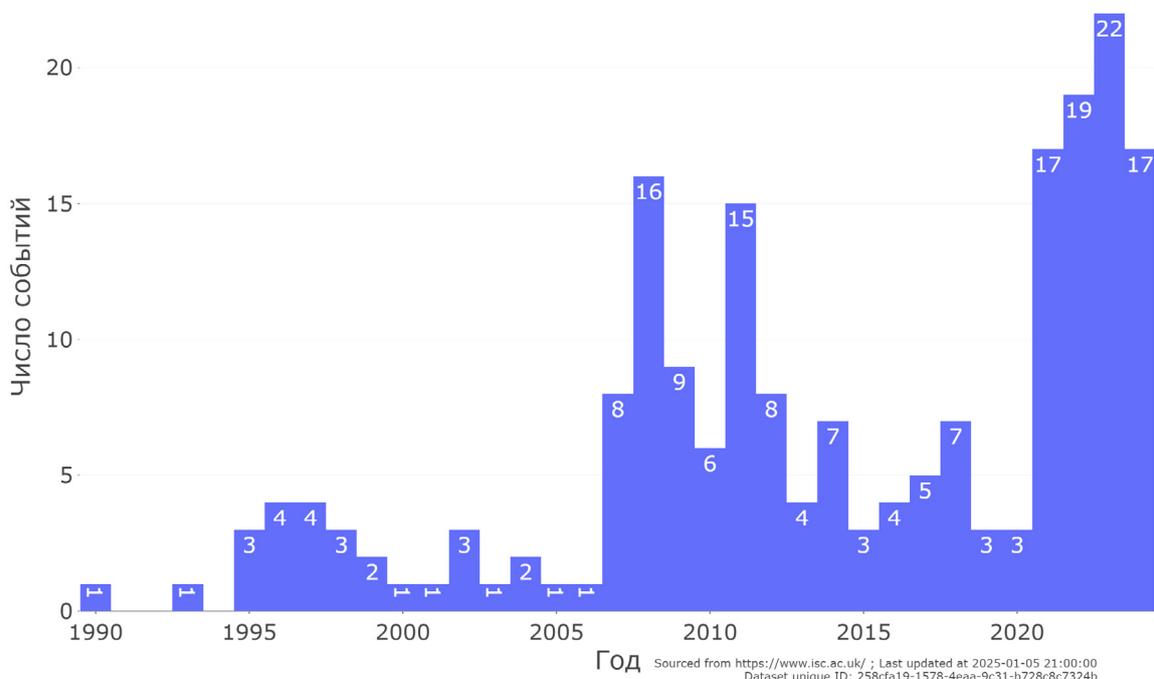


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/>; Last updated at 2025-01-05 21:00:00  
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

**Рис.46**

Карта землетрясений магнитудой от 3,0 и выше в области Сибирского плюма с 1990 по 2024 г.  
База данных: ISC.

### Землетрясения М3+ в области Сибирского плюма



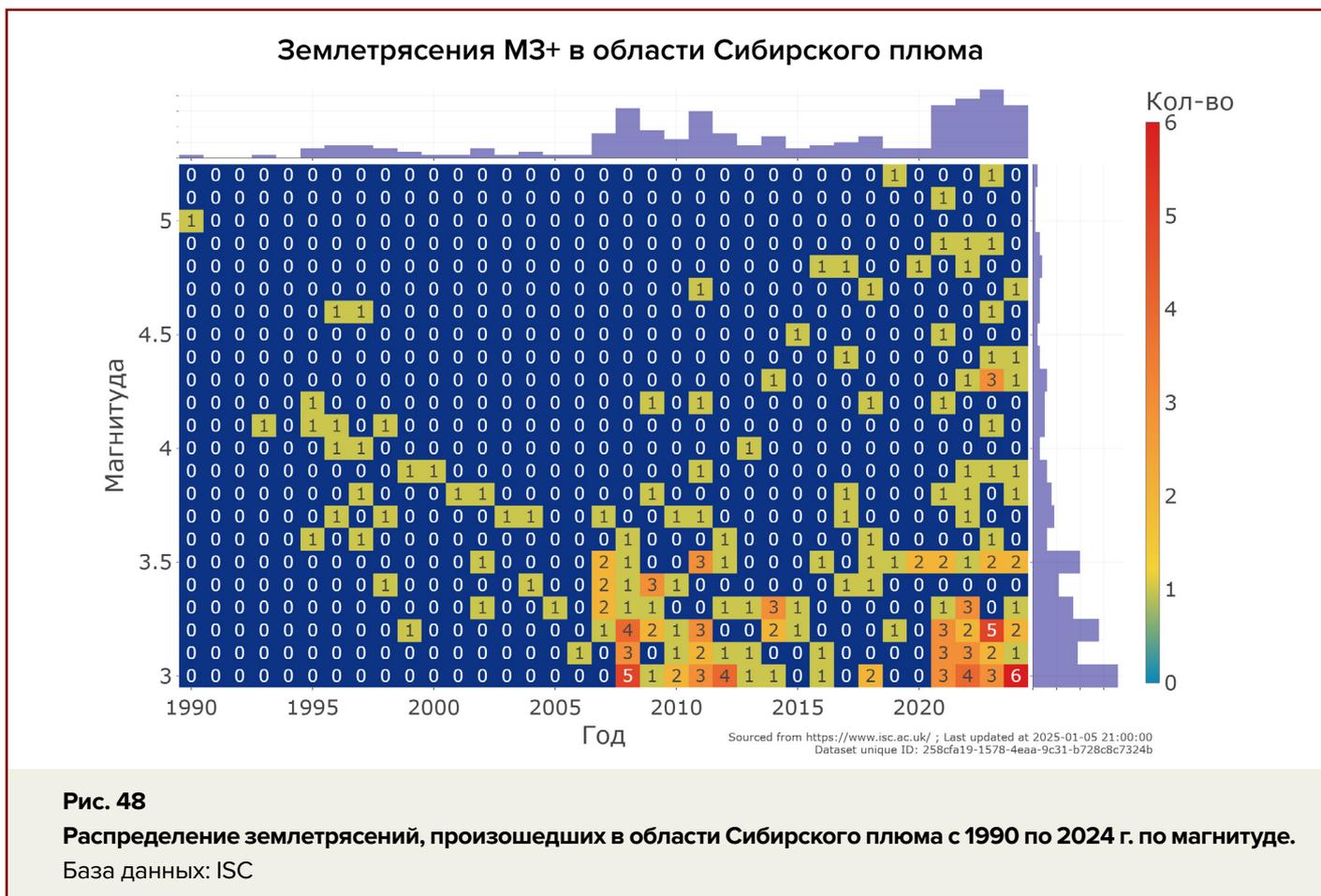
**Рис. 47**

Количество землетрясений магнитудой от 3,0 и выше в области Сибирского плюма с 1990 по 2024 г.  
База данных: ISC

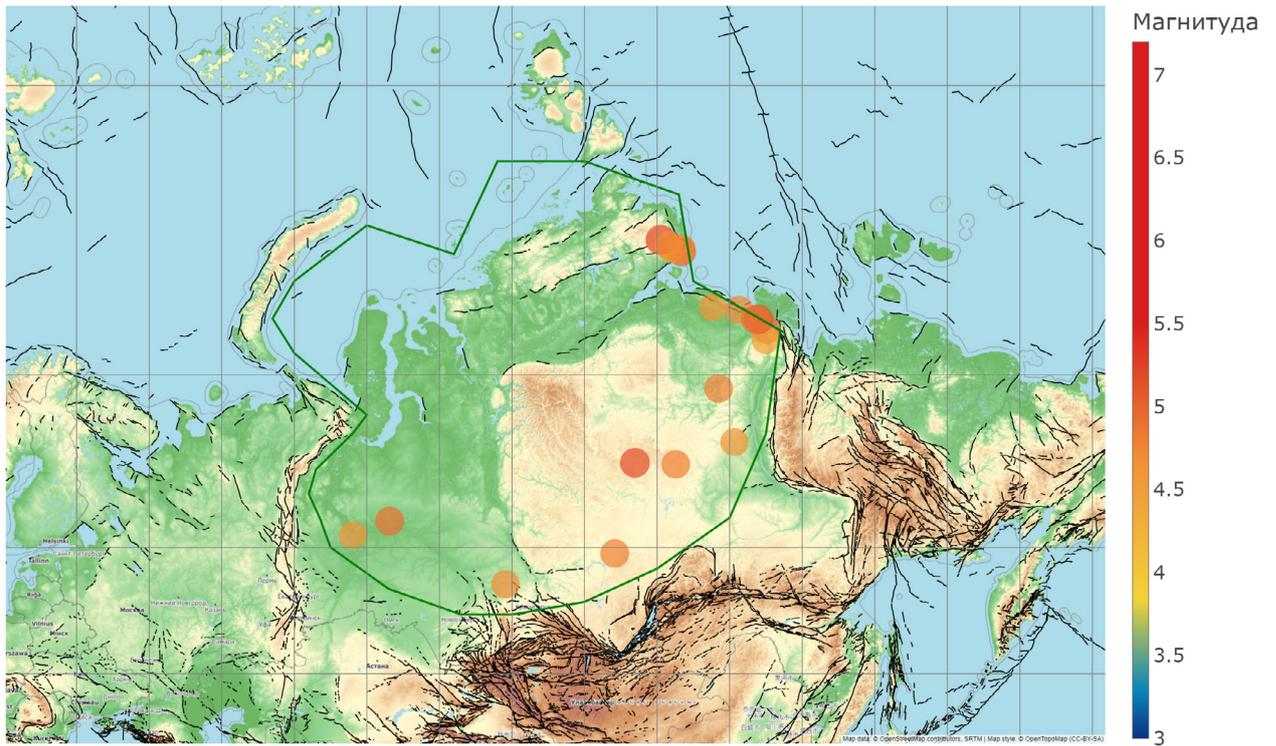
С 2007 года наблюдается значительный рост количества землетрясений с постепенным снижением сейсмоактивности. С 2021 года количество землетрясений снова резко возросло, превышая предыдущие ежегодные показатели. Таким образом, в области Сибирского плюма наблюдается волнообразное нарастание сейсмической активности. В последние годы стабильно фиксируется заметно больше событий, чем было ранее типично для этой территории.

После землетрясения магнитудой 5,0 в 1990 году наблюдалось постепенное снижение

магнитуд и количества землетрясений (рис. 48). С 1990 по 2007 год зарегистрировано всего 3 землетрясения магнитудой выше 4,5. С 2007 года наблюдается постепенный рост магнитуды землетрясений. Впервые за историю наблюдений появляются землетрясения магнитудой 5,1 и 5,2 с 2019 года. Все землетрясения магнитудой от 4,5 расположены в обрамлении плюма (рис. 49), часть из них приурочены к стабильным областям, где отсутствуют известные разломы.



## Землетрясения M4,5+ в области Сибирского плюма



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

**Рис. 49**

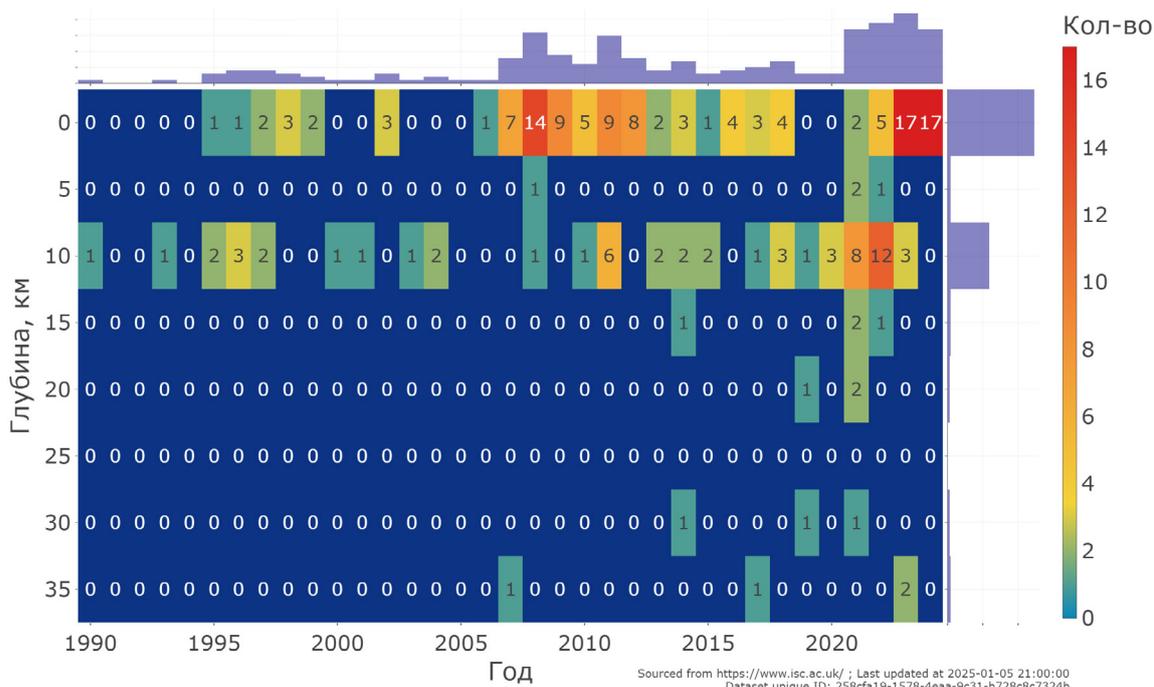
**Карта землетрясений магнитудой от 4,5 и выше в области Сибирского плюма с 1990 по 2024 г.**  
База данных: ISC

Также в 2007 году было впервые зарегистрировано землетрясение магнитудой 3,7 на глубине 33 км вблизи границы Мохо (рис. 50). После 2014 года землетрясения в районе подошвы земной коры на глубине 30–35 км стали происходить значительно чаще, при этом их магнитуда доходила до 5,0. Все они были расположены по периферии предполагаемого очага плюма.

Приведённый анализ землетрясений в области предполагаемого нахождения Сибирского плюма демонстрирует

волнообразное увеличение сейсмичности: растёт количество землетрясений, происходит увеличение их магнитуд, появились землетрясения на больших глубинах. Это свидетельствует о процессах деформации плиты под воздействием колоссального давления магмы снизу. Прогрессирование этих процессов неизбежно в ближайшем будущем приведёт к извержению Сибирского плюма по следующим причинам.

### Землетрясения М3+ в области Сибирского плюма



**Рис. 50**

**Распределение землетрясений магнитудой от 3,0 и выше, произошедших с 1990 по 2024 г. в области Сибирского плюма, по глубине. База данных: ISC**

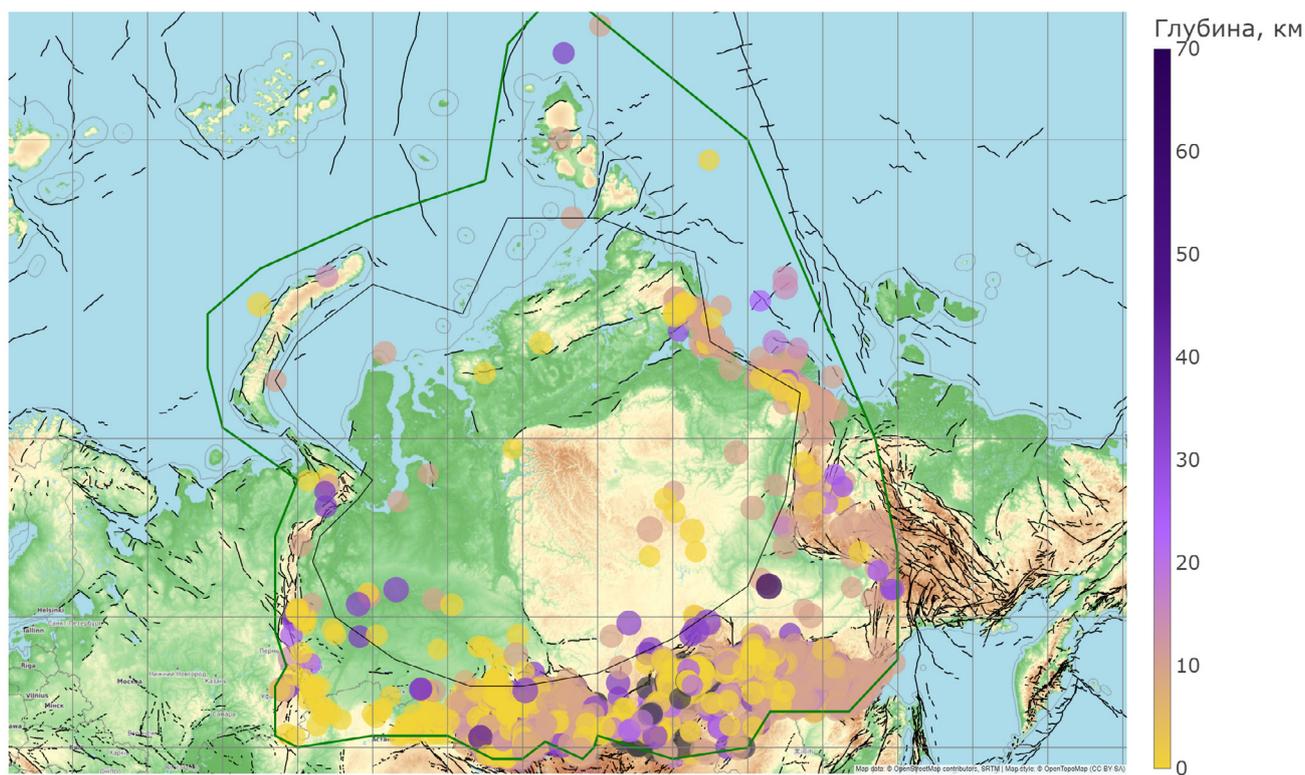
Фундамент Восточно-Сибирского кратона сцементирован магматическими и метаморфическими породами, которые создают плотную монолитную корку, сформировавшуюся в результате извержений, произошедших 250 млн лет назад. Появление в этом регионе сильных землетрясений магнитудой 7,0 и выше будет означать, что платформенные структуры Сибирского кратона испытывают деформации, которые превышают предел прочности горных пород. Для понимания того, как монолитный Сибирский кратон может разорваться под действием давления плюма, можно привести пример, как трескается стекло за мгновение до того, как оно полностью разлетится на осколки.

На данный момент для понимания реальной ситуации продвижения плюма и состояния прочности земной коры в области

магматического Сибирского плюма крайне необходима установка дополнительных сейсмодатчиков, предпочтительно в скважинах на глубине нескольких километров. Это позволит провести детальный сейсмотомографический анализ земной коры и мантии и вести постоянный мониторинг положения плюма и его активности (см. раздел «Сценарий 3. Плановая контролируемая дегазация»).

Следует обратить внимание на распределение землетрясений по глубине в области Сибирского плюма и его краевых зон (рис. 51). Землетрясения на глубинах вблизи границы Мохо (более 30 км) и в самой мантии происходят в основном в районах складчатых областей, при этом можно заметить, что они обрамляют область предполагаемого нахождения Сибирского плюма.

## Землетрясения М3,5+ в области Сибирского плюма



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

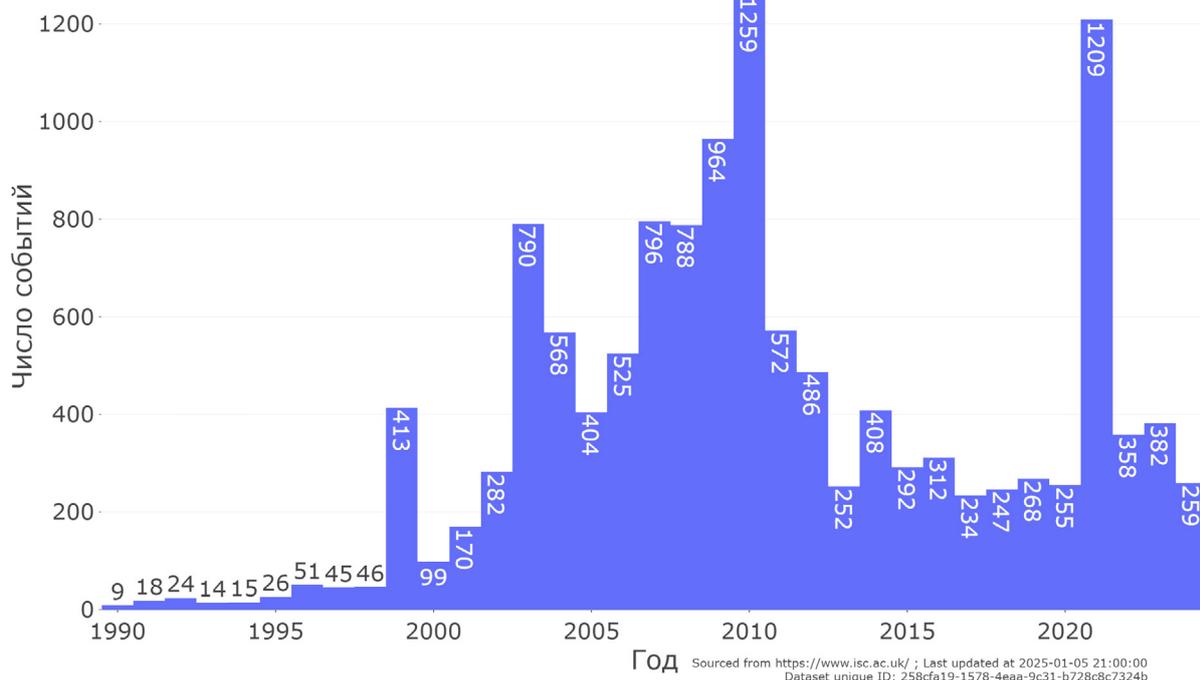
**Рис. 51**

**Карта землетрясений магнитудой от 3,5 и выше в районе Сибирского плюма с 1990 по 2024 г. Цветовая шкала соответствует величине глубины. База данных: ISC.**

Рассмотрим сейсмическую активность только в краевых частях Сибирского плюма. Геологически эти области относятся к складчатым поясам, сейсмически активным регионам, сейсмичность в которых может быть обусловлена как тектоническими подвижками, так и влиянием магматического плюма. График количества землетрясений демонстрирует смешанную картину наложения разных факторов сейсмичности (рис. 52). В какие-то годы видны существенные всплески сейсмической активности. Для более точного понимания природы этих процессов требуется рассмотрение каждого региона в отдельности.

Рассматривая зону Верхоянских складчатых структур и разломов на дне моря Лаптевых (рис. 53), видим что сильные всплески землетрясений магнитудой от 3,0 произошли в 2013 и в 2021–2022 годах (рис. 54). Такие всплески характерны для этапов внедрения магмы, которые вызывают значительные нарушения сплошности земной коры и выход флюидной фазы через трещины пород и близлежащие разломы. Такие проявления так же сопровождаются увеличением количества землетрясений мелких магнитуд и возникновением роёв землетрясений, а порой даже серий роёв.

### Землетрясения М3+ в краевых частях Сибирского плюма

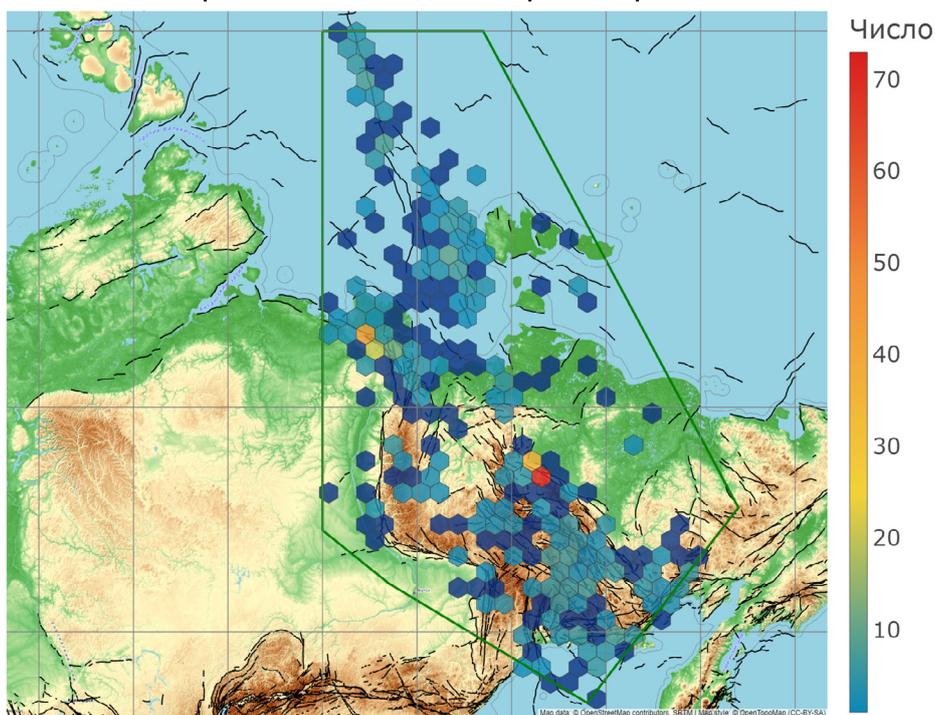


**Рис. 52**

**Количество землетрясений магнитудой от 3,0 и выше в краевых частях Сибирского плюма с 1990 по 2024 г. Были исключены землетрясения внутри полигона (рис. 47).**

База данных: ISC

### Плотность землетрясений М3+ в Северо-Восточной части Сибирского кратона

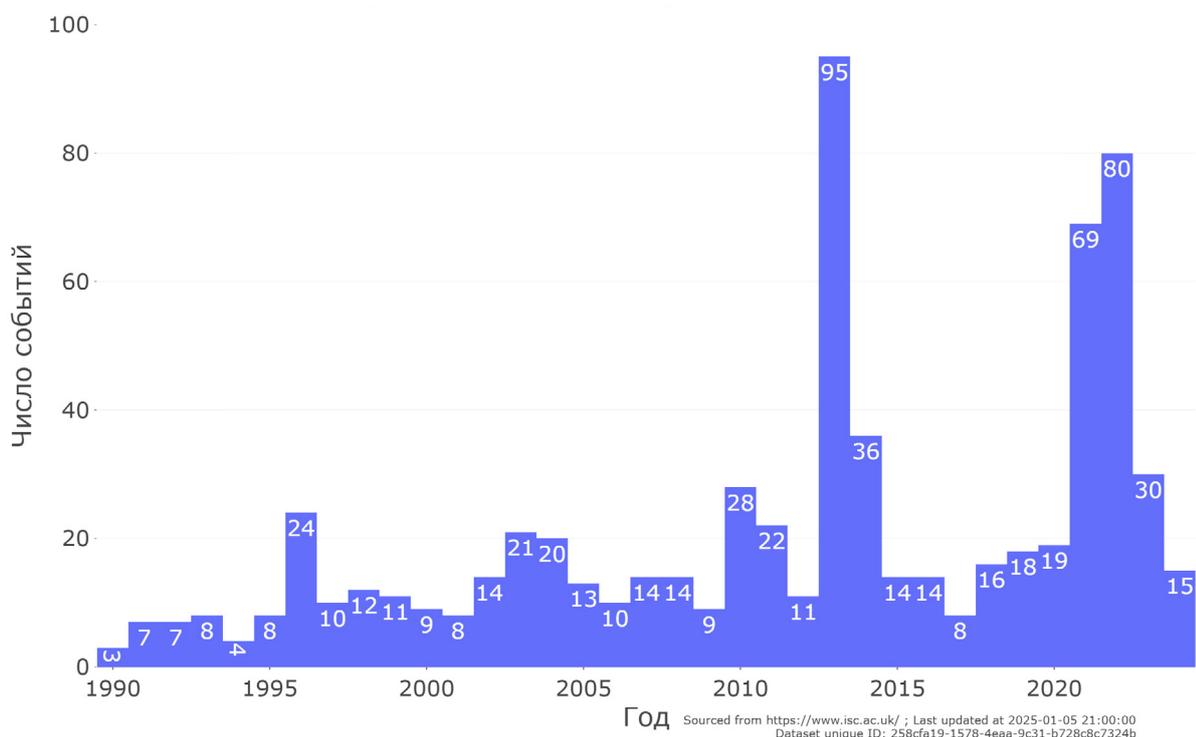


**Рис. 53**

**Плотность землетрясений магнитудой от 3,0 на выбранном участке северо-восточного края Сибирского блока земной коры с 1990 по 2024 г. Чёрным обозначены линии разломов.**

База данных: ISC

### Плотность землетрясений М3+ в Северо-Восточной части Сибирского кратона



**Рис. 54**

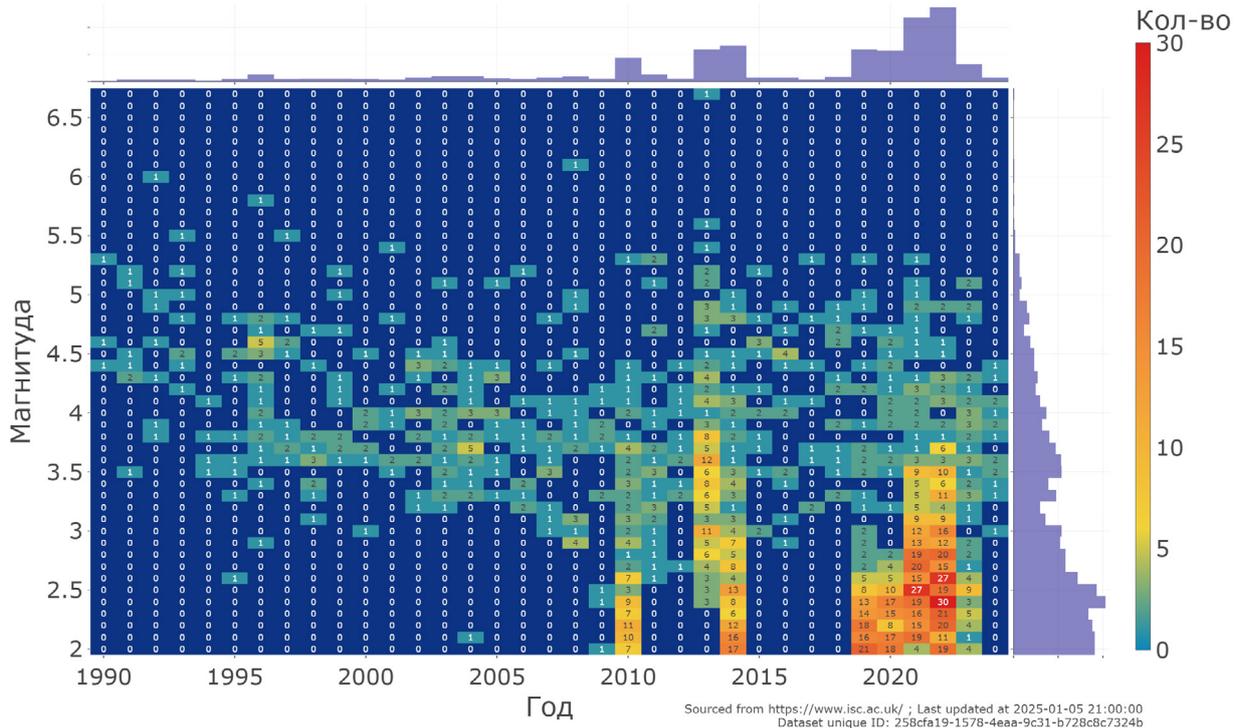
**График количества землетрясений магнитудой 3,0 и выше на выбранном участке северо-восточного края Сибирского блока с 1990 по 2024 г.**

База данных: ISC

Исследование магнитуд землетрясений в этой зоне показывает всплеск количества землетрясений магнитудой от 2,0 до 3,5 в 2010, 2013–2014 гг. и значительное увеличение их количества с 2019 года (рис. 55). С 2019 года также значительно увеличивается количество землетрясений, которые затрагивают земную кору

практически до основания, до глубины 35 км (рис. 56). В 2013 году впервые в этом регионе появляется землетрясение магнитудой 6,7, что явно свидетельствует о длительном этапе накопления напряжения или о разгрузке накопленных магматических флюидов.

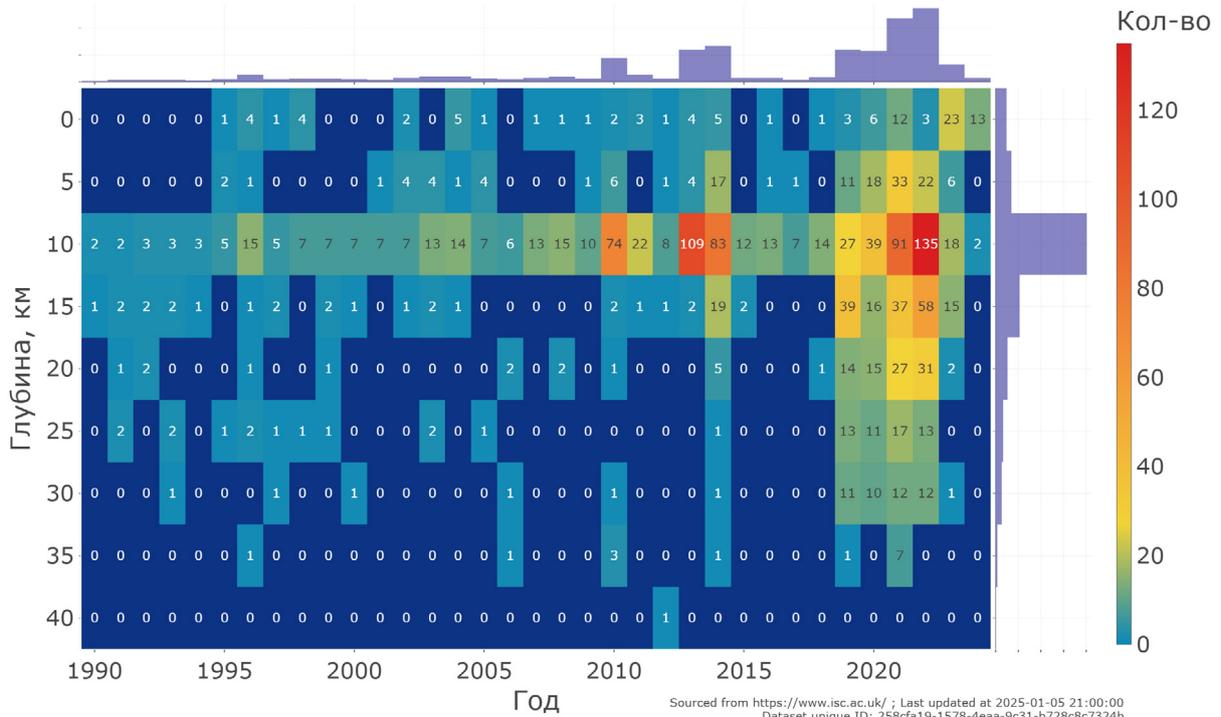
### Плотность землетрясений M3+ в Северо-Восточной части Сибирского кртона



**Рис.55**

Распределение количества землетрясений по магнитуде на выбранном участке северо-восточного края Сибирского блока с 1990 по 2024 г. База данных: ISC

### Плотность землетрясений M3+ в Северо-Восточной части Сибирского кртона



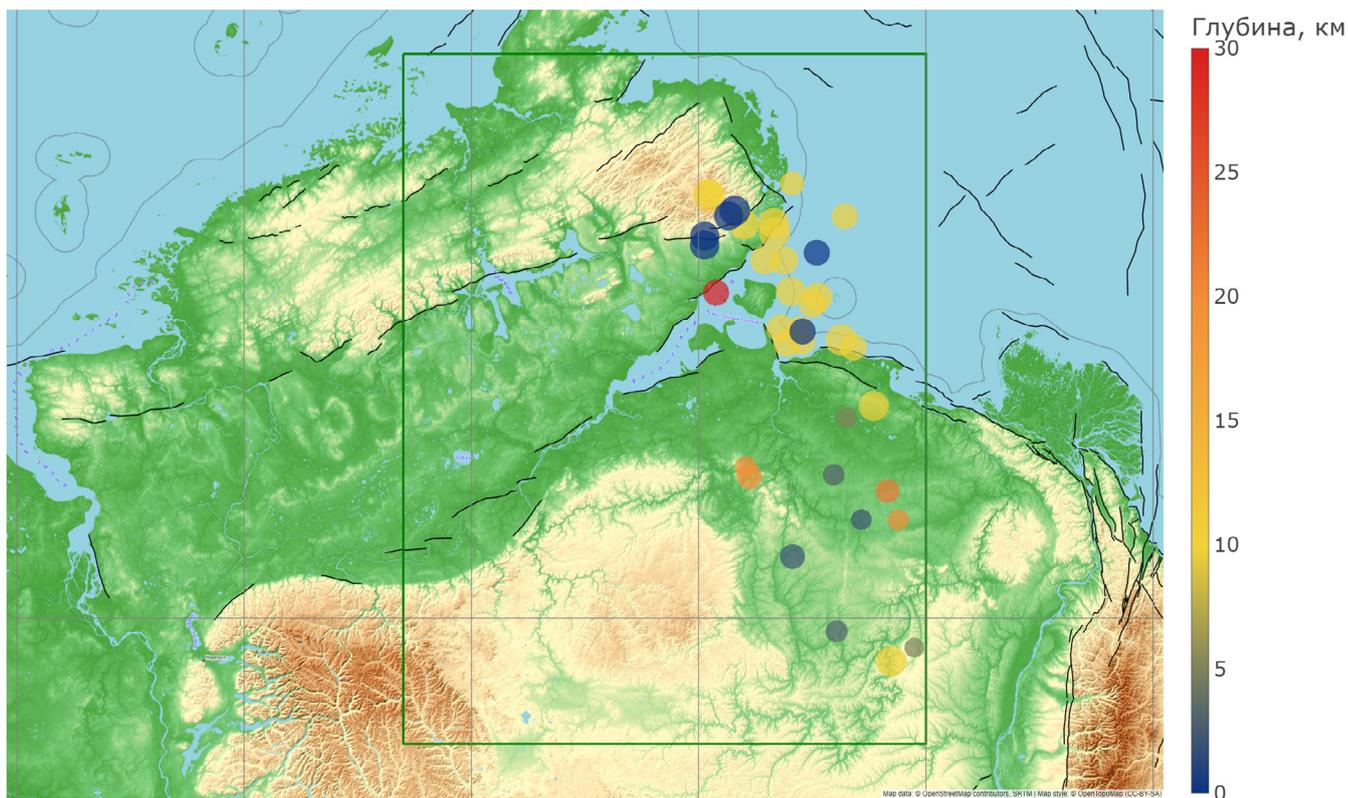
**Рис. 56**

Распределение количества землетрясений магнитудой 2,0 и выше по глубине на выбранном участке северо-восточного края Сибирского блока с 1990 по 2024 г. База данных: ISC

Отдельно рассмотрим группу землетрясений в юго-восточном направлении от полуострова Таймыр (рис. 57).

В 2019–2020 годах здесь также наблюдался всплеск сейсмической активности малых и средних магнитуд (рис. 58, 59).

### Землетрясения M2+ на северо-восток от полуострова Таймыр

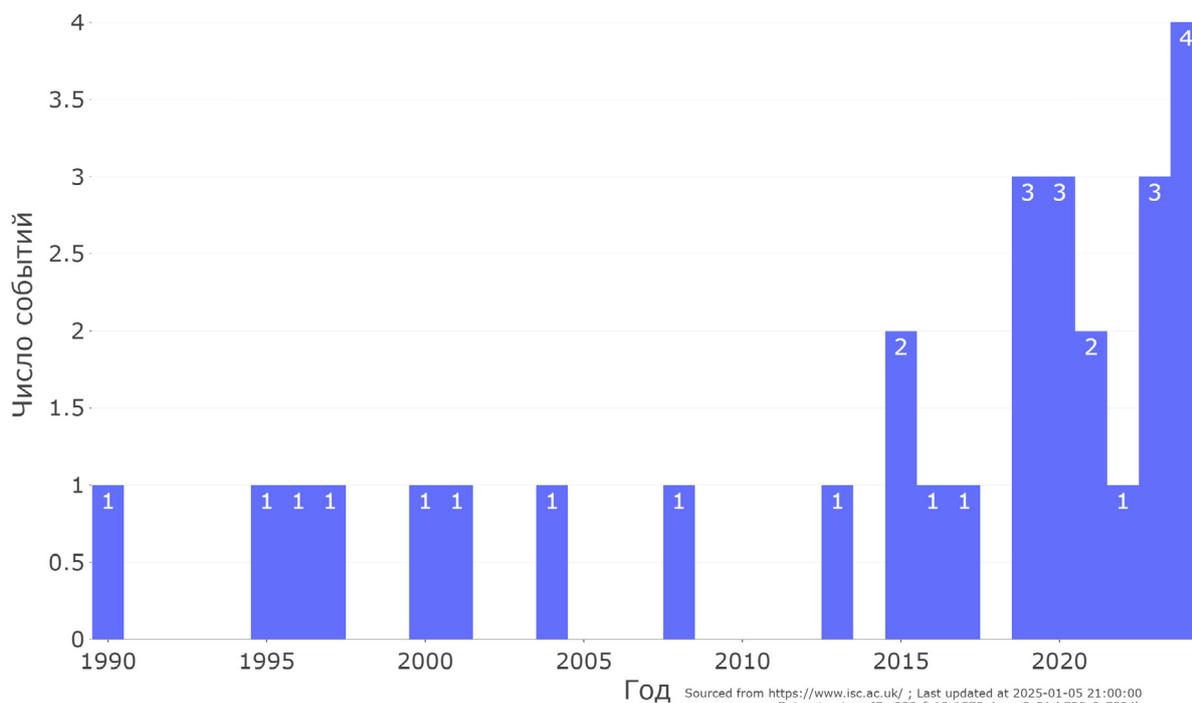


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00  
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

**Рис. 57**

**Карта распространения землетрясений магнитудой от 2,0 на выбранном участке, на северо-востоке от полуострова Таймыр, с 1990 по 2024 г. База данных: ISC**

### Землетрясения M3+ на северо-восток от полуострова Таймыр

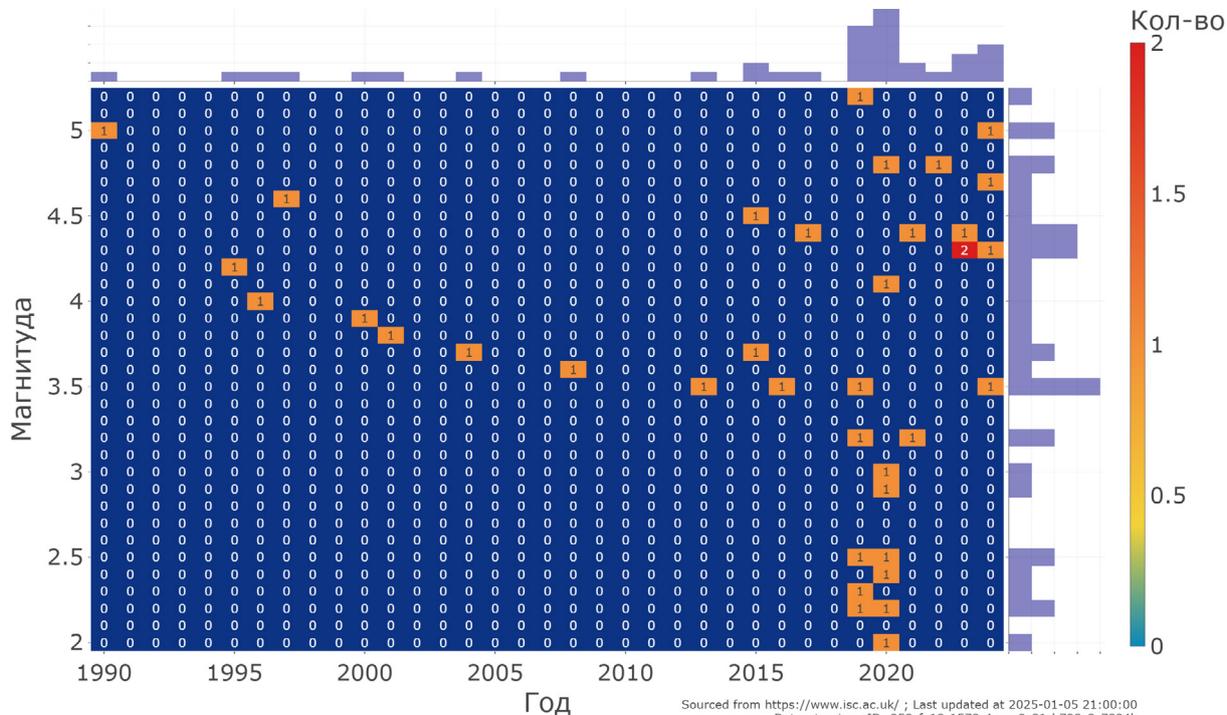


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/>; Last updated at 2025-01-05 21:00:00  
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

Рис. 58

График количества землетрясений магнитудой 3,0 и выше на выбранном участке, на северо-востоке от полуострова Таймыр. База данных: ISC

### Землетрясения M2+ на северо-восток от полуострова Таймыр



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

Рис. 59

Распределение количества землетрясений по магнитуде на выбранном участке, на северо-востоке от полуострова Таймыр, с 1990 по 2024 гг. База данных: ISC

Также в 2019–2020 гг. наблюдается увеличение глубины появления землетрясений вплоть до подошвы земной коры (рис. 60) в те же временные периоды, что и в районе Верхоянской складчатой структуры.

Следует подчеркнуть, что эта зона находится в области влияния головы

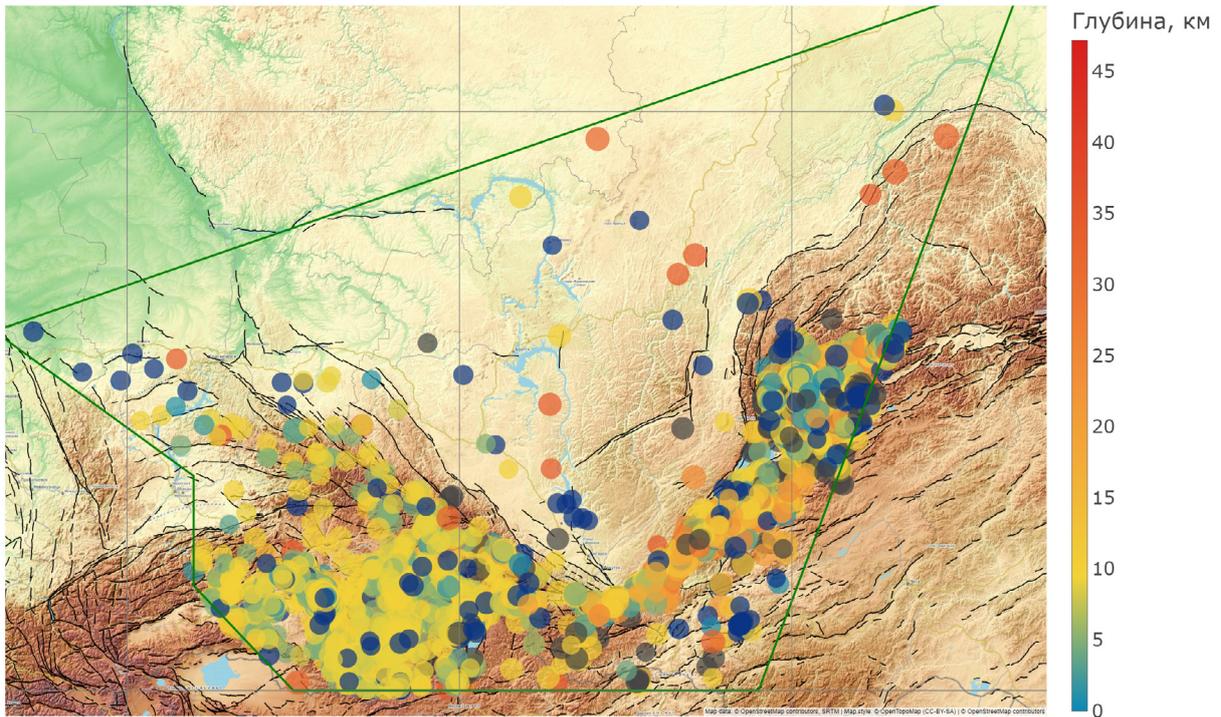
Сибирского плюма, и несмотря на малое количество землетрясений, в ней наблюдается аналогичная тенденция на увеличение глубины и количества землетрясений, что и в Верхоянских складчатых структурах, только начиная с 2019 года.



Южная часть рассматриваемой территории включает Алтае-Саянскую складчатость и регион Байкала (рис. 61). Это тектонически подвижный и сейсмически активный регион. Здесь наблюдается

всплеск землетрясений в 1999 и в 2021 годах (рис. 62). Магнитуда землетрясений с 2007 года начинает расти, даже достигает 6,8 в 2021 году (рис. 63).

### Землетрясения М3+ в Южной части Восточной Сибири

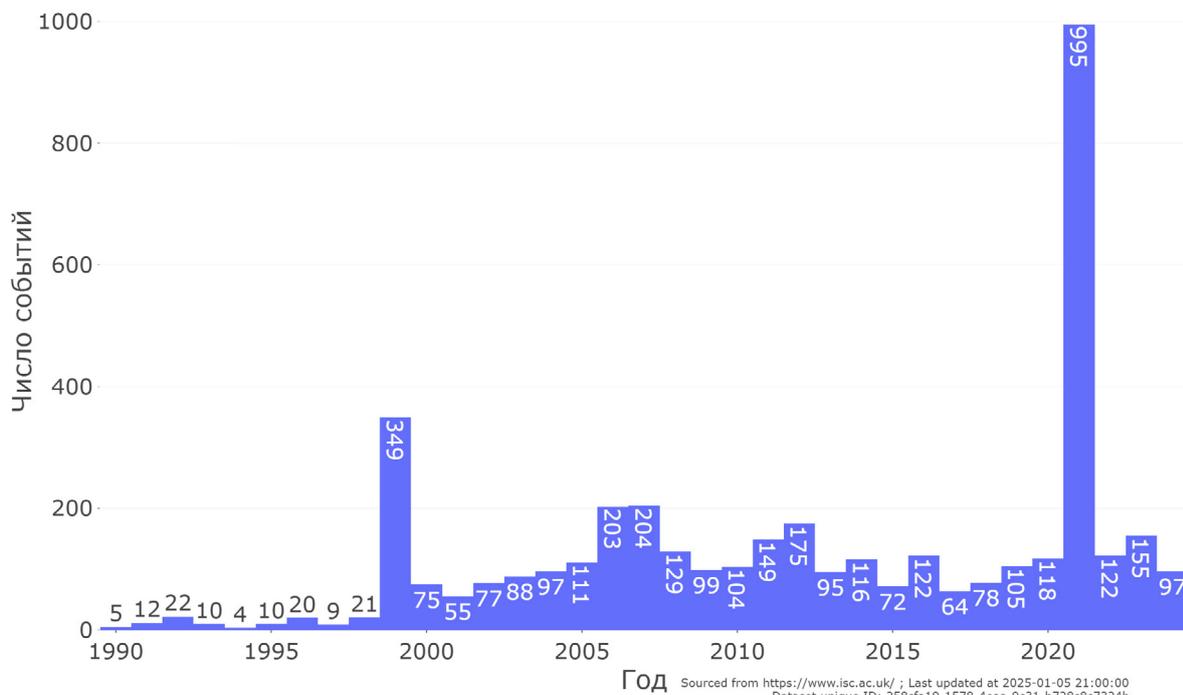


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/>; Last updated at 2025-01-05 21:00:00  
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

**Рис. 61**

Карта местоположений эпицентров землетрясений магнитудой 3,0 и выше, зафиксированных с 1990 по 2024 г. в выбранном полигоне, в южной части Восточной Сибири. База данных: ISC

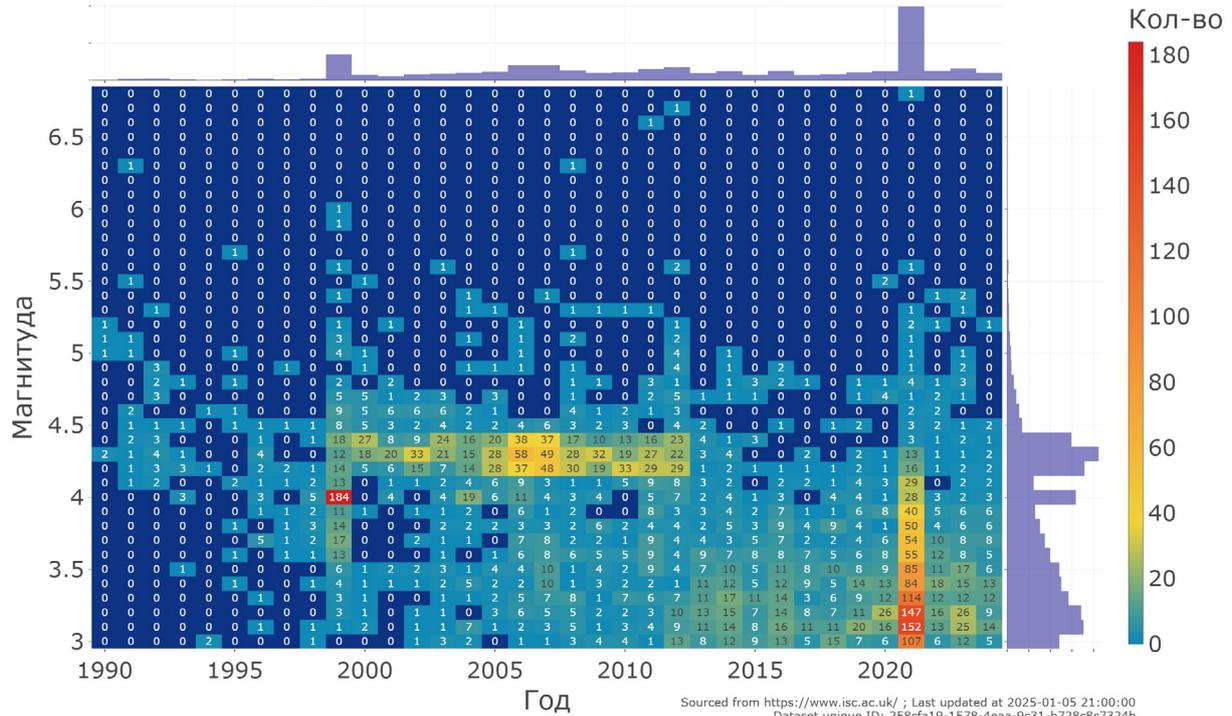
### Землетрясения М3+ в Южной части Восточной Сибири



**Рис. 62**

Количество землетрясений магнитудой от 3,0 и выше на территории южной части Восточной Сибири. База данных: ISC

## Землетрясения М3+ в Южной части Восточной Сибири



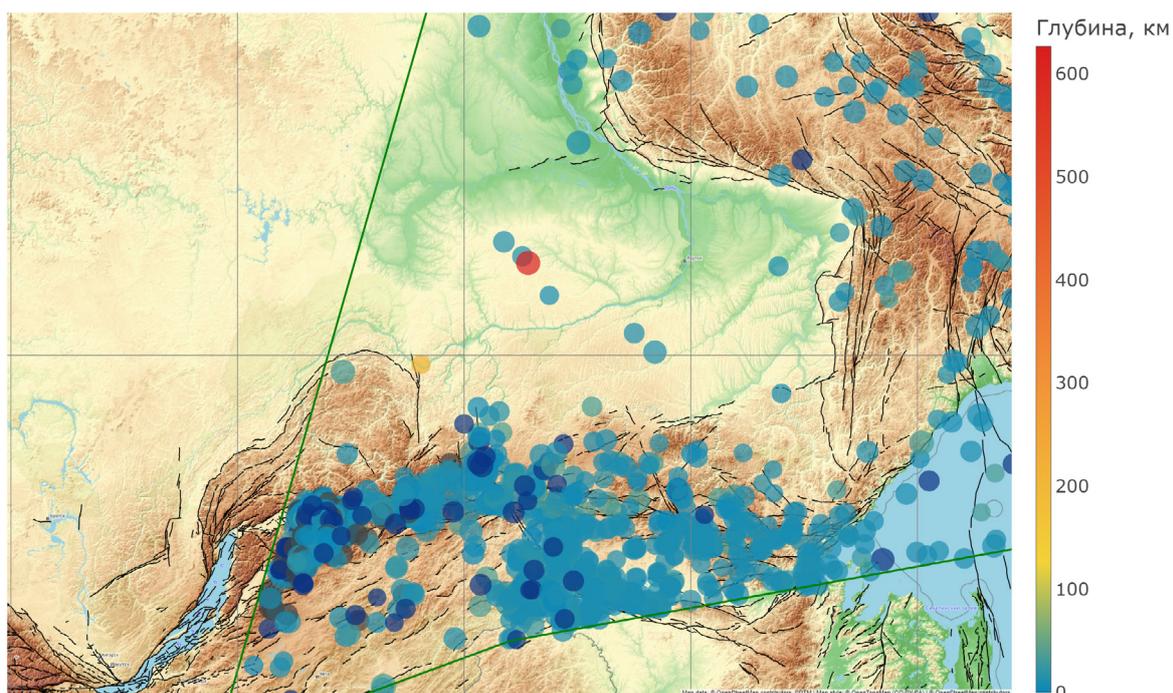
**Рис. 63**

**Распределение землетрясений в выбранном полигоне в южной части Восточной Сибири, с 1990 по 2024 г. по магнитуде. База данных: ISC**

Важно отметить появление под Сибирским кратоном мантийных землетрясений. Ещё в 1998 году было зафиксировано землетрясение магнитудой 3,3 на глубине 211 км в районе Вилюйской синеклизы. Это стало неожиданным фактом, но гораздо более уникальное событие — это землетрясение значительной магнитудой 5,1 уже на глубине 627 км в 2023 году в том же регионе (рис. 64). Само по себе проявление глубокофокусной сейсмичности под платформенным устойчивым блоком земной коры является уникальным событием. Традиционно предполагается, что такие внутримантийные землетрясения происходят по так называемым зонам субдукции, однако ближайшая такая зона находится далеко отсюда за тысячи километров и не может оказывать влияния. Авторы доклада считают, что причинами глубокофокусных землетрясений являются внутримантийные взрывы огромной мощности,

которые происходят при соприкосновении относительно более горячих потоков магмы с относительно более холодными потоками. Согласно сейсмотомографической модели, в месте возникновения обоих глубокофокусных землетрясений наблюдаются аномалии скоростей сейсмических волн, соответствующих относительно более вязким и жидким потокам, что, вероятно, отражает их температурные различия. Таким образом, эти два мантийных землетрясения проявились в местах соприкосновения относительно холодных и относительно горячих мантийных потоков (рис. 65), что вызвало выбросы большого количества энергии, породившие акустические волны, зафиксированные сейсмодатчиками как землетрясения. Это однозначно указывает на значительную активность мантийных потоков в данном районе.

## Местоположение глубинных землетрясений на территории Сибири



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

Рис. 64

На карте отмечен эпицентр глубокофокусного землетрясения магнитудой 5,1 на глубине 627 км (красный маркер) под Сибирской платформой в 2023 году и М 3,3 на глубине 211 км в 1998 году (жёлтый маркер).

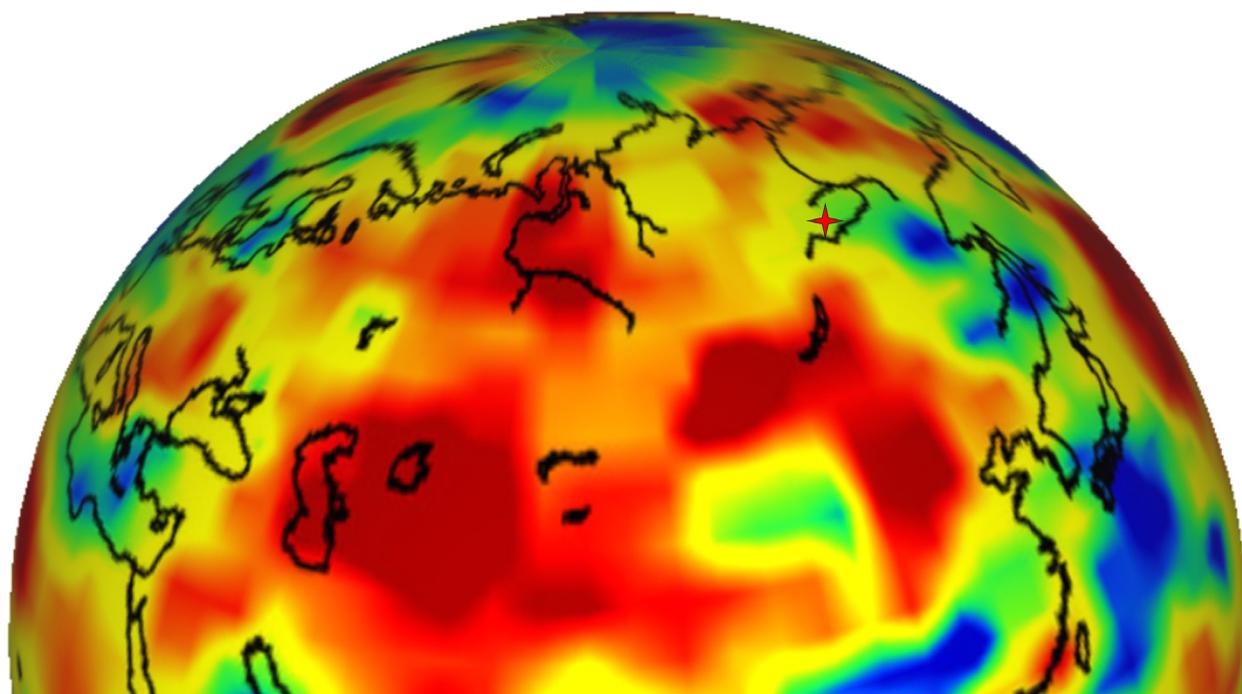


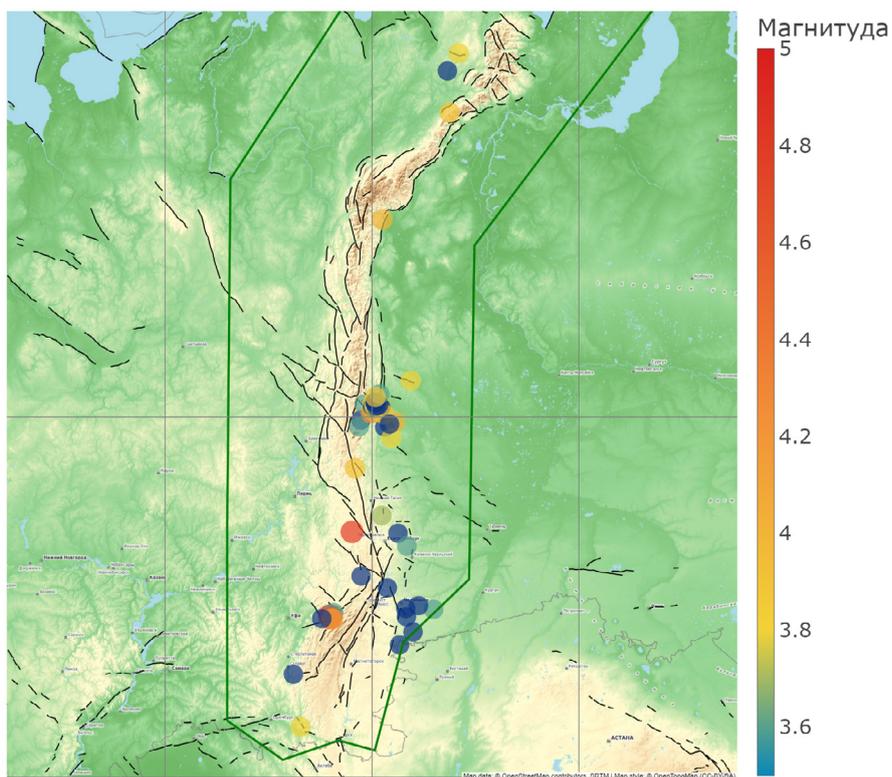
Рис. 65

Зоны пониженных скоростей прохождения сейсмических волн в мантии на глубине порядка 600 км. Гипоцентр землетрясения магнитудой 5,1 в 2023 году попадает в зону соприкосновения относительно горячих и относительно холодных областей мантии. Источник: <https://members.elsi.jp/~hiroki.ichikawa/gst/gallery/gallery.html>

Раскачивание краевых частей Сибирского блока вызывает рост сейсмической активности в Уральском регионе. Данные для анализа были отфильтрованы с учётом горных ударов, порождённых горнодобывающей деятельностью. Также

была выбрана магнитуда от 3,5, чтобы точно гарантировать исключение событий, связанных с деятельностью человека (рис. 66, 67). Следовательно, наблюдаемое волнообразное увеличение сейсмичности отражает естественные процессы.

### Землетрясения М3,5+ на Урале

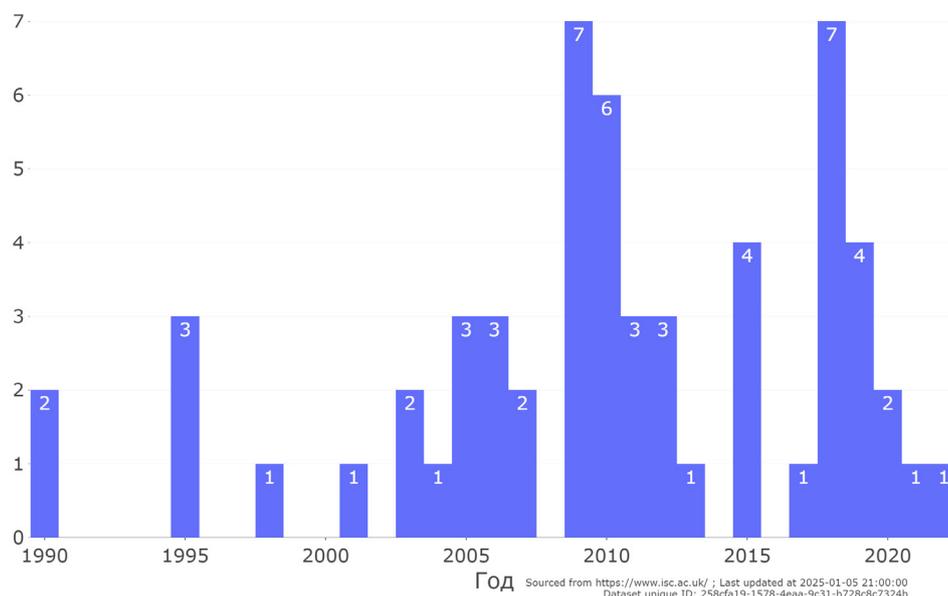


Sourced from <https://www.isc.ac.uk/> ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00  
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

**Рис. 66**  
Карта расположения эпицентров землетрясений магнитудой от 3,5 и выше, зафиксированных в Уральском регионе с 1990 по 2022 г.

### Землетрясения М3,5+ на Урале

**Рис. 67**  
Количество землетрясений магнитудой от 3,5 и выше, зафиксированных в Уральском регионе с 1990 по 2022 г.





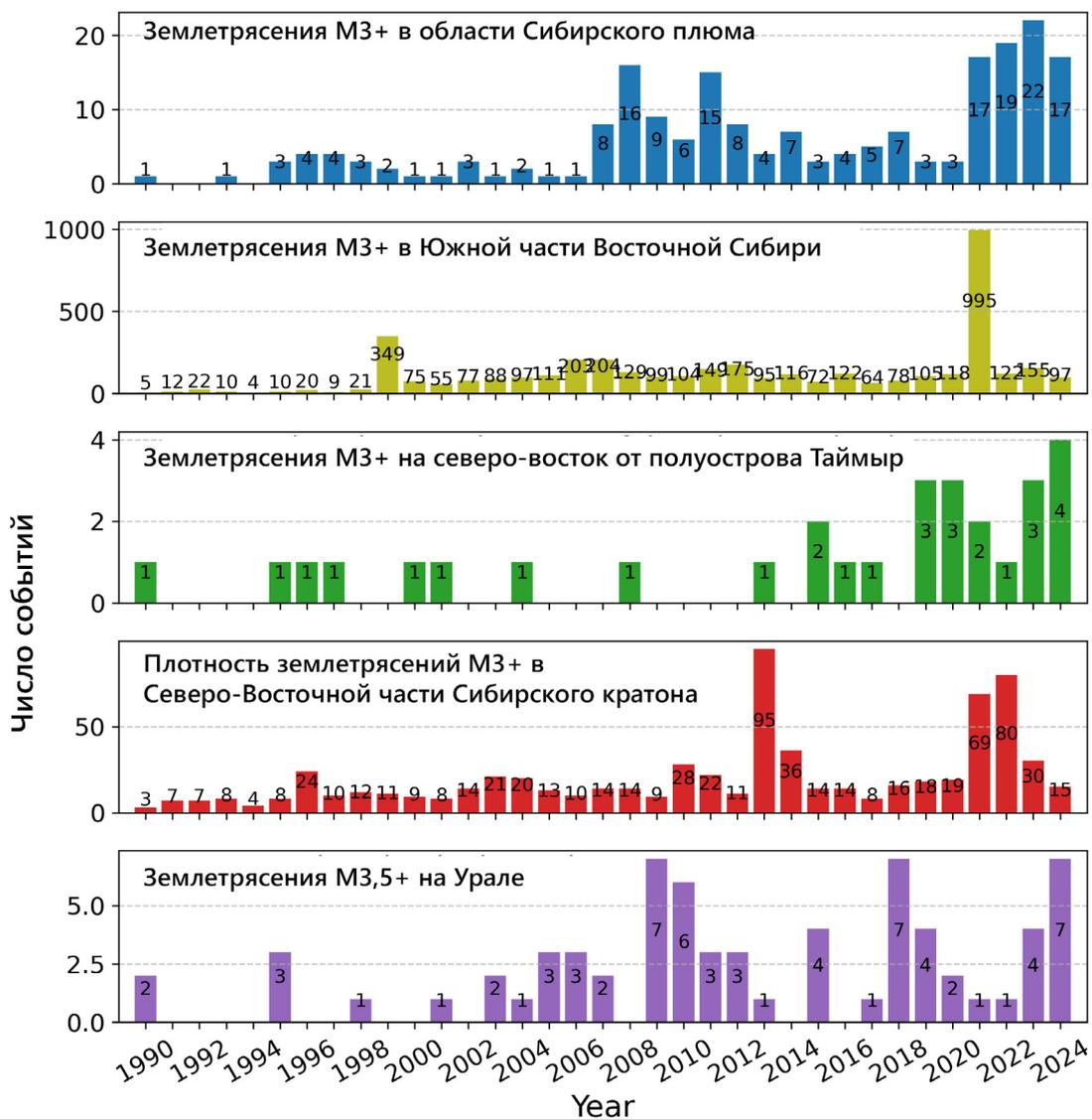


Рис. 69

Распределение пиков сейсмической активности в Верхоянском регионе (восточнее Сибирской платформы), южной части Восточной Сибири, на Урале (западнее Восточной Сибири) и в Центральной части Сибири (включая Западно-Сибирскую плиту и Восточно-Сибирскую платформу) по годам. Землетрясения магнитудой от 3,0 и выше. База данных: ISC

Рассмотрим проявление лесных пожаров в некоторых регионах. Увеличение площади пожаров в регионе маркирует рост активности недр, так как пожары зачастую возникают в местах разломов, где происходит выход горючих газов. Такие пожары являются трудно тушимыми и распространяются крайне быстро на большие территории. В Уральском регионе наблюдается резкое нарастание площади

природных пожаров, начиная с 2020 года (рис. 70). График составлен на основе данных Федерального агентства лесного хозяйства «Авиалесоохрана».

Площадь, охваченная пожарами в Дальневосточном регионе, также растёт экспоненциально, что наглядно демонстрирует график (рис. 71).

### Уральский Федеральный округ

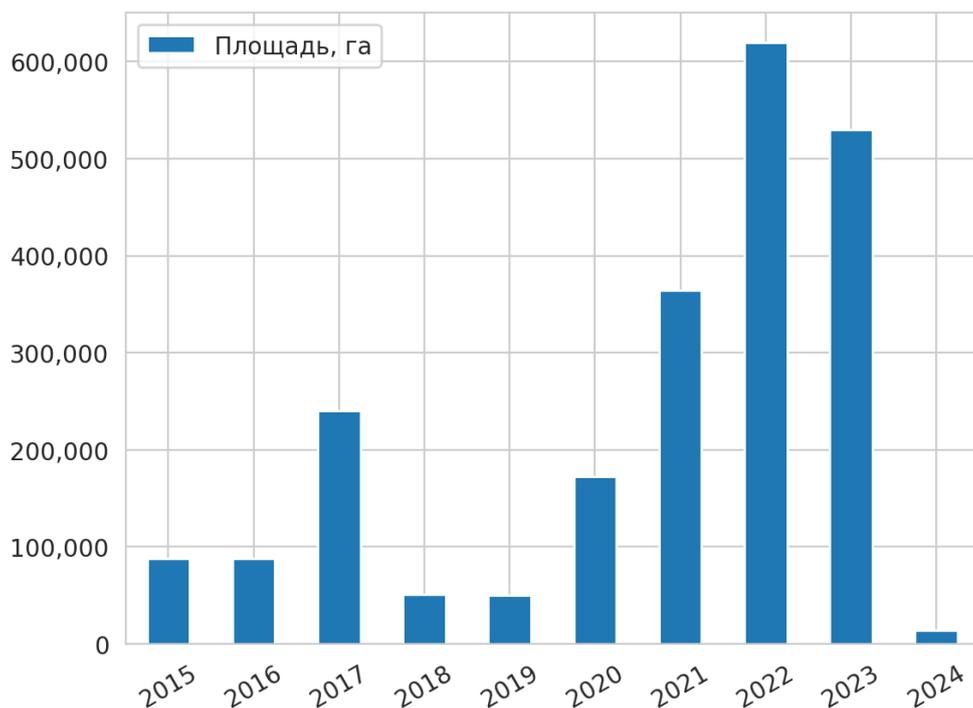


Рис. 70

Рост площади распространения пожаров в Уральском регионе, по данным Федерального агентства лесного хозяйства ФБУ «Авиалесоохрана» (данные за 2024 год неполные).

### Дальневосточный регион

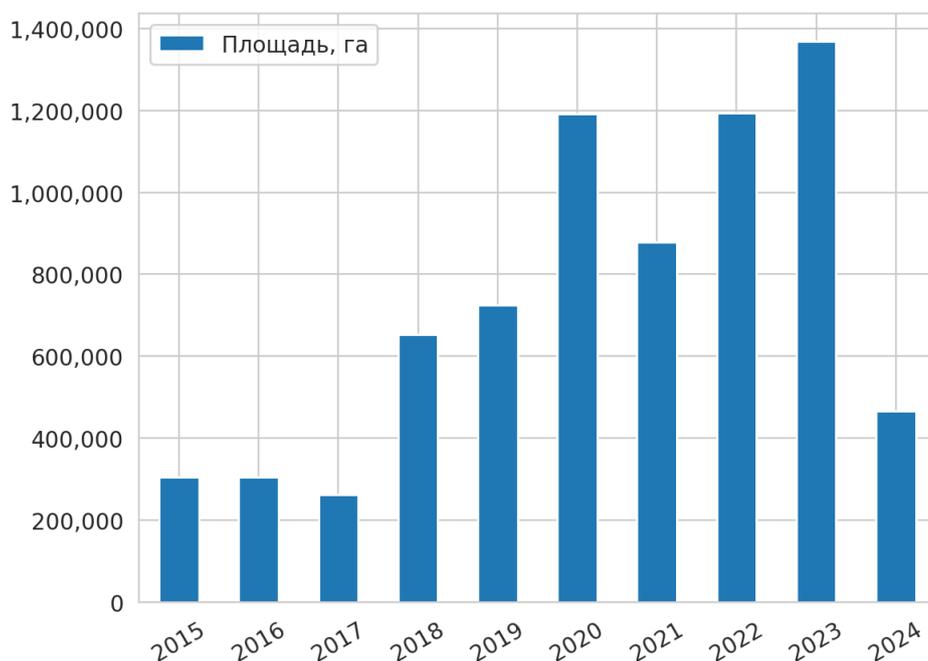


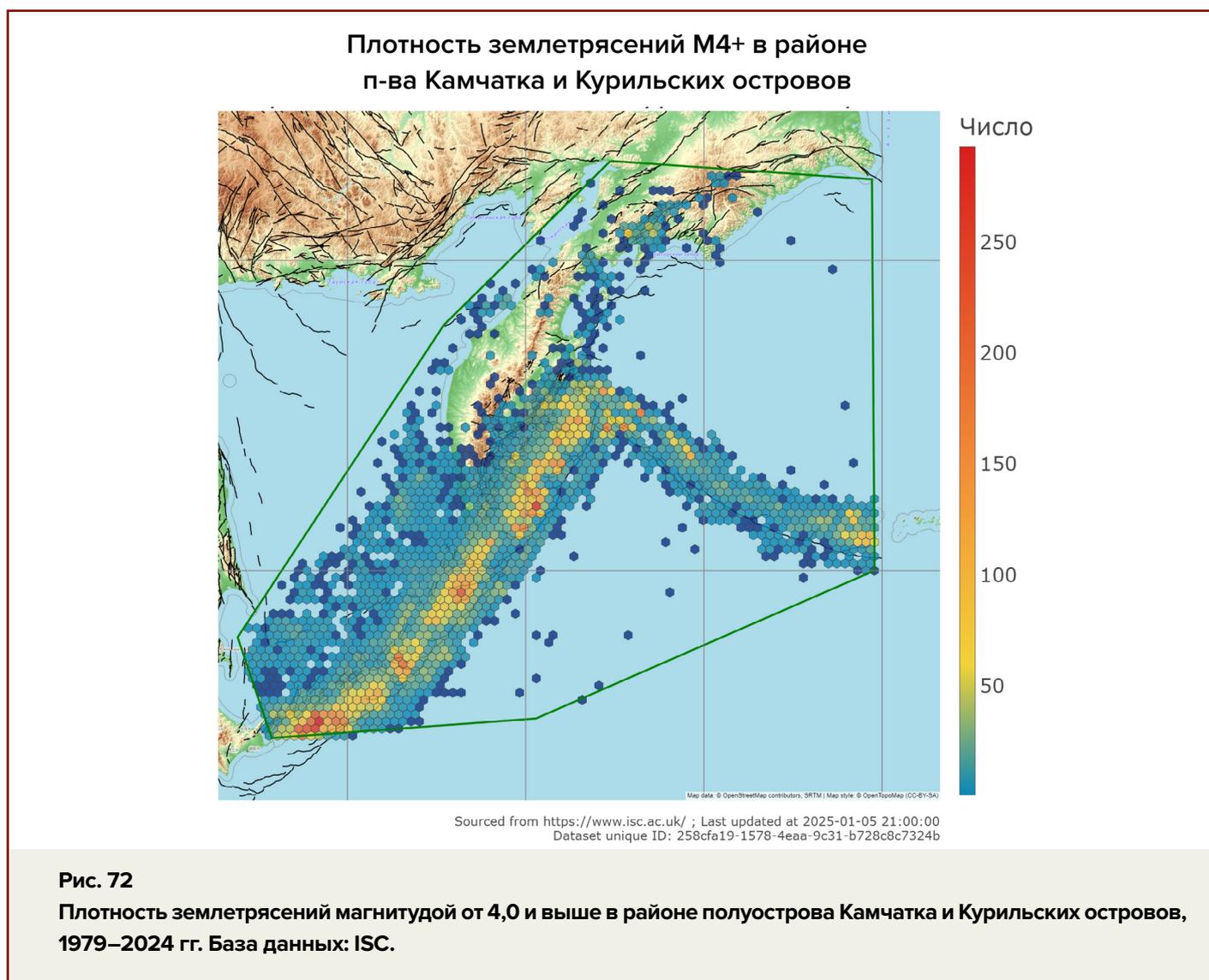
Рис. 71

Площадь распространения пожаров на Дальнем Востоке: график включает данные по Хабаровскому краю, Камчатскому краю, Магаданской области, Чукотскому автономному округу, Сахалинской области, Приморскому краю, по данным Федерального агентства лесного хозяйства ФБУ «Авиалесоохрана» (данные за 2024 год неполные).

Таким образом, аналогичные процессы нарастания пожаров происходят и с другой стороны Сибирского и Дальневосточного блока земной коры, на границе с Тихоокеанской плитой.

Предполагается, что внедрение Сибирского плюма также влияет и на Курило-Камчатский регион как на область окончания континентального блока коры, находящегося под давлением плюма. Анализ массива сейсмических данных в районе Камчатки и Курильских островов показывает заметный

рост количества землетрясений магнитудой от 4,0 и выше (рис. 72, 73). Регион входит в Тихоокеанское огненное кольцо (рис. 74) и, соответственно, демонстрирует тренд нарастания сейсмичности, согласно тенденциям этой тектонической структуры. Однако большинство всплесков сейсмичности имеет независимый характер. Это может указывать на то, что Сибирский плюм оказывает собственное влияние на регион Камчатки и Курильских островов.



### Землетрясения M4+ в районе п-ва Камчатка и Курильских островов

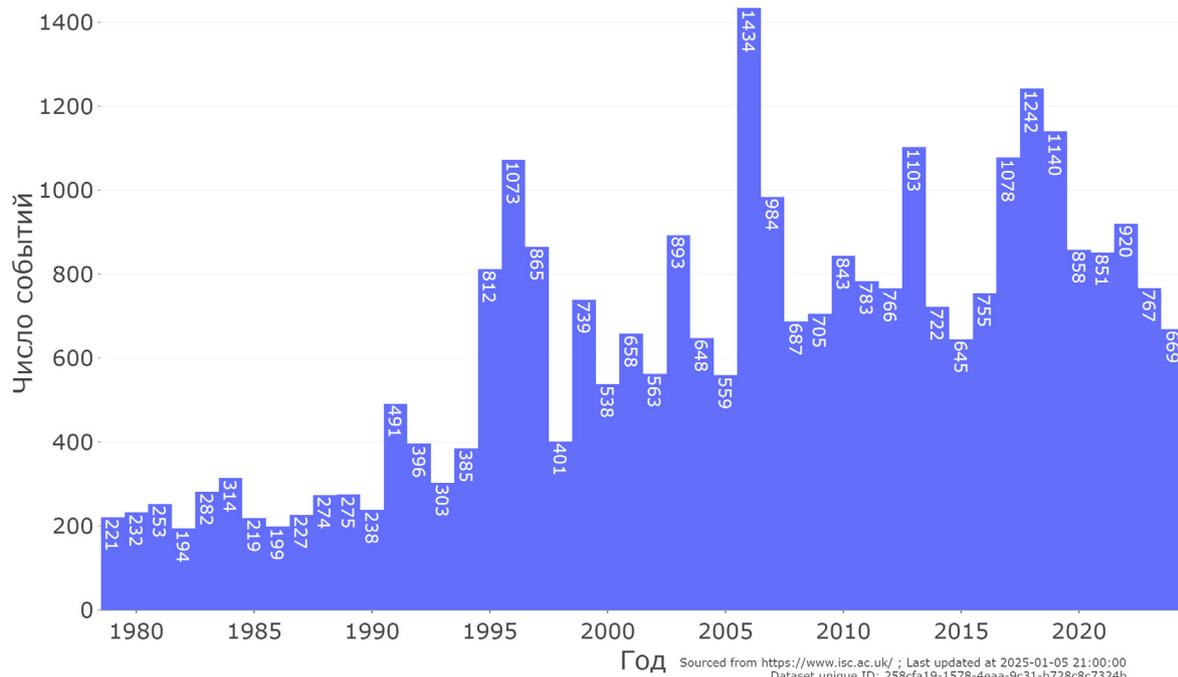


Рис. 73

Рост количества землетрясений магнитудой 4,0 и выше в районе п-ва Камчатка и Курильских островов, 1979–2024 гг. База данных: ISC.

### Землетрясения в области огненного кольца M4+ 1979–2022

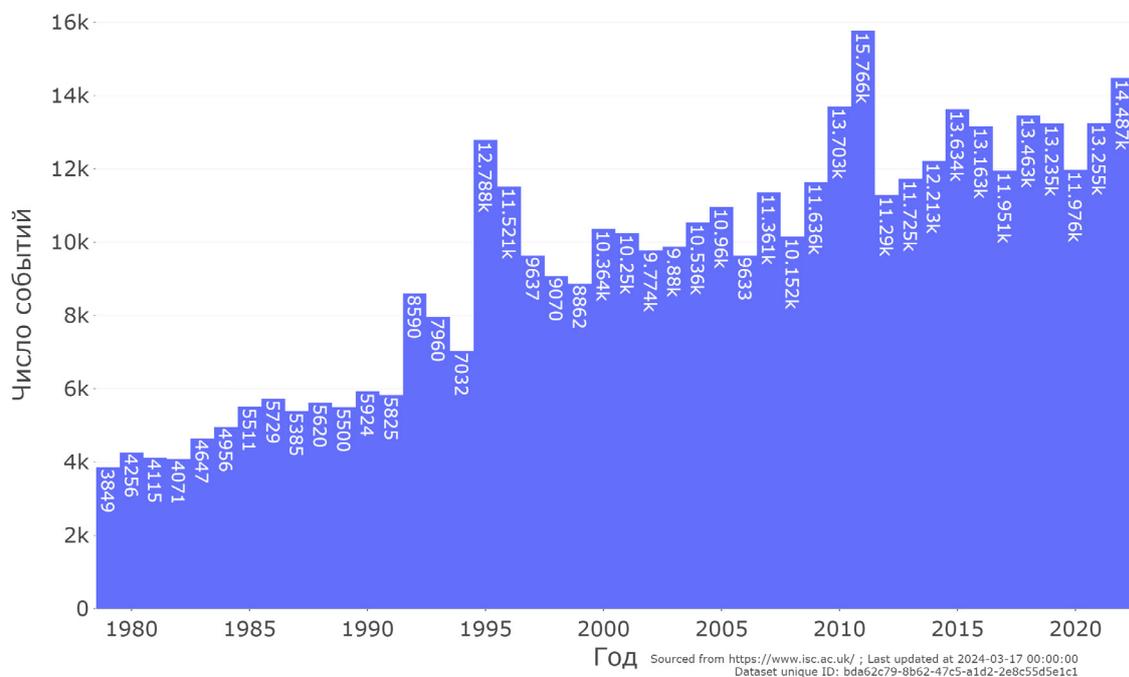
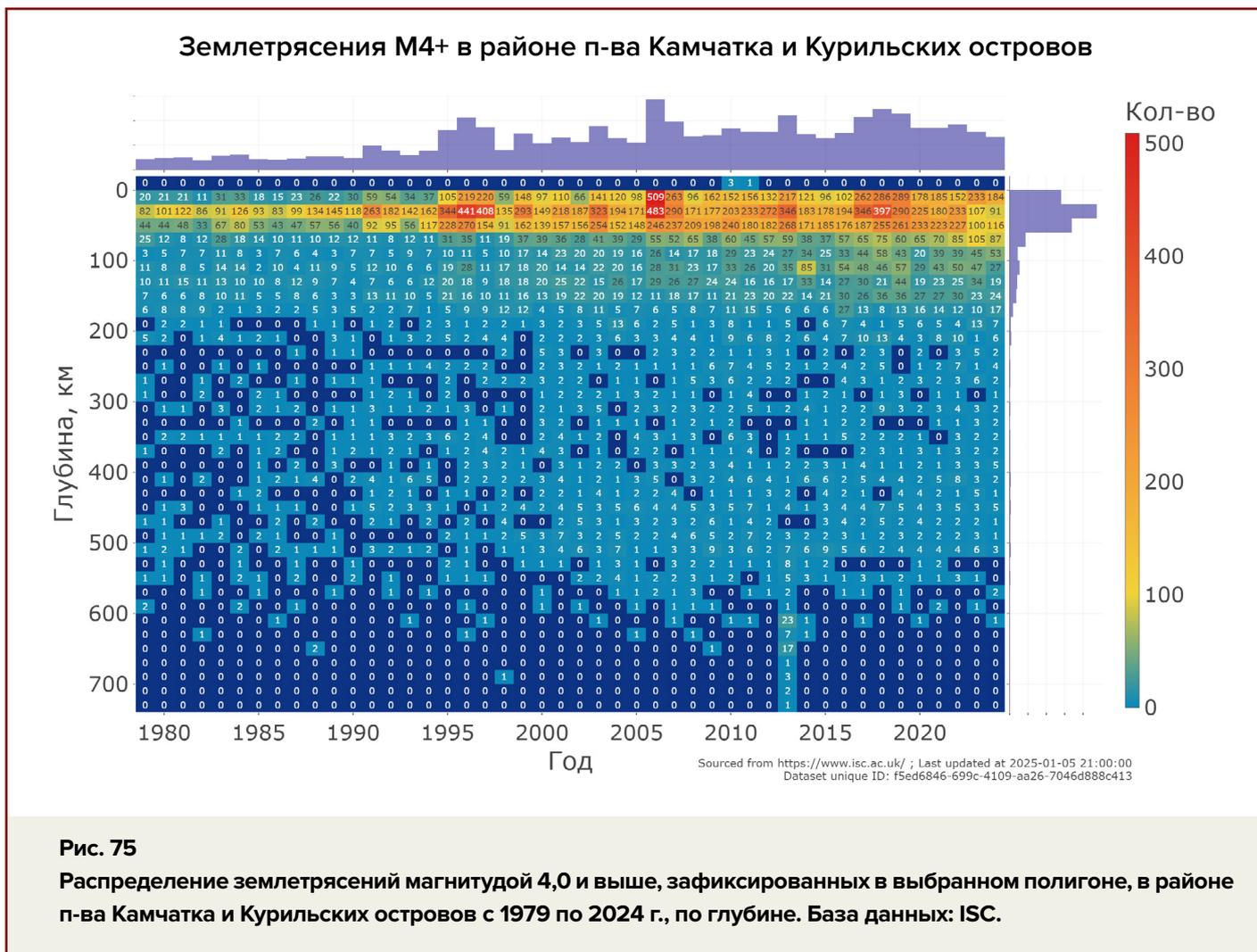


Рис. 74

Рост количества землетрясений магнитудой 4,0 и выше в районе Огненного кольца, 1979–2022 гг. База данных: ISC.

Стоит отметить, что в Курило-Камчатском регионе также наблюдается увеличение глубины землетрясений (рис. 75). Это указывает на то, что стык литосферных плит становится более подвижным из-за влияния Сибирского магматического плюма. Ожидается увеличение активности вулканов Курило-Камчатского региона, а также

появление аномалий быстрого подъёма глубинной магмы, быстрой смены её состава во время извержений вулканов на более глубокие мафические магмы. Подобную смену состава на более глубокий продемонстрировал вулкан Безымянный во время извержения 2017 года<sup>45</sup>.



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

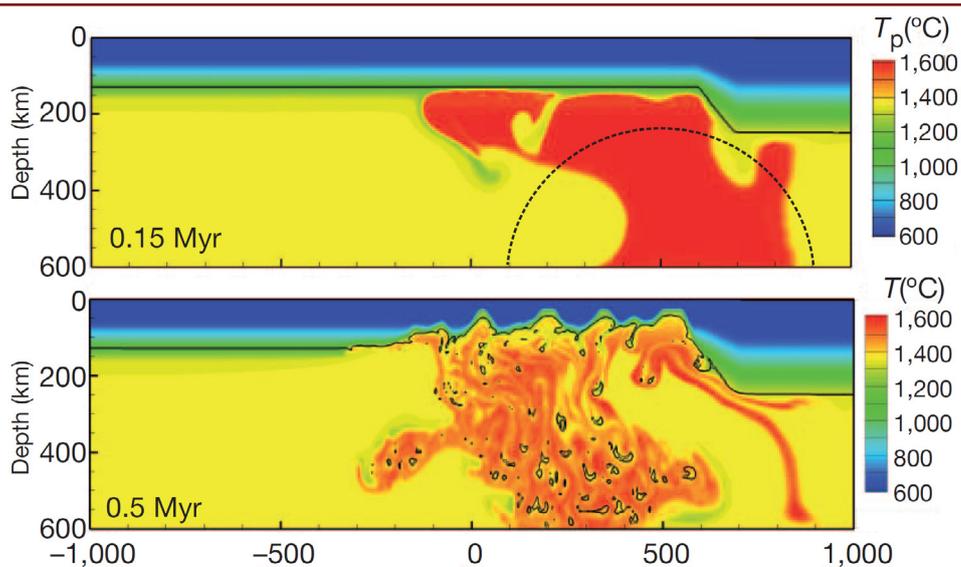
Рост сейсмичности, пожаров, аномалий вулканической активности — это и есть краевые эффекты подъёма Сибирского блока земной коры, испытывающие давление от внедрения Сибирского плюма.

Рост сейсмической активности не только в Сибири, но особенно на краях Западно-Сибирской плиты и Восточно-Сибирского кратона указывает на то, что подъём плиты в результате давления на неё снизу магматическим плюмом уже начался. Это указывает на масштабное и значительное влияние магматического плюма на плиту.

Традиционные модели предполагали, что мантийные плюмы при подъёме и нагреве должны создавать существенное поднятие

поверхности высотой до 2 км до момента прорыва магмы. Геологические свидетельства такого драматического поднятия в районе Сибирских траппов, сформировавшихся в результате внедрения магматического плюма 250 млн лет назад, отсутствуют.

На основе изучения магматических пород Сибирских траппов учёные из институтов России, Германии и Франции установили<sup>46</sup>, что вместо подъёма в виде пузыря плюм постепенно эродировал литосферу снизу (рис. 76). Когда эрозия в зоне контакта между расплавленным материалом плюма и породами верхней мантии достигла глубины 50 км, в этот момент начались масштабные излияния и извержения лавы на поверхность.



**Рис. 76**

**Реконструкция начальных этапов образования сибирских траппов.**

По вертикальной оси — глубина (км). Разными цветами показана температура пород. Исходное положение вершины мантийного плюма показано пунктирным полукругом. Плюм подходит к нижней границе литосферы (сплошная чёрная линия) и «растекается» под ней.

Внизу — вершина плюма за счёт эрозии (видны погружающиеся в недра обломки литосферы) проложила себе путь сквозь верхнюю мантию к земной коре. Это соответствует началу основной фазы траппового магматизма.

Источник: Stephan V. Sobolev, Alexander V. Sobolev, Dmitry V. Kuzmin, Nadezhda A. Krivolutskaya, Alexey G. Petrunin, Nicholas T. Arndt, Viktor A. Radko, Yuri R. Vasiliev. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes // Nature. 2011. V. 477. P. 312–316. <https://doi.org/10.1038/nature10385>

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

Современная активность плюма, вероятно, следует тому же механизму. Поэтому значительного подъёма поверхности только в одном месте при внедрении головы плюма не ожидается, но этот механизм не исключает масштабного регионального подъёма всей Восточно-Сибирской платформы на некоторую небольшую величину. Однако, согласно тектонофизическому моделированию, даже этого подъёма будет достаточно для прорыва магмы, который выведет расплав

наружу под высоким давлением, что приведёт к огромной катастрофе.

Место предполагаемого расположения центра головы плюма — район севернее плато Путорана, около 225 км на северо-восток от Норильска. Также прорывы будут охватывать и всю Западно-Сибирскую тонкую плиту, где разойдутся старые швы — рифты и глубокие разломы в земной коре.



## Обоснование неизбежности извержения Сибирского плюма

Причины, по которым прорыв магмы современного Сибирского плюма имеет высокие риски в настоящий период времени, связаны со следующими условиями. Последние 30 лет на Земле наблюдается постепенное нарастание геофизических аномалий, которые являются прямым следствием внешнего воздействия, увеличивающего тепловую энергию в районе ядра планеты. Однако текущая ситуация кардинально отличается от предыдущего периода: в конце 2024 года планета вошла в фазу повышенного энергетического воздействия на ядро планеты. И, исходя из расчётов, к 2030 году приблизится к максимальной фазе.

Критическим фактором, усугубляющим ситуацию, стало глобальное загрязнение океана вследствие антропогенного фактора, в том числе углеводородами, микро- и нанопластиком. Этот антропогенный фактор существенно изменил теплопроводные свойства океанической воды, нарушив её способность эффективно отводить тепло из недр Земли. Океан, который исторически служил главным терморегулятором планеты, утратил значительную часть своей теплопроводной функции. В результате этого происходит аномальная аккумуляция тепловой энергии в мантии, что приводит к её интенсивному плавлению больше, чем когда-либо в истории Земли.

Геофизические исследования показывают беспрецедентный рост количества глубокофокусных землетрясений, которые

являются прямым индикатором активного плавления мантии. Расплавленная магма, увеличиваясь в объёме, создаёт колоссальное давление на земную кору. Этот процесс можно сравнить с постепенным надуванием воздушного шара — в какой-то момент давление превысит предел прочности оболочки.

Сибирский регион особенно уязвим к этим процессам из-за специфической геологической структуры: именно здесь поднимается мощный магматический плюм — восходящий поток расплавленного вещества мантии, спровоцированный сдвигом ядра в этом направлении в 1997–1998 гг. Рост температурных аномалий в Сибири показывает, что объём магмы под Сибирским кратоном продолжает увеличиваться в геометрической прогрессии. На основе геологических данных и современных наблюдений можно с высокой долей уверенности утверждать, что Сибирский плюм находится в критической фазе готовности к извержению.

Особую озабоченность вызывает тот факт, что одновременно с Сибирским плюмом критическая ситуация складывается в районе Марианской впадины. Это самая глубокая точка океанического дна, где кора наиболее тонкая и уязвимая. Здесь также наблюдается подъём раскалённой магмы, и, как следствие этого, наблюдается также значительный прирост сейсмической активности. Существует реальная угроза разрыва океанического дна в этом месте и сценария гибели планеты.

Есть два вероятных сценария развития событий. Первый — это прорыв Сибирского плюма, который может произойти в любой момент из-за растущего давления магмы. Вторым — разрыв земной коры в Марианской впадине, который может предшествовать сибирской катастрофе. Сибирский плюм не взорвётся только в том случае, если первым взорвётся Марианская впадина. Геологическая история Марса показывает нам возможные последствия такого сценария: впадина Маринер остаётся немым свидетелем подобной катастрофы, когда прорыв плюма под океаном привёл к глобальным последствиям для всей планеты.

Согласно расчётам, учитывающим текущие тренды роста геофизической активности, критическая точка прорыва Марианской впадины может быть достигнута к 2036 году. Однако важно понимать, что этот срок условен. Земная кора в Сибири может не выдержать растущего давления значительно раньше. При текущем развитии событий прорыв Сибирского плюма или разрыв земной коры в Марианской впадине представляется неизбежным следствием происходящих

в недрах Земли процессов. Единственная неопределённость заключается в точном времени и месте катастрофы, но не в самом факте её приближения.

Далее рассмотрим три возможных сценария развития событий с Сибирским плюмом.

Первый сценарий — одномоментное извержение Сибирского плюма. Произойдёт внезапный единократный прорыв Сибирского плюма.

Второй сценарий — постепенное извержение Сибирского плюма. Произойдут медленные и постепенные извержения лавы в Сибири, подобно формированию Сибирских траппов.

Третий сценарий — плановая контролируемая дегазация. Возможен в случае, если человечество предпринимает необходимые меры по дегазации вторичных магматических очагов Сибирского плюма в земной коре.

## Сценарий 1.

### Одновременное извержение Сибирского плюма

Для того чтобы оценить предполагаемый ущерб от одновременного извержения Сибирского плюма, можно прибегнуть к методу сравнений с примерами из геологической истории. Однако стоит учесть, что подобных условий, которые существуют на данный момент на Земле, а именно совпадения наиболее сильного цикла 24 000 лет и антропогенного загрязнения «основной охлаждающей системы планеты» — океана — не существовало ещё никогда. Именно по этой причине одновременный прорыв Сибирского плюма рассматривается как наиболее вероятное событие, если человечество не предпримет никаких шагов по снижению рисков этого прорыва.

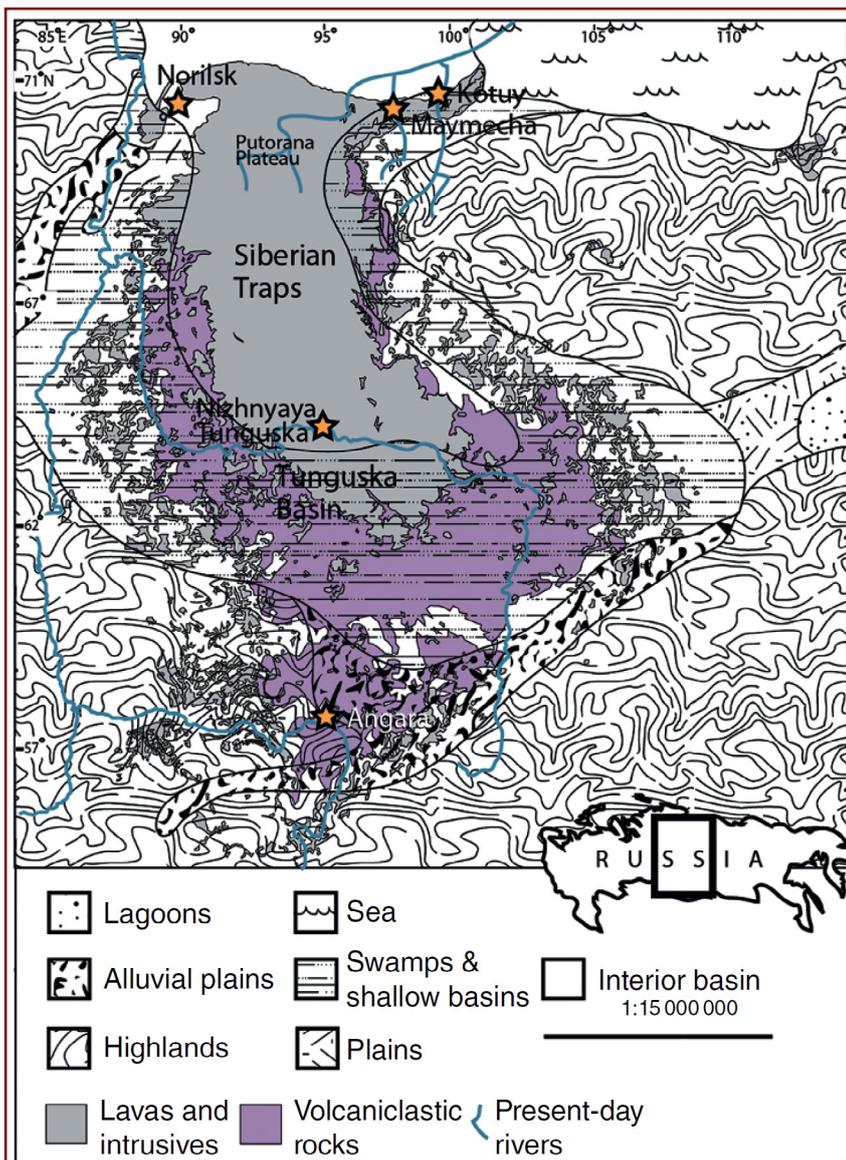
Для оценки мощности извержений вулканов используют объём выброшенного материала. Так, например, во время одного из самых сильных извержений супервулкана Йеллоустона 2,1 млн лет назад объём выброшенной магмы составил 2 500 км<sup>3</sup>, что было установлено благодаря изучению отложений туфов в Северной Америке<sup>47</sup>. Во время этого извержения выбросы пепла и газов поднялись на высоту 50 км,

достигнув верхней границы стратосферы. По масштабу это извержение было сопоставимо с извержением супервулкана Тоба на острове Суматра, произошедшим около 72 000–74 000 лет назад, которое было самым сильным извержением за последние 25 млн лет.

Во время извержений Сибирских траппов около 250 млн лет назад объём выброшенного материала составил, по разным оценкам, от 3 до 4 млн км<sup>3</sup> лав и туфов<sup>48</sup> (рис. 77). То есть извержение Сибирских траппов было в 1 000 раз больше по объёму выброшенного материала, чем самое сильное извержение Йеллоустонской кальдеры или супервулкана Тоба. **Таким образом, учитывая одновременный характер потенциального извержения Сибирского плюма, его активация может привести к извержению, мощность которого в 1 000 раз превысит известные исторические события, такие как извержения Йеллоустонской кальдеры или супервулкана Тоба.**

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

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



**Рис. 77**  
 Карта палеогеографии Сибирских траппов, показывающая масштабы основных вулканокластических выходов и местностей. По данным Малича и др. (1974), Полозова и др. (2010), Блэк и др. (2015), с позднепермской палеогеографией упрощённо из Czamanske et al. (1998).

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

Предполагается, что если произойдёт одномоментный прорыв Сибирского плюма, то извержение будет иметь эксплозивный, то есть взрывной характер, и образует единую кальдеру. Согласно гипотезе, ожидается, что кальдера от прорыва Сибирского плюма будет иметь площадь 75 000 км<sup>2</sup>, область такой площадью будет иметь радиус 150 км

(или, к примеру, 380 км на 250 км). Во время извержения Сибирских траппов 250 млн лет назад площадь залитой лавой территории, по литературным данным<sup>49</sup>, составила от 4 до 7 млн км<sup>2</sup><sup>50</sup>. Аналогичные территории могут быть затронуты извержениями и в этот раз.

<sup>49</sup>Fedorenko, V. A., Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., Czamanske, G. K., Hawkesworth, C. J., Wooden, J. L., & Ebel, D. S. (1996). Petrogenesis of the Flood-Basalt Sequence at Noril'sk, North Central Siberia. *International Geology Review*, 38(2), 99-135. <https://doi.org/10.1080/00206819709465327>  
<sup>50</sup>Ivanov, A.V., He, H., Yan, L., Ryabov, V.V., Shevko, A.Y., Paleskii, S.V., Nikolaeva, I.V., 2013. Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism. *Earth-Science Reviews*, 122, pp.58–76. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>

Мнение, что лавовые потоки представляют наибольшую угрозу среди вулканических явлений, ошибочно. В действительности пепел часто становится основной причиной смертельных последствий. Для супервулканов, характеризующихся высокой взрывоопасностью, значительная часть магмы не успевает преобразоваться в лаву. Вместо этого она фрагментируется при взрыве, образуя огромное количество мельчайших частиц вулканического пепла — раскалённых обломков острых и зазубренных горных пород, которые разносятся в атмосфере. При вдыхании этот пепел образует цементоподобную смесь в лёгких человека, что приводит к неминуемой смерти.

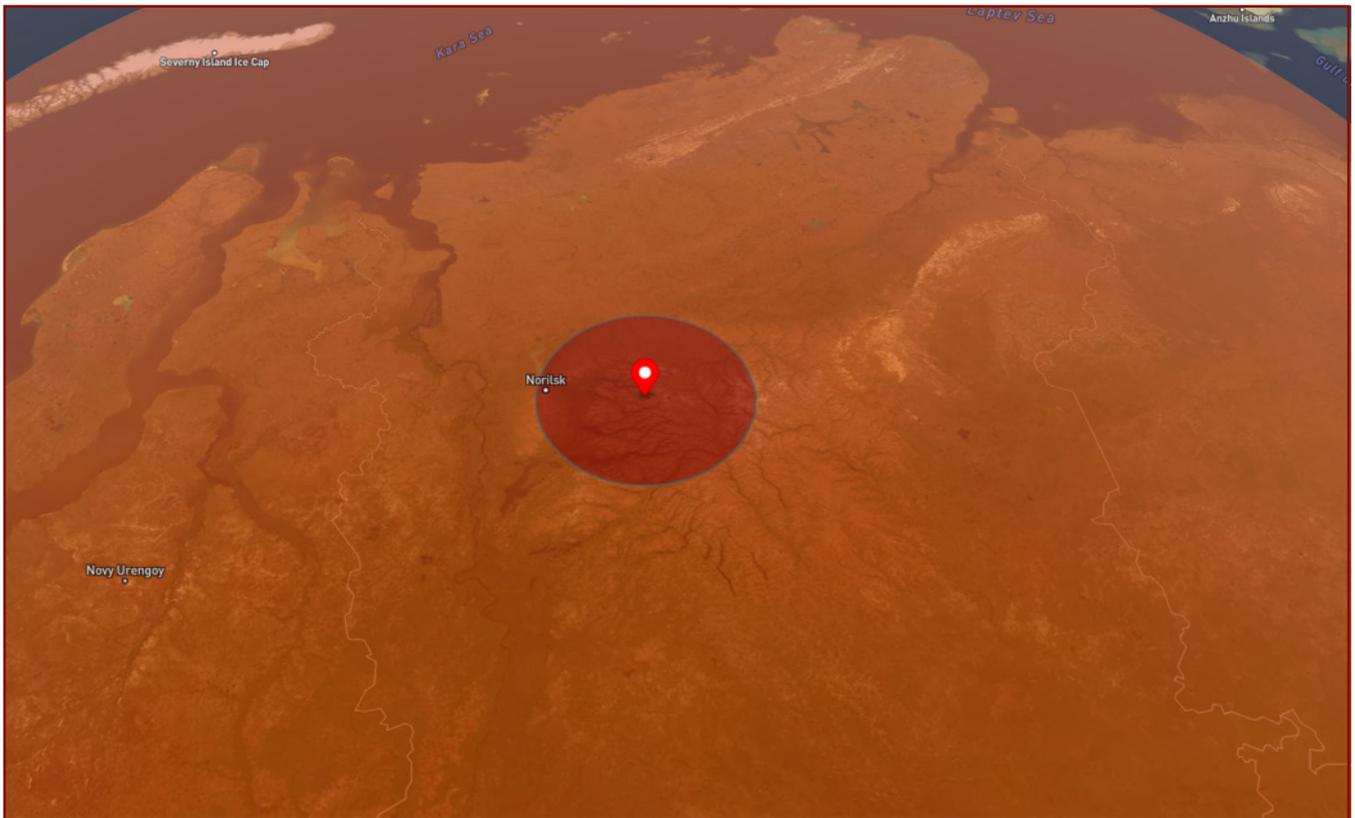
Предполагается, что во время извержения Сибирского плюма радиус перемещения такого раскалённого пепла составит приблизительно 9 000 км, то есть покроет площадь около 255 млн км<sup>2</sup>. Так как площадь всей поверхности Земли — чуть более 510 млн км<sup>2</sup>, то радиус поражения пеплом, который нельзя будет вдыхать, будет охватывать половину планеты: эта территория составит около 50 % поверхности Земли.

Таким образом, при одномоментном прорыве Сибирского плюма ожидается три смертоносных радиуса.

**Первая (центральная) зона воздействия** — это область радиусом 150 км с центром в северо-западной части плато Путорана, где предполагается формирование кальдеры (рис. 78). В эту зону попадают города Норильск, Дудинка и Талнах Красноярского края. При активизации плюма в пределах этой зоны произойдёт мгновенное разрушение всех объектов из-за ударной волны и раскалённых пирокластических потоков в начальной фазе извержения.

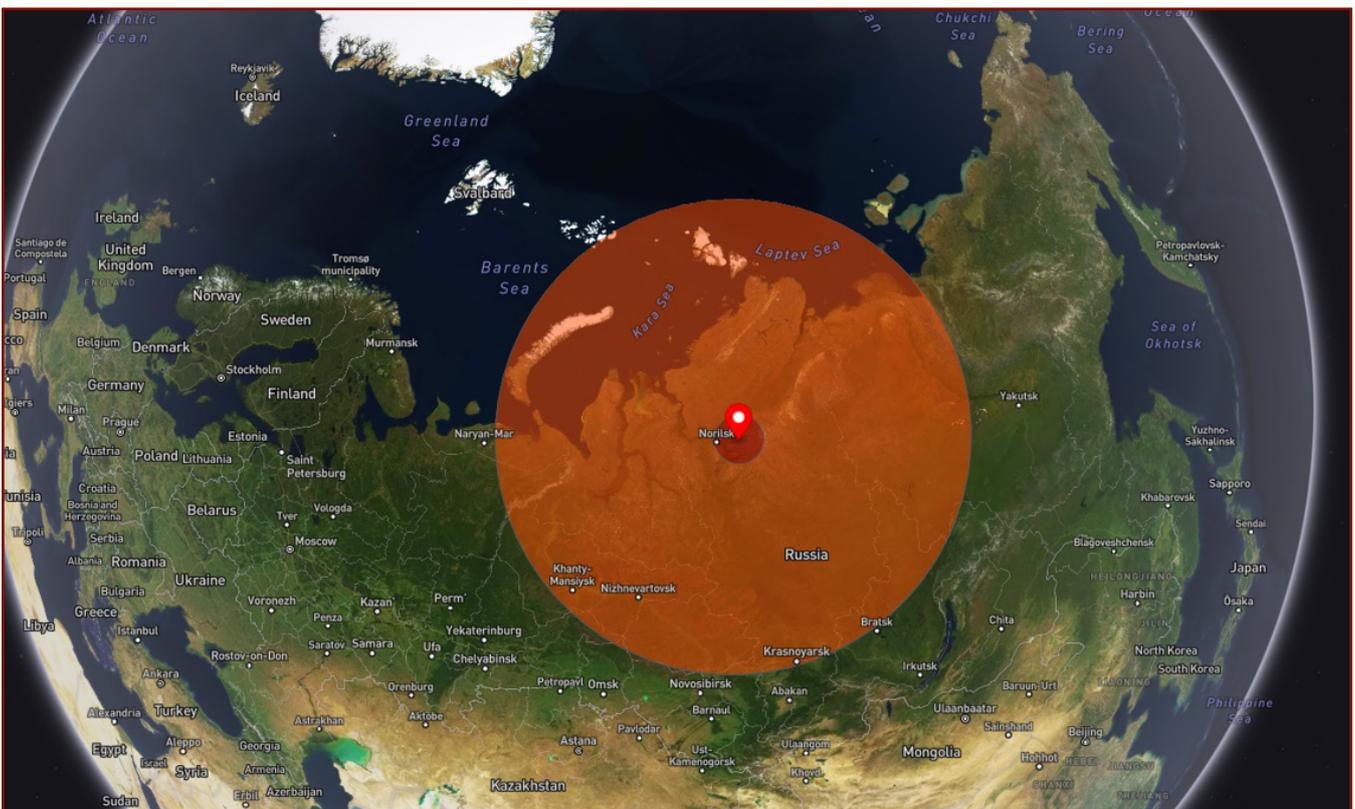
**Вторая зона воздействия** (радиусом 1 500 км) — это территория распространения лавы и тяжёлых вулканических материалов (рис. 79). Она будет охватывать обширные территории Северной Сибири, включая территории Ямало-Ненецкого автономного округа, Таймырского полуострова, части Ханты-Мансийского автономного округа, Севера Красноярского края, западной части Якутии, северо-востока европейской части России. В этот радиус попадают такие крупные города, как Игарка, Новый Уренгой, Надым, Салехард, Воркута, Нарьян-Мар, Мирный, Когалым, Лесосибирск, Сургут, Красноярск, Ханты-Мансийск, Томск, Нижневартовск. В первые часы извержения эта территория будет подвержена воздействию быстро движущихся (до 700 км/ч) потоков раскалённого газа, пепла и лавы. Эти потоки уничтожат всё живое и покроют территорию мощным слоем вулканических материалов, погребая под собой города и природные ресурсы.

**Третья зона воздействия** (радиусом около 9 000 км) — это область распространения тонкодисперсных пирокластических материалов и вулканического пепла, охватывающая приблизительно 50 % площади земной поверхности (рис. 80). На начальном этапе (в первые сутки после извержения) максимальному воздействию пепловых выбросов подвергнутся территории Российской Федерации, континентальной Азии, Европы, Аравийского полуострова, северной части Африканского континента и Северной Америки. В течение последующих 7–10 дней прогнозируется распространение пепловых масс на территории Австралийского континента, Южной Америки и Антарктиды.



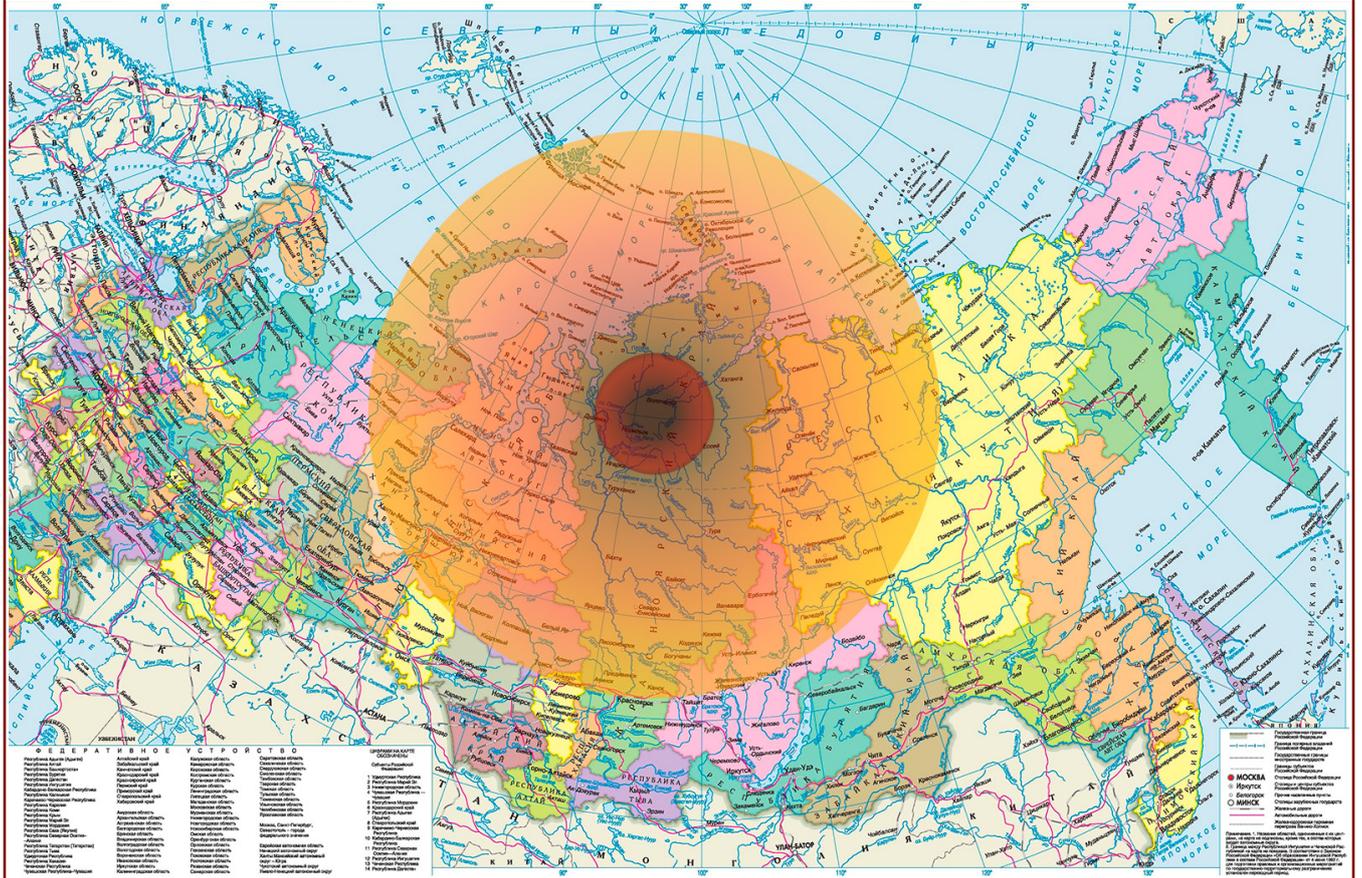
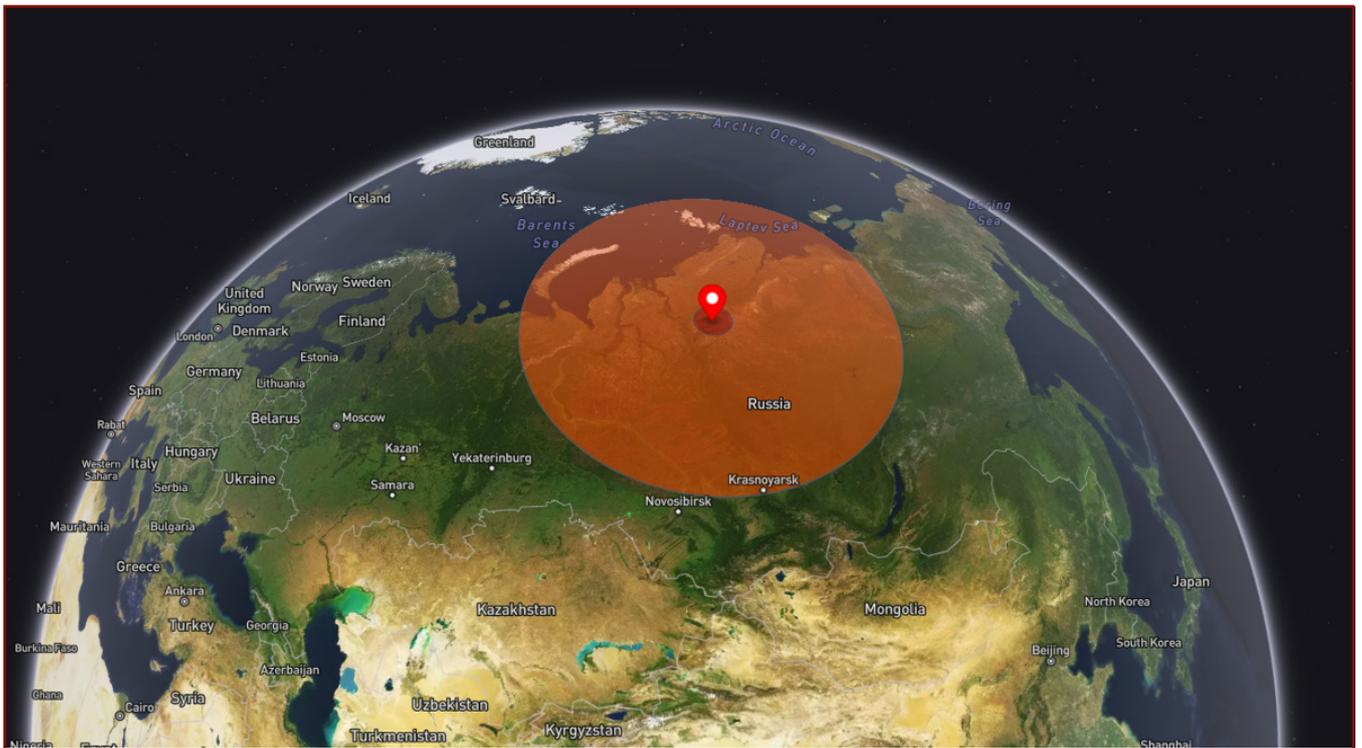
**Рис. 78**

Красным показана зона образования кальдеры с приблизительным радиусом около 150 км



**Рис. 79**

Оранжевым показана зона разлива лавы и выброса тяжёлых пирокластических фракций — радиус приблизительно около 1 500 км



**Рис. 79**  
**Оранжевым показана зона разлива лавы и выброса тяжёлых пирокластических фракций — радиус приблизительно около 1 500 км**



Рис. 80

Жёлтым показана область распространения мелкого вулканического пепла — радиус приблизительно около 9 000 км



**Рис. 80**

**Жёлтым показана область распространения мелкого вулканического пепла — радиус приблизительно около 9 000 км**

Исследование геологических процессов показывает, что активизация Сибирского плюма вызовет целый ряд дополнительных катастрофических явлений. Ожидается появление мощной ударной волны, возникновение землетрясений исключительной силы (магнитудой около 10), образование разрушительных цунами и вероятное пробуждение других крупнейших вулканических систем Земли. Выделяемая при извержении энергия может запустить цепную реакцию, приводя к активизации

супервулканов и крупных вулканических областей по всей планете. Эти выводы основаны на математических расчётах энергетических процессов и их влияния на земную кору.

Далее рассмотрим дополнительные факторы риска, которые угрожают человечеству в результате одномоментного прорыва Сибирского плюма.

## Ударная волна

По данным из открытых источников, извержение Йеллоустонского супервулкана может высвободить энергию около 900 000 мегатонн и вызвать землетрясение магнитудой 11,2. Поскольку шкала магнитуд логарифмическая (каждое увеличение на единицу означает рост энергии в 32 раза), то извержение Сибирского плюма, которое в 1 000 раз мощнее Йеллоустона, может вызвать землетрясение магнитудой 13,2. Это в 350 000 раз сильнее самого мощного зарегистрированного землетрясения — Великого Чилийского (магнитуда 9,5, 1960 год) — и сравнимо с падением крупного астероида.

Выделяемая энергия порядка  $10^{24}$  Дж создаст мощнейшую ударную волну глобального масштаба. В центре извержения давление будет настолько высоким, что породы мгновенно испарятся и будут выброшены в верхние слои атмосферы. Сверхзвуковая ударная волна за считанные минуты вызовет разрушения на расстоянии

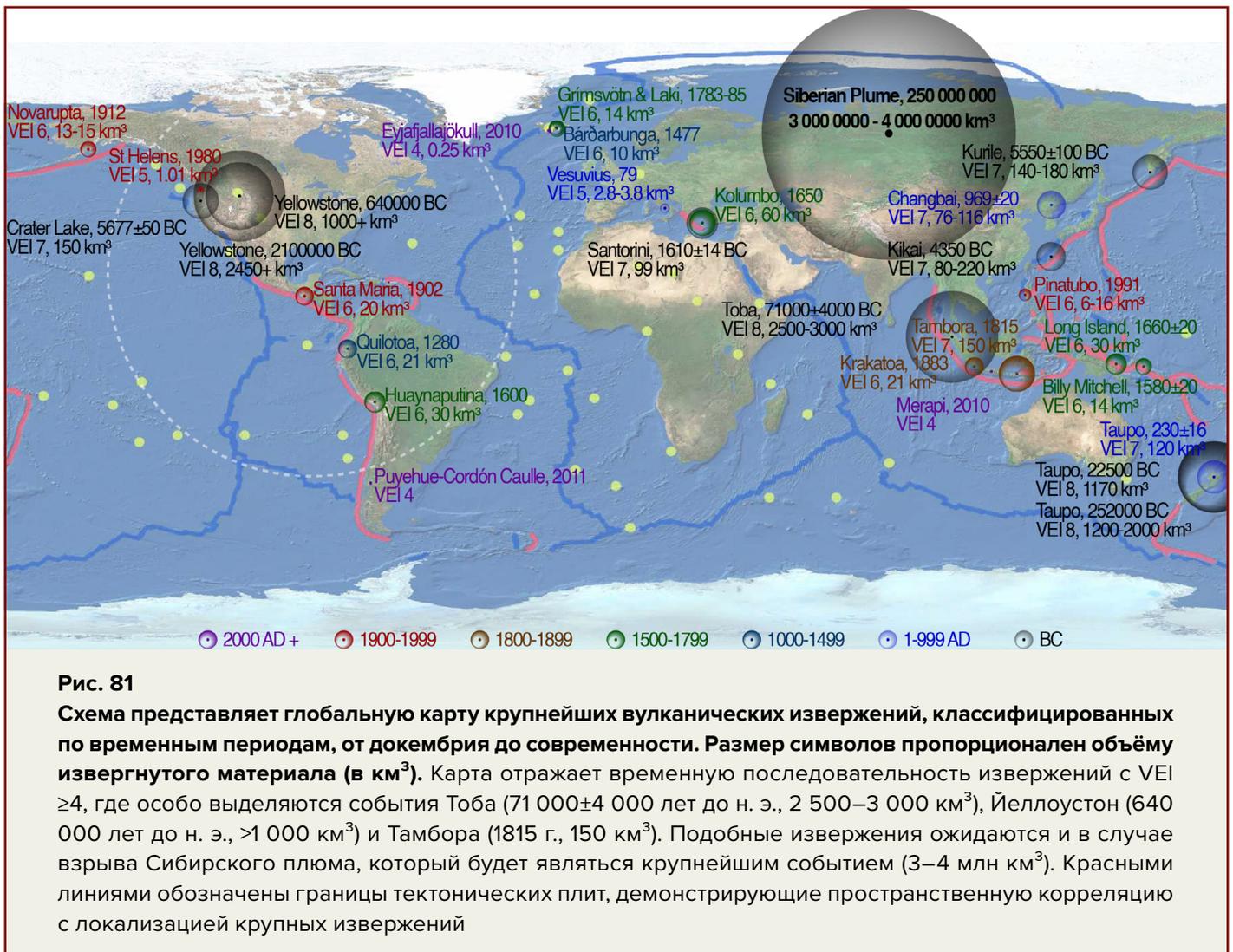
тысяч километров, подобно падению Тунгусскому метеорита, но намного мощнее.

В сибирской тайге возникнут масштабные пожары, а огромные территории окажутся под толстым слоем вулканического пепла. Произойдёт быстрое таяние вечной мерзлоты на тысячах километров, сопровождающееся выбросом парниковых газов. Ландшафт подвергнется масштабным разрушениям с активизацией разломов земной коры. Сейсмические волны пройдут по всей планете, вызывая новые землетрясения силой более 10 баллов. В Северном Ледовитом океане возникнут гигантские цунами высотой сотни метров, угрожающие побережьям России, Канады, Гренландии и Скандинавии. Вторичные цунами обрушатся на берега Индонезии, Японии, Австралии, Северной и Южной Америки. Глобальные атмосферные возмущения приведут к образованию сверхмощных ураганов и штормов.

## Активизация супервулканов и вулканических систем

Сейсмические волны от извержения распространятся не только по воздуху и поверхности Земли, но и глубоко в мантию. Поскольку все супервулканы связаны между собой через расплавленные слои мантии, сейсмические волны такой силы от извержения Сибирского плюма, вероятно, вызовут цепную реакцию извержений других супервулканов уже в первые сутки

(рис. 81). Ожидается активизация крупнейших вулканических систем, включая кальдеры Йеллоустон и Лонг-Вэлли (Северная Америка), Флегрейские поля (Апеннинский полуостров), Тоба (Зондский архипелаг), Айра (Японские острова) и вулканический комплекс Таупо (Новая Зеландия).



Кроме извержения супервулканов, вероятно, начнутся извержения многих вулканов, расположенных вдоль Тихоокеанского огненного кольца и в других сейсмически активных зонах. Высока вероятность возобновления вулканической деятельности таких вулканов, как Фудзияма (Япония), Кракатау и Мерапи (Индонезия), Везувий и Этна (Италия), Попокатепетль (Мексика), вулканических групп Камчатки, Андского и Аляскинского вулканических поясов, а также подлёдных вулканических систем Западной

Антарктиды. Предполагается реактивация длительно неактивных вулканических структур, включая стратовулкан Арарат (Анатолийское плато), вулканический массив Эльбрус (Кавказский регион), вулкан Лаахер-Зе (Центральная Европа), стратовулканы Килиманджаро и Ньирагонго (Восточно-Африканская рифтовая система) и вулканические системы Аравийского полуострова.

## Кислотные дожди

Катастрофические выбросы вулканического пепла и диоксида серы в результате извержения приведут к тому, что осадки по всей планете примут форму кислотных дождей. Для иллюстрации масштабов выбросов можно обратиться к извержению супервулкана Йеллоустон 630 000 лет назад, когда в атмосферу было выброшено около 500 мегатонн диоксида серы. Масштабируя эти данные с учётом мощности гипотетического извержения Сибирского плюма, можно предположить объём выбросов диоксида серы порядка 1 500 000 мегатонн (или  $1,5 \times 10^{12}$  тонн), что превышает выбросы Тамборы в 1815 году («год без лета») примерно в миллион раз. Стоит подчеркнуть, что этот расчёт не учитывает выбросов других вулканов, которые могут быть активированы в рамках цепной реакции.

Такая концентрация выбросов диоксида серы вызовет глобальное образование аэрозольных частиц в стратосфере, которые постепенно будут вымываться из атмосферы в течение десятилетий в виде кислотных дождей. Основной период кислотных осадков, по прогнозам, составит от 3 до 10 лет, в зависимости от климатических процессов и циркуляции веществ в атмосфере. Регионы, находящиеся ближе к эпицентру таких выбросов, например в пределах современной Сибири, окажутся под воздействием осадков с pH менее 1,5, что аналогично разбавленной

серной кислоте. Это приведёт к уничтожению растительности, в том числе корней, листья и ветвей, а также вымыванию минералов из почвы, что сделает её непригодной для поддержания жизни. Водные экосистемы также подвергнутся резкой закисленности: водоёмы превратятся в кислотные озёра с уровнем pH 2–3, что сделает их токсичными для большинства форм жизни. Помимо этого, кислота, попадающая в водопроводные системы, сделает питьевую воду непригодной для употребления без сложной фильтрации. Инфраструктура, включая здания из цемента, мрамора и металлов, подвергнется ускоренной коррозии под воздействием сульфатных соединений.

Однако максимальная концентрация кислотных дождей продлится лишь первые месяцы после извержения, после чего осадки постепенно локализуются в определённых регионах. С наступлением вулканической зимы большая часть осадков перейдёт в форму снега, что снизит кислотную нагрузку на экосистемы, но к этому моменту глобальные разрушения флоры и фауны, вызванные кислотными осадками, уже будут необратимы. Ущерб, нанесённый экосистемам, окажет заметное влияние на природные и антропогенные процессы задолго до начала глобального охлаждения.

## Вулканическая зима

Суммарное воздействие извержения Сибирского пюма, усиленное одновременной активацией множества вулканов, будет иметь колоссальный катастрофический эффект, выраженный в изменении глобальных климатических и экологических условий. Масштабные выбросы вулканического пепла, газов (особенно диоксида серы —  $\text{SO}_2$ ) и аэрозолей в атмосферу создадут непреодолимый барьер для солнечного излучения на десятилетия.

Высокая концентрация сульфатных аэрозолей в стратосфере будет отражать большую часть солнечной радиации, что вызовет нарушение энергетического баланса планеты. Ожидается резкое сокращение поступления тепла, что приведёт к экстремальному охлаждению климата — состоянию, которое можно обозначить как «гипервулканическая зима». В результате подобных процессов Земля превратится в «ледяной шар», где условия для поддержания жизни сохранятся лишь в ограниченных регионах, преимущественно в экваториальной зоне.

Оценки возможного влияния основываются на исторических данных о значительных извержениях. Например, во время максимального извержения Йеллоустона 2,1 млн лет назад температура на планете снизилась в среднем на 3–5 °С. Согласно расчётам, во время извержения Сибирского пюма, масштабы которого многократно превышают упомянутое событие, средняя температура на Земле упадёт на ~24–31 °С. В полярных зонах снижение температуры ожидается до 28–36 °С и более, что приведёт к полному замерзанию ключевых водоёмов,

включая Северную Атлантику и значительные участки Тихого океана. Средние широты испытают снижение температуры на 24–31 °С, что уничтожит всю растительность и спровоцирует массовую гибель организмов.

Океанические экосистемы подвергнутся резкому разрушению. Замерзание начнётся с поверхности и прибрежных участков океанов, вызывая исчезновение морской биоты на глобальном уровне. В экваториальных регионах температура упадёт на 20–27 °С, что сделает даже тропические зоны слишком холодными для поддержания жизни.

Практически вся поверхность суши окажется бесплодной в результате глобального холода, затенения и прекращения фотосинтеза. Пищевые цепи будут разрушены, приводя к краху сельского хозяйства и массовому вымиранию как флоры и фауны, так и значительной части человечества. Жизнеспособность сохранят лишь отдельные микробные экосистемы, адаптированные к экстремальным условиям.

Сульфатные аэрозоли, длительное время находящиеся в стратосфере, продолжат блокировать солнечный свет на протяжении нескольких десятилетий. Однако последствия «гипервулканической зимы» будут ощущаться значительно дольше. Даже после завершения оседания пепла и аэрозолей планете потребуются сотни или даже тысячи лет для восстановления естественного климатического и экологического баланса, учитывая замерзание океанов, формирование ледников и радикальные изменения биосферы.

## Выводы по сценарию 1.

### Одномоментный прорыв Сибирского плюма

Одномоментное извержение Сибирского плюма станет катастрофическим геологическим и климатическим событием, вызвав глобальные изменения в атмосфере, гидросфере и биосфере. Мощный взрыв на плато Путорана мгновенно уничтожит всё в радиусе 150 км, сформировав гигантскую кальдеру, а пирокластические потоки и лавы охватят территорию радиусом 1 500 км, превратив Сибирь в выжженную пустыню. Половина поверхности планеты покроется слоем пепла. Землетрясение магнитудой до 13,2, вызванное взрывом плюма, породит разрушительные сейсмические волны, которые распространятся по всей планете, активизируя линии разломов, вторичные землетрясения и мегацунами высотой сотни метров, затопляющие прибрежные зоны континентов.

Выбросы 1,5 млн мегатонн  $\text{SO}_2$  вызовут кислотные дожди с pH ниже 1,5, уничтожая почвы, растительность и водные экосистемы. Водоёмы станут непригодными для жизни, а суша быстро потеряет своё плодородие. Коллапс фотосинтеза и пищевых цепочек

приведёт к массовому вымиранию флоры, фауны и, соответственно, человеческой цивилизации.

Массовая активизация супервулканов, включая Йеллоустон, Кампи Флегрей и Тоба, усугубит глобальные изменения климата, увеличив выбросы вулканического пепла, диоксида серы ( $\text{SO}_2$ ) и аэрозолей. Их накопление в стратосфере будет блокировать солнечный свет, вызывая планетарное похолодание («гипервулканическую зиму») и падение температуры на десятки градусов. В полярных регионах температура снизится на 28–36 °C, в умеренных — на 24–31 °C, а в тропиках — на 20–27 °C, что вызовет замерзание океанов, остановку океанической циркуляции, разрушение экосистем и формирование гигантских ледников на суше.

Воздействие «гипервулканической зимы» сделает Землю практически необитаемой, восстановление природных условий потребует от тысяч до миллионов лет. Это событие станет крупнейшим вымиранием в геологической истории планеты.

## Сценарий 2.

### Постепенное извержение Сибирского плюма

Второй сценарий извержения Сибирского плюма предполагает не одномоментный взрыв, а постепенную серию извержений газов и потоков лавы через разломы и ослабленные зоны земной коры. Этот процесс можно сравнить с формированием Сибирских траппов, произошедшим в конце пермского периода 250 млн лет назад в том же регионе.

Образование Сибирских трапповых провинций стало самым масштабным проявлением земного вулканизма. В это время Земля пережила крупнейшую экологическую катастрофу в своей истории — пермско-триасовое массовое вымирание, в ходе которого исчезло до 90 % морских и 70 % наземных видов (рис. 82, 83).

Геологические данные<sup>51</sup> указывают на то, что сибирские извержения на территории Восточно-Сибирского кратона могли быть необычайно взрывными (Campbell et al. 1992), а толщина пирокластических отложений достигала 800 метров (Khain 1985). Мощность взрыва была настолько высока, что выталкивала осадочные породы иногда и с глубины 10 км.

Вулканическая активность в регионе проявилась в несколько этапов, кардинально изменив геологический ландшафт. Первоначально магма проникала в толщу осадочных отложений, формируя разнообразные интрузивные тела, такие как силлы. Затем характер извержений сменился

на взрывной, что привело к выбросу огромного количества пирокластического материала и образованию мощных вулканических отложений. Кульминацией этого процесса стало излияние колоссальных объёмов базальтовой лавы, исчисляемых сотнями тысяч кубических километров. Совокупный объём вулканических пород, включая интрузии, пирокластические отложения и лавовые потоки, оценивается приблизительно в 3 млн км<sup>3</sup>. Важно отметить, что эта цифра отражает лишь сохранившиеся до наших дней породы, и можно с уверенностью утверждать, что первоначальные масштабы извержений были значительно больше, но позже подверглись эрозии.

Формирование сибирских траппов стало причиной колоссальных выбросов углекислого газа (CO<sub>2</sub>), диоксида серы (SO<sub>2</sub>), хлорида водорода (HCl) и других летучих веществ. Эти газы резко усилили парниковый эффект и вызвали стремительное потепление после вулканической зимы. Концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере достигала 8 000 ppm, что в 20 раз превышает современные уровни. В результате температура тропических морей поднялась с 22–25 °C до 30 °C, а океаны начали закисляться, убивая организмы с карбонатными скелетами.

Общий выброс серы составлял до 7 800 гигатонн, хлора — до 8 700 гигатонн, а фтора — до 13 600 гигатонн<sup>52</sup>.

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

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



**Рис. 82**  
Художественное изображение извержений в Сибири во время пермо-триасового вымирания.

Иллюстрация: Image by Tigran Nshanyan

**Рис. 83**  
Художественное изображение: листрозавры, пережившие массовое вымирание, доминируют в опустошённом ландшафте, иллюстрируя изменение экосистемы после пермо-триасового кризиса.

Иллюстрация: Жулио Ласерда (Julio Lacerda)

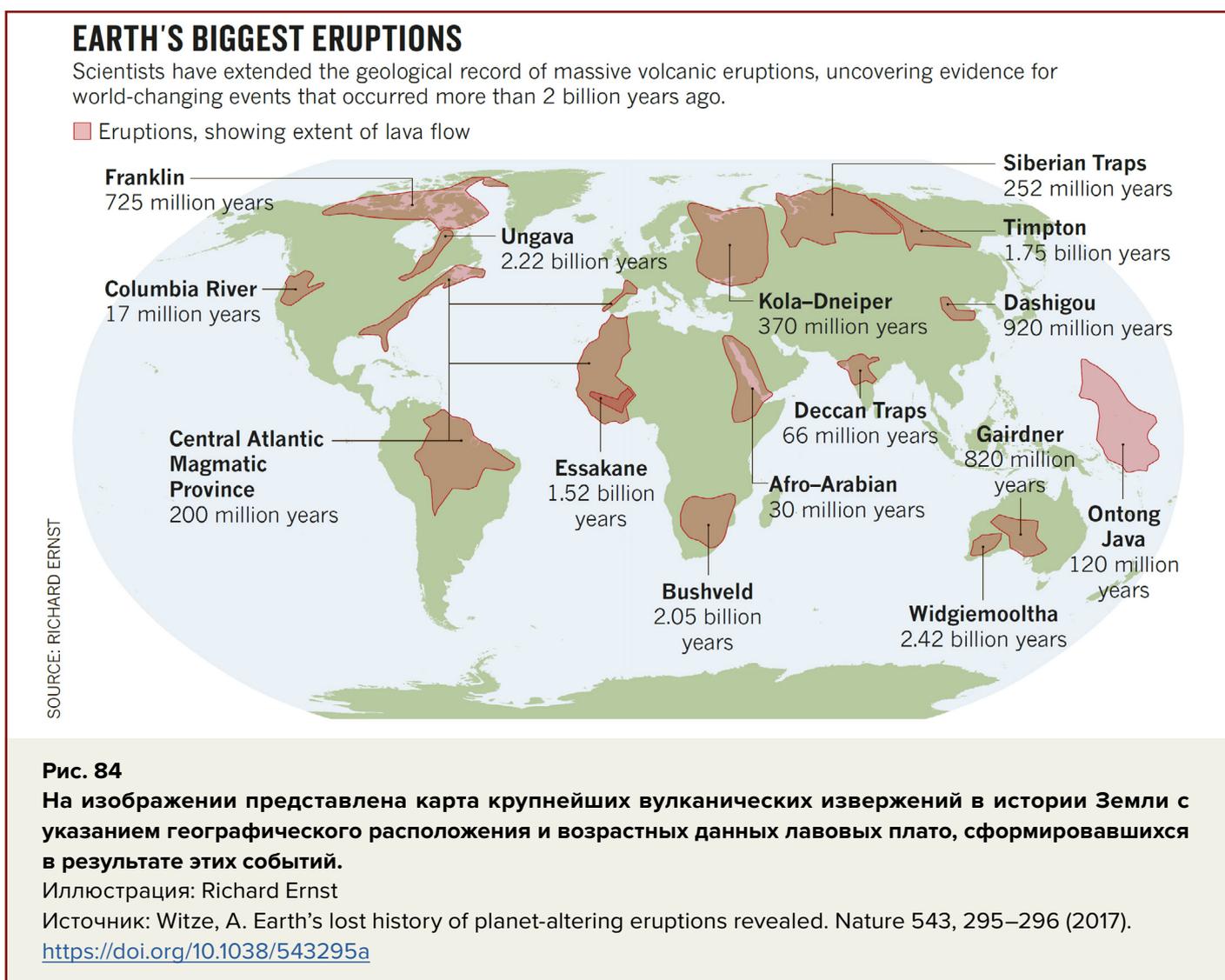


Вулканический пепел и аэрозоли блокировали солнечный свет, нарушили фотосинтез, вызвали массовое исчезновение лесов и разрушение пищевых цепочек, что усугубило вымирание как растительных,

так и животных видов. Экологический кризис тех времён служит свидетельством масштаба возможных последствий даже при постепенном извержении Сибирского плюма.

Согласно исследованиям, период извержений, начавшийся 250 млн лет назад, был вызван подъёмом мантийного плюма — мощного потока магмы, поднимающегося из глубин Земли в районе современного плато Путорана. Повторение такого сценария сегодня приведёт к формированию обширных лавовых плато — одних из крупнейших геологических формирований на планете,

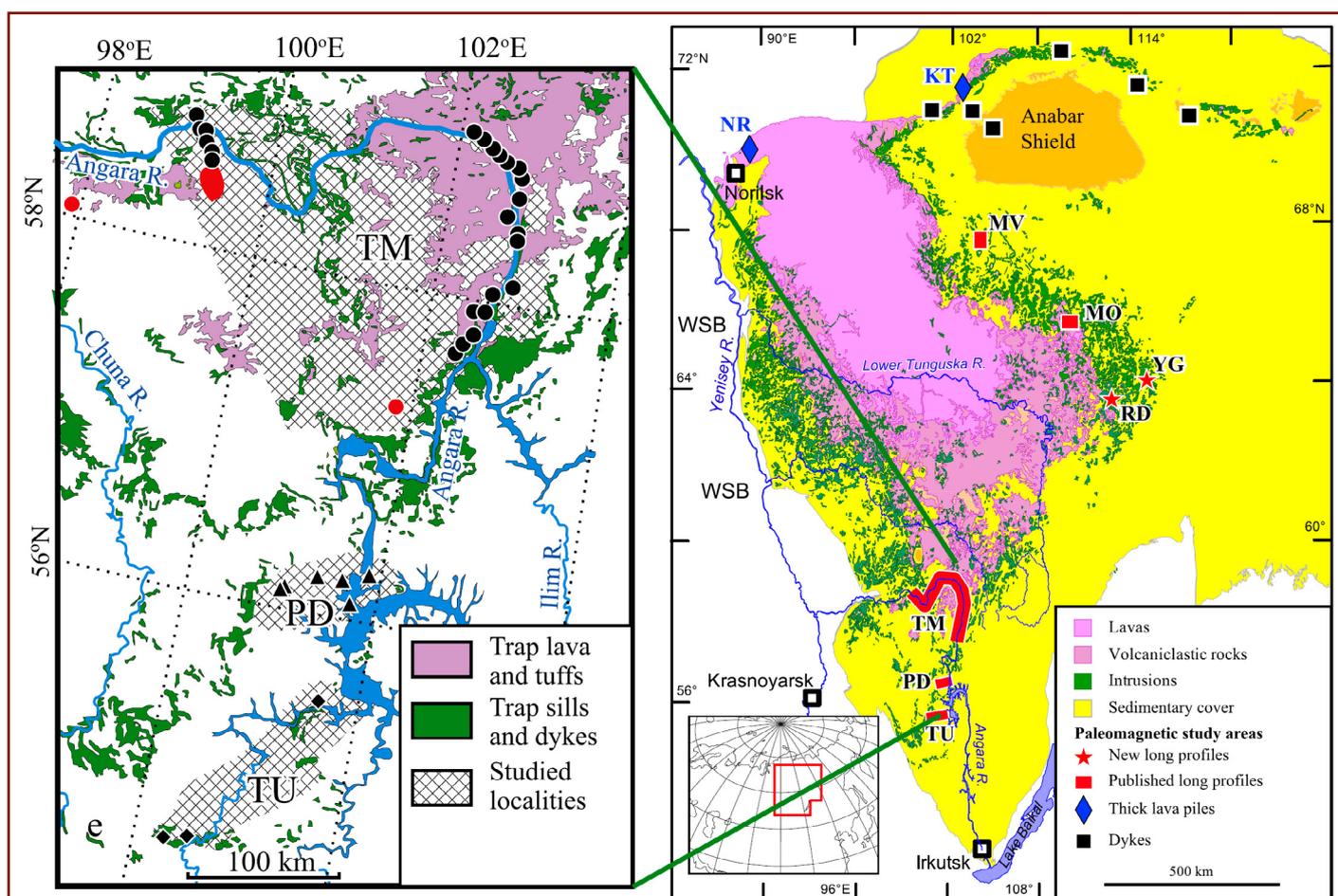
которые уничтожат практически всю жизнь в радиусе нескольких тысяч километров, охватив территории Сибири и соседние регионы. Геологическая летопись свидетельствует о том, что подобные катастрофы, сопровождающиеся излиянием гигантских базальтовых полей<sup>53</sup>, происходили неоднократно, вызывая каждый раз масштабные массовые вымирания (рис. 84).



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

Как и в предыдущие геологические эпохи, магма будет подниматься из мантии, проникая через трещины в земной коре, подобно тому, как мягкое вещество просачивается через плотный фильтр. Этот процесс приведёт к перегреву поверхности, образованию множества внутрикоровых магматических интрузий и плавлению литосферы. На рисунке 85 отображено распределение эффузивных пород в Сибири: фиолетовым

цветом показаны лавовые потоки, а зелёным — магматические тела, застывшие в земной коре. Зелёные зоны на карте демонстрируют, как магма, разъедая земную кору, формировала трещины и проникала вдоль этих ослабленных зон. Подобное усиленное давление магмы способно снова вызвать аналогичный процесс.



**Рис. 85**

Справа: Обзорная карта Сибирской трапповой провинции (упрощённая и модифицированная по Svensen et al., 2009). На обзорной карте различными цветами обозначены основные геологические структуры: розовым показаны лавовые потоки, зелёным — интрузивные тела, жёлтым — осадочный чехол. Слева: на детальной карте левой части рисунка представлено распределение траппового магматизма: фиолетовым цветом показаны лавы и туфы, зелёным — sillы и дайки.

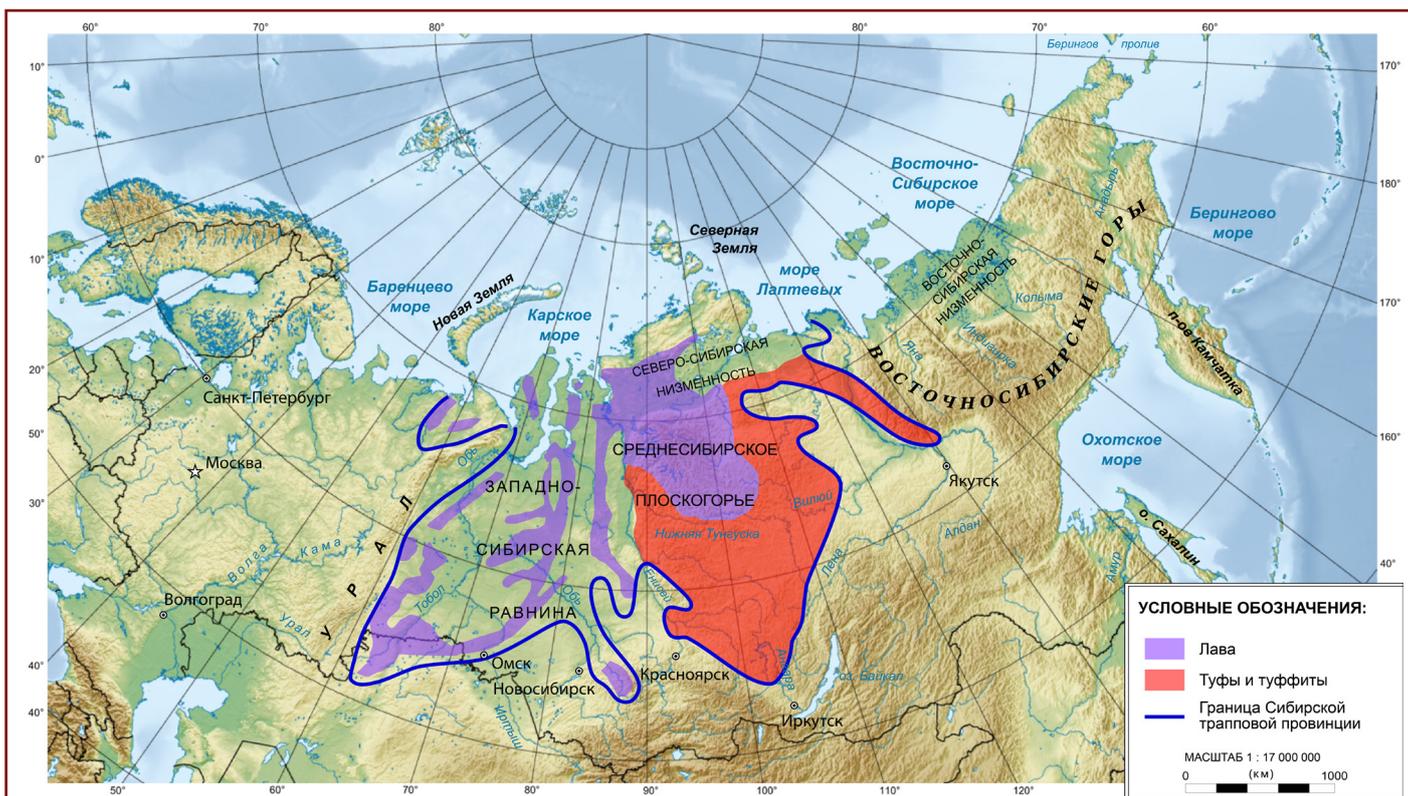
Источник: Konstantinov, K. M., Bazhenov, M. L., Fetisova, A. M., & Khutorskoy, M. D. (2014). Paleomagnetism of trap intrusions, East Siberia: Implications to flood basalt emplacement and the Permo–Triassic crisis of biosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 242-253.

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

Сценарий постепенного извержения сопоставим с одномоментным взрывом Сибирского плюма, но растянут по времени. Это можно представить как череду вулканов, извергающихся каждую неделю, наряду с внезапными трещинами, через которые будут течь базальтовые лавы по всей Западной Сибири. На карте (рис. 86) фиолетовым цветом обозначены области лавовых потоков. В районе более плотной и устойчивой коры Восточно-Сибирской платформы лавы растекались по площади, а на территории Западной Сибири, которая характеризуется более тонкой, молодой и неоднородной корой, извержения происходили вдоль вытянутых провалов или рифтов. Красным на карте обозначены зоны туфов, состоящих

из сцементированных пирокластических обломков и пепла.

Следует отметить, что извержения в Восточной и Западной Сибири будут отличаться. Под Восточной Сибирью магма сталкивается с плотным архейским кратоном, что создаёт значительный барьер. В процессе подъёма магма «въедается» во вмещающие породы, остывает и насыщается летучими компонентами, что может привести к взрывным извержениям с высоким выбросом пепла и возможным образованием кислой вязкой магмы. В то время как под Западной Сибирью, где кора тонкая и молодая, предполагается преобладание излиятий жидких базальтовых лав.



**Рис. 86**

**Карта Сибирской трапповой провинции. На карте представлены основные геологические структуры, включая районы распространения лавовых потоков (фиолетовый цвет) и туфов с туффитами (пурпурный цвет). Синие линии обозначают границы Сибирской трапповой провинции.**

Источник: [wikipedia.org](http://wikipedia.org), по данным Masaitis, 1983 г.

Ожидается, что площадь, покрытая лавовыми потоками и туфами, составит около 7 млн км<sup>2</sup> в Западной и Восточной Сибири, что сопоставимо с территорией современной Австралии. Однако площади, подверженные деградации, вероятно, превысят десятки миллионов квадратных километров. Эти территории будут подвергаться масштабным пожарам, эрозии вследствие кислотных дождей, пеплопадам, оползням и селям, несущим вулканические осадки. Вся вечная мерзлота Сибири будет подвержена разрушению.

Стоит отметить, что на полуострове Таймыр, к западу от плато Путорана, расположены крупнейшие в мире месторождения никеля, меди и металлов платиновой группы, разрабатываемые компанией «Норникель». Эти месторождения имеют магматическое происхождение и сформировались около 250 млн лет назад в ходе извержений

Сибирской трапповой магматической провинции, что способствовало образованию уникальных рудных узлов. Высокая концентрация никеля в магмах того времени, вероятно, была связана с выносом веществ ядра Земли на поверхность. В настоящее время наблюдается подъём магматического плюма в Сибири, ускорение которого было вызвано смещением ядра в 1998 году в направлении полуострова Таймыр, что было установлено доктором наук Юрием Баркиным. В ближайшем будущем есть высокий риск прорыва Сибирского плюма в районе города Норильск, в том же самом месте, где это произошло 250 млн лет назад.

Далее мы рассмотрим последствия этого сценария для России и всего мира.

## Последствия постепенного прорыва Сибирского плюма для России

Существуют исследования, точно определяющие расположение астеносферных расплавленных линз в литосфере южной части Сибири, что объясняется тонкой корой этого региона. Однако северная часть Сибири на сейсмических картах остаётся практически неизученной, представляя собой «белое пятно» в исследованиях нижней коры и мантии. Это делает невозможным прогноз мест первых прорывов лавы и извержений насыщенных газами магм, особенно с учётом отсутствия полноценного мониторинга недр в зоне Сибирского плюма.

Известно, что первыми признаками надвигающейся катастрофы станут учащённые землетрясения и локальные выбросы газа по краям Сибирского блока земной коры. При продвижении магмы к поверхности начнётся стремительное таяние вечной мерзлоты, что может привести к разрушению инфраструктуры на мерзлотных грунтах. Также вслед за нагревом почвы возможны взрывы газогидратов (метана в структуре льда), что вызовет появление крупных воронок и уничтожение населённых пунктов. Массовые пожары станут неизбежностью, обусловленной выходом метана, перегревом почвы и высвобождением вулканических газов. Углеводороды в месторождениях Сибири и угольные бассейны, такие как Кузбасс, могут загореться, как это уже происходило в перм-триасовый период<sup>54</sup>, когда угольные залежи подвергались термическому нагреву до 600 °С.

Извержения начнутся внезапно, охватывая множество мест на обширной территории. Землетрясения магнитудой 7–8, трещины и разломы приведут к разливу лавы на сотни тысяч квадратных километров. В областях вокруг прорывов лавы произойдёт массовая гибель растений, животных и людей из-за токсичных выбросов, которые образуют в атмосфере ядовитый «коктейль». Уже в первые дни погибнут миллионы людей, а вулканический пепел уничтожит транспортное сообщение, оседая на дорогах и путях, ухудшая видимость и разрушая инфраструктуру. Авиация также полностью прекратит работу из-за опасности, которую представляет пепел для двигателей самолетов и вертолётов.

Таяние вечной мерзлоты ещё больше усугубит ситуацию: пути сообщения, трубопроводы, здания и коммуникации начнут разрушаться. Многие города окажутся без доступа к снабжению водой, продовольствием и электричеством, что вызовет гуманитарный кризис. Массовая эвакуация окажется невозможной в значительной части ареала извержения, так как лава, газы, пожары и кислотные дожди сделают транспортные пути непригодными. Паника охватит миллионы людей; эвакуация миллионов жителей Сибири приведёт к социальной нестабильности и массовым беспорядкам.

<sup>54</sup>Elkins-Tanton, L. T., Grasby, S. E., Black, B. A., Veselovskiy, R. V., Ardakani, O. H., & Goodarzi, F. (2020). Field evidence for coal combustion links the 252 Ma Siberian Traps with global carbon disruption. *Geology*, 48(10), 986-991. <https://doi.org/10.1130/G47365.1>

Экономика страны понесёт катастрофические потери: добыча нефти, газа, угля, алмазов и металлов прекратится из-за физического уничтожения инфраструктуры, что приведёт к остановке предприятий, дефициту сырья и электроэнергии. Вулканическая активность разрушит природные богатства региона, включая нефть и уголь, уничтожив ключевые экономические активы страны.

Спустя десятилетия после извержения Сибирь останется зоной экологического бедствия. Постигшая Россию катастрофа

необратимо изменит её географию, экономику и общество. Только 25 % территории страны останется пригодной для жизни, но она столкнётся с огромным давлением экологического и социального кризисов.

Экономические позиции, исторические памятники и большая часть природных богатств будут утрачены, а Сибирь станет непригодной для существования современной цивилизации.

## **Последствия постепенного прорыва Сибирского плюма для всего мира**

Глобальные последствия извержения Сибирского плюма затронут весь мир, и произойдёт это в несколько этапов.

В первые дни прекратится транспортное сообщение через Сибирь между Европой и Азией, а авиационные перевозки остановятся из-за вулканического пепла в атмосфере. Эти процессы нарушат глобальную логистику, вызвав масштабный продовольственный кризис, поскольку Россия как один из ведущих экспортёров продовольствия прекратит поставки пшеницы и других продуктов. Нарушение экспорта нефти, газа и других сырьевых ресурсов России приведёт к скачку цен, энергетическому кризису и экономической нестабильности во многих странах. Мировая экономика столкнётся с цепной реакцией финансовых и социальных потрясений.

Облака пепла и сернистых аэрозолей вызовут эффект глобального затемнения, снижая поступление солнечного света. Это приведёт к «вулканической зиме» с падением температур на 2–3 °С. Кислотные дожди и

загрязнение почв нанесут ущерб сельскому хозяйству не только в России, но и во всём мире. Массовый голод, нехватка воды, токсичный воздух и разрушение климатической системы приведут к постепенной гибели миллиардов людей и животных. Через несколько лет социальные системы рухнут.

Со временем вулканический пепел начнёт оседать, но произойдут резкие климатические изменения. Выброс метана и углекислого газа из-за таяния вечной мерзлоты приведёт к усилению парникового эффекта. Температура начнёт постепенно повышаться на 5–10 °С, что приведёт к неустойчивому климату, характеризующемуся резкими перепадами температуры. Разрушение озонового слоя приведёт к росту уровня ультрафиолетового излучения в Северном полушарии, усугубляя последствия извержений.

Несмотря на удалённость от Сибири, Европа столкнётся с серьёзными последствиями извержения Сибирского плюма: пепел накроет

Северную и Восточную Европу, вызывая многочисленные респираторные заболевания у населения. Кислотные дожди уничтожат леса, городскую инфраструктуру и сельхозугодья. После фазы временного похолодания начнётся резкое потепление, сопровождающееся засухами на юге и наводнениями в центральной и северной части Европе. Массовая миграция из России, Азии и Ближнего Востока вызовет демографический кризис и обострит конкуренцию за ресурсы. Европейские страны будут бороться с непрерывными экологическими, экономическими и социальными вызовами.

Азия, находящаяся ближе всего к эпицентру извержений, примет основной удар на себя. Загрязнение воздуха пылью и пеплом спровоцирует удушье и кислотные дожди, особенно в Китае, Монголии и Казахстане.

## **Долгосрочные последствия постепенного прорыва Сибирского плюма для планеты**

Постепенное извержение Сибирского плюма вызовет масштабные долгосрочные последствия, которые радикально изменят планету на миллионы лет. Атмосфера подвергнется глобальному загрязнению токсичными веществами, что приведёт к образованию кислотных дождей планетарного масштаба и разрушению озонового слоя. Океаны подвергнутся критическому закислению, которое вызовет массовую гибель морских организмов. Эти процессы приведут к краху морских экосистем, нарушению глобальных пищевых цепей и коллапсу всего морского биоразнообразия.

На суше массовое вымирание станет неизбежным из-за токсичных выбросов в атмосферу, разрушения почвенных экосистем и исчезновения большинства растений. Утрата

Сельское хозяйство северного Китая, ключевого продовольственного региона, будет уничтожено из-за недостатка солнечного света и ухудшения качества почвы. Перепады температур разрушат инфраструктуру и сельскохозяйственные системы по всему континенту. Постепенный рост температуры океанов вызовет обескислороживание воды, что уничтожит морские экосистемы, и приведёт к краху рыболовства.

С течением времени последствия продолжающихся извержений станут только разрушительнее. Климатические и экологические кризисы обострятся, человечество утратит многие современные технологии и знания, подвергнувшись глубокому откату в развитии. Мировая цивилизация окажется на грани коллапса.

опылителей приведёт к краху наземных экосистем. Предполагается, что вымирание затронет от 75 до 95 % всех существующих видов.

В результате извержения произойдёт комплексный климатический, биологический и геологический кризис, который полностью трансформирует биосферу Земли. Этот процесс приведёт к коллапсу человеческой цивилизации, гибели миллиардов человек и откату выживших разрозненных групп людей до уровня развития каменного века. Масштабы этой катастрофы будут сопоставимы с крупнейшими массовыми вымираниями в истории Земли, что откроет новый эволюционный этап биосферы не менее чем через миллионы лет.

## Сценарий 3.

### Плановая контролируемая дегазация

#### Существующие методики вулканической геоинженерии

Учитывая возрастающее напряжение под Западно-Сибирской плитой и Восточно-Сибирским кратоном, связанное с подъёмом Сибирского плюма, необходимо предпринять безотлагательные меры для минимизации возможных катастрофических последствий. Одним из таких решений является контролируемый сброс давления, лавы и газов из вторичных магматических очагов, то есть плановая контролируемая дегазация.

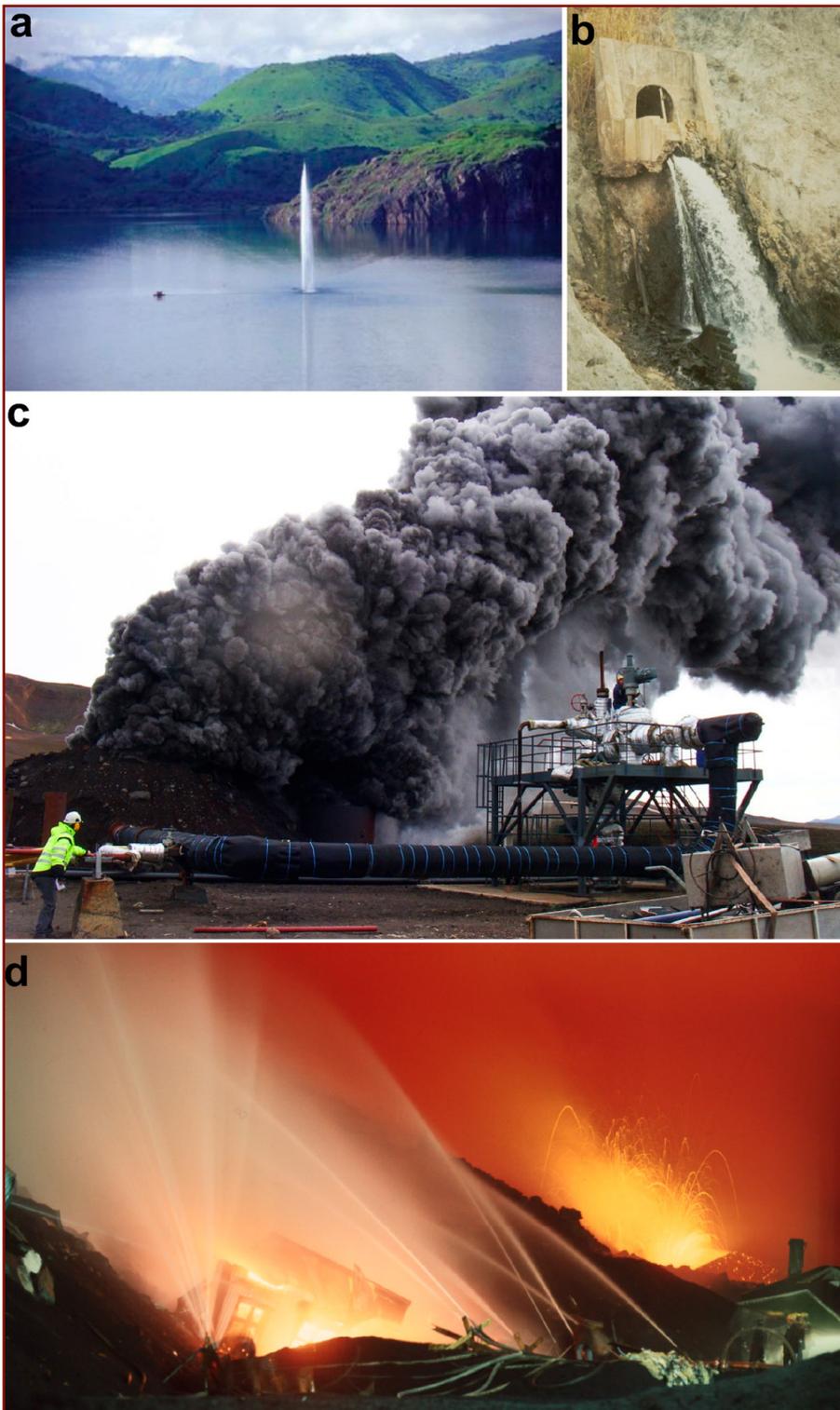
Современные научные исследования рассматривают дегазацию магматических камер как перспективный метод предотвращения масштабных извержений. Этот подход даёт основания для применения технологий вулканической геоинженерии не только на вулканах или супервулканах, но и для управления активностью магматических плюмов. Концепция контролируемой дегазации нашла отражение в ряде научных публикаций и патентов, разработанных специалистами из разных стран.

Теоретические основы вулканической геоинженерии были заложены начиная с XX века, а практические эксперименты проводились на протяжении последнего столетия. Методы вулканического вмешательства включали бурение кратеров, осушение вулканических озёр, создание

каналов для отвода лавы, охлаждение потоков лавы морской водой, бомбардировку лавовых потоков и откачку парниковых газов (углекислого газа и метана) (рис. 87).

С 1960-х годов Геологическая служба США (USGS) осуществляла бурение в областях лавовых озёр на вулкане Килауэа на Гавайях для перенаправления лавы. Аналогичные инициативы реализуются в Японии, Исландии и Италии. Например, в Японии тестировались технологии снижения давления в магматических камерах, а в Исландии был успешный опыт перенаправления лавы на острове Хеймаэй, где потоки охлаждали водяными пушками. В Италии развиваются системы раннего предупреждения, а также методы управления лавовыми потоками; примером может служить взрывное разрушение лавовых барьеров на Этне в 1983 году.

Сегодня проводятся международные научные конференции и симпозиумы, посвящённые глубокому бурению в зонах вулканической и геотермальной активности, что расширяет перспективы применения вулканической геоинженерии для предотвращения извержений и снижения их последствий на глобальном уровне.



**Рис. 87**

**а) Дегазация углекислого газа из озера Ниос, Камерун, по данным Halbwachs et al. (2020).**

**б) Дренажный туннель в стене кратера вулкана Келуд, Индонезия (Глобальная программа вулканизма, изображение GVP-01120).**

**в) Попутное бурение магматического кармана в Крафле, Исландия, в 2009 году (изображение от GO Friðleifsson/IDDP).**

**д) Охлаждение потоков лавы закачиваемой морской водой в Хеймаэй в Исландии в 1973 году, Тристинн Х. Бенедиктссон.**

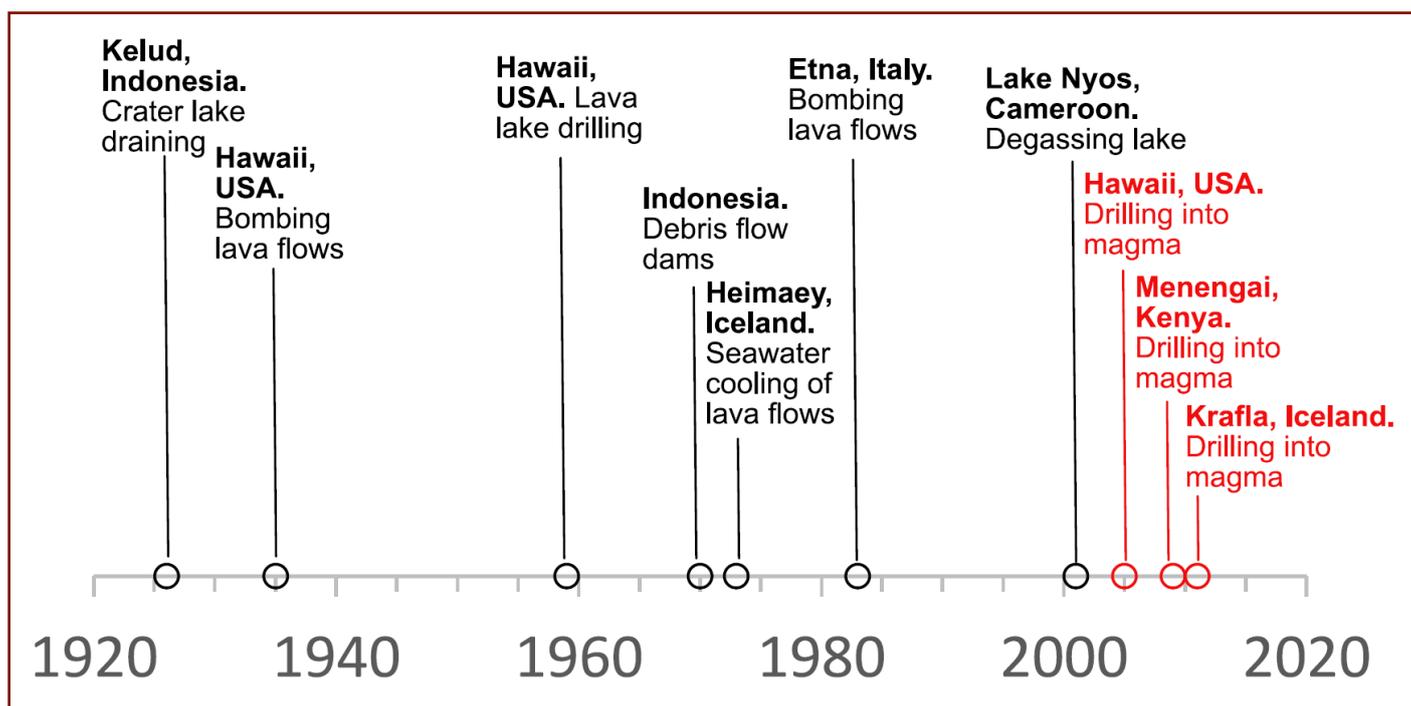
Источник: Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). The Ethics of Volcano Geoengineering. *Earth's Future*, 11(10), e2023EF003714.

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

На диаграмме (рис. 88) представлена хронология наиболее примечательных случаев вулканического геоинжиниринга. Чёрные круги обозначают целенаправленные вмешательства, а красные — непреднамеренные воздействия на вулканическую активность.

Существуют также запатентованные методики плановой дегазации и снижения рисков извержения вулканов и супервулканов.

Например, принцип одной из технологий, запатентованной двумя российскими специалистами, заключается в предотвращении неконтролируемого лавинообразного извержения вулканов с помощью наклонного бурения скважин и регулирования давления в магматических камерах (рис. 89).



**Рис. 88**

Хронология некоторых примечательных случаев вулканического геоинжиниринга. Чёрные круги обозначают целенаправленные вмешательства, тогда как красные круги обозначают непреднамеренные вулканические вмешательства.

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



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

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

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
04.04.2007

(45) Опубликовано: 10.01.2009 Бюл. № 1

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2098850 C1, 10.12.1997. SU 1193223  
A, 23.11.1985. RU 2073769 C1, 20.02.1997. RU  
2057839 C1, 10.04.1996. RU 2231092 C2,  
20.06.2004. SU 1699979 A1, 23.12.1991. US  
4319648 A, 16.03.1982.Адрес для переписки:  
109145, Москва, Жулебинский б-р, 1, кв.82,  
Г.К.Мкртумяну(72) Автор(ы):  
Мкртычян Олег Альбертович (RU),  
Мкртумян Георгий Каропетович (RU)(73) Патентообладатель(и):  
Мкртычян Олег Альбертович (RU),  
Мкртумян Георгий Каропетович (RU)

## (54) СПОСОБ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЛАВИНООБРАЗНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ

(57) Реферат:

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

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

5 0 8 C 1

RU 2 3 4 3 5 0 8 C 1

## Рис. 89

## Патент: Способ предотвращения лавинообразного извержения вулканов.

Изобретение относится к способам предотвращения неконтролируемого лавинообразного извержения вулканов и организации контролируемого транспортирования магмы для её использования в строительстве. Это повышает эффективность подхода.

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.

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

Другая технология разработана американским изобретателем (рис. 90). Данная технология описывает методы откачки магмы из вулканических магматических камер, таких как камера в Йеллоустонском супервулкане, с целью предотвращения возможного катастрофического извержения.

Основная идея заключается в создании искусственных каналов (труб) для вывода магмы на поверхность, где она может быть обработана и использована, например, для получения энергии.

(12) **United States Patent**  
**Stratford**

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

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

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

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

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

FOREIGN PATENT DOCUMENTS

(21) Appl. No.:	<b>10/230,549</b>	GB	2362410	11/2001
(22) Filed:	<b>Aug. 29, 2002</b>	JP	070071020 A	3/1995
(65) <b>Prior Publication Data</b>		JP	100076104 A	3/1998
	US 2003/0145592 A1 Aug. 7, 2003	JP	100077952 A	3/1998
		JP	100078497 A	3/1998

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

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

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

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

(56) **References Cited**  
U.S. PATENT DOCUMENTS

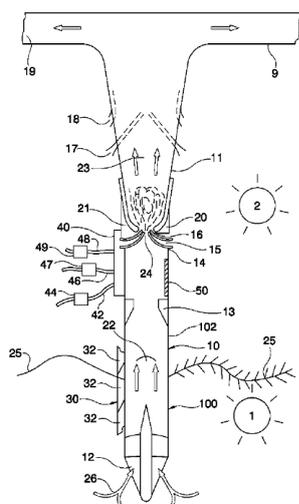
3,115,194 A \* 12/1963 Adams ..... 376/273

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

(57) **ABSTRACT**

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

**25 Claims, 2 Drawing Sheets**



**Рис. 90**  
**Патент: Системы эвакуации магмы для предотвращения взрывов супервулканов.**

Аппарат контролирует откачку вулканической магмы, для предотвращения взрывов. Откачка магмы осуществляется через одну эвакуационную трубу, в которой нагревается поток магмы для предотвращения её слипания в трубе. Для нагрева могут использоваться малые камеры сгорания для подачи пара, который в свою очередь нагревает и стабилизирует поток магмы. При необходимости стабильность поддерживается центральным охлаждением с помощью струй воды из форсунок, расположенных на стенках трубы.

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

Также примером успешной дегазации является японский проект «[Научное бурение вулкана Ундзен](#)» (USDP). Это 6-летняя инициатива, начатая в апреле 1999 года и направленная на изучение истории роста, подповерхностной структуры и процессов подъёма магмы вулкана Ундзен (рис. 91). Первая фаза включала бурение двух скважин на склонах вулкана и создание

модели его структуры. Вторая фаза фокусировалась на бурении канала магмы извержений 1990–1995 годов для анализа механизма дегазации. Для успешного бурения была разработана стратегия, включающая вертикальное бурение с последующим увеличением наклона ствола скважины (рис. 92).



**Рис. 91**  
Буровое оборудование для бурения вулкана Ундзен в 1995 году.

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

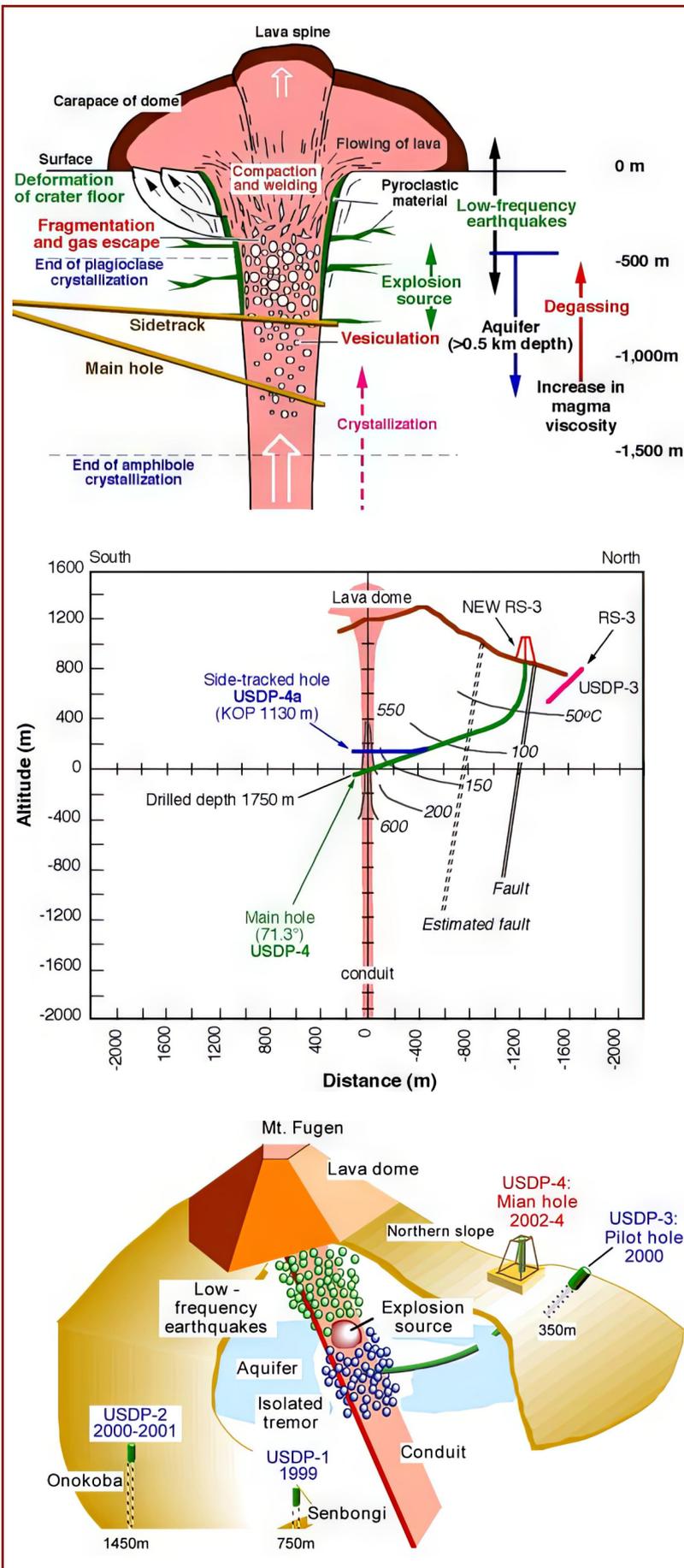


Рис. 92

а) Изображение лавового купола и верхней части шахты вулкана Ундзен. Действенная дегазация из вспененной магмы происходила при её расщеплении и прокаливании в верхней части шахты. Состояние шахты было изучено при бурении основного ствола (USDP-4) в 2003 году, а непрерывный отбор образцов-кернов был осуществлён при бурении бокового ствола (USDP-4a) в 2004 г.

Источник:

Проект USDP. Институт исследования землетрясений, Токийский университет. Режим доступа: 31 декабря 2024 года

<https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20>

б) Траектории бурения шахты. Из точек New RS-3 и RS-3 предполагается осуществлять бурение основного и бокового стволов и пилотной скважины соответственно.

Источник:

Проект USDP. Институт исследования землетрясений Токийского университета. Данные взяты 31 декабря 2024 г. с веб-страницы

<https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20>

в) Трёхмерная схема бурения шахты

Источник:

Центр исследования вулканических жидкостей. Обзор системы шахт вулкана Ундзен. Институт исследования землетрясений Токийского университета. Данные взяты 31 декабря 2024 г. с веб-страницы <https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/vrc/usdp/conduit.html>

На сегодняшний день человечество обладает достаточным технологическим и инженерным потенциалом для внедрения в вулканические системы, но каждый случай плановой дегазации требует максимально тщательной подготовки, анализа большого массива данных и точнейшего расчёта. И даже в этом случае риски остаются.

Приведённые примеры были испытаны на обычных вулканах, которые, безусловно, отличаются по размерам от масштабов гигантского магматического плюма в Сибири. Этот плюм представляет собой угрозу, значительно превышающую даже мощь одного супервулкана, сравнимую с энергией взрывов тысячи кальдер Йеллоустона. Тем не менее, обсуждение данной проблемы приобрело актуальность именно благодаря тому, что существуют потенциальные подходы для её решения.

При должном подходе человечество способно разработать программу дегазации магматического плюма, основанную на глобальных наработках специалистов. Её главной задачей станет минимизация последствий подъёма Сибирского плюма путём снижения давления лавы и газов во вторичных магматических очагах, что позволит предотвратить масштабные неконтролируемые извержения.

Реализация такой программы потребует тесного международного сотрудничества, консолидации усилий учёных и инженеров со всего мира. Только объединённый подход позволит выработать эффективные решения, направленные на обеспечение безопасности всего человечества.

## **Пример программы плановой дегазации Сибирского плюма**

Программа может включать в себя одновременно разработку нескольких направлений:

### **1. Создание сети мониторинга**

1.1 Необходимо будет создать сеть высокочувствительных датчиков и спутникового наблюдения для мониторинга сейсмической и термальной активности в регионе. Это позволит своевременно обнаруживать зоны внедрения вторичных очагов.

1.2 Понадобится провести детальное картирование вторичных магматических очагов с использованием методов сейсморазведки. Важно будет предварительно оценить давление и объём магмы в каждом вторичном очаге.

1.3 Затем необходимо будет пробурить научно-исследовательские, мониторинговые скважины и установить датчики давления, температуры и сейсмической активности в аномальных зонах.

## **2. Разработка технологии контролируемой дегазации и блокировки магматических каналов**

2.1 Необходимо будет разработать план бурения наклонных глубоких скважин (на глубину до 8 км) в безопасных зонах. Потребуется детальный расчёт траекторий наклонных скважин для достижения вторичных очагов. Необходимо будет использовать технологии бурения, устойчивые к высоким температурам и давлению, то есть использование жаропрочных материалов для укрепления стенок скважин, создание системы мониторинга давления и температуры в скважинах.

2.2 Потребуется разработать процесс отвода газов и лавы через поэтапное управление давлением во вторичных очагах с помощью системы. Для этого необходим контроль за скоростью дегазации для предотвращения резких перепадов давления и использование системы компрессоров для управления давлением газов. Потребуется использование системы фильтрации и охлаждения, чтобы предотвратить выбросы токсичных веществ в атмосферу. Вывод лавы и газов будет проводиться до стабилизации давления в каждом из очагов.

2.3 Затем необходимо будет разработать план направленного ядерного взрыва в определённых скважинах для перекрытия пластов над вторичным магматическим очагом. Это позволит предотвратить излишний выход магмы на поверхность и минимизировать выброс пепла.

Постепенный сброс давления обеспечит стабильность Сибири и защитит основные населённые пункты, кроме, возможно, Норильска и окружающих его населённых пунктов.

2.4 В процессе отвода лавы из очагов необходимо будет контролировать по возможности её разливы. Предпринимать усилия по направлению её через специально подготовленные каналы в сторону арктических морей. Разработать программу использования магмы для строительства (например, для создания искусственных островов или укрепления береговой линии).

## **3. Эвакуация населения**

Потребуется внедрить систему раннего предупреждения и разработать планы эвакуации на случай непредвиденных ситуаций. Также потребуется плановая организация безопасной эвакуации населения из зон риска и его адаптации, социального обеспечения, с учётом возможности долгосрочного переселения.

## **4. Сохранение инфраструктуры**

Необходимо разработать планы по защите и эвакуации стратегических объектов из зон, подверженных риску затопления лавой. Создание резервных хранилищ на безопасных территориях для эвакуированных стратегических ресурсов региона, таких как нефть, газ, цветные и драгоценные металлы, руды, удобрения, продовольствие, вода, медикаменты.

## Обоснование выбора места заложения научно-исследовательских скважин для мониторинга динамики современного магматического плюма Сибири

Для понимания того, как быстро и в каком направлении происходит внедрение плюма и растекание его головы, проникновение по трещинам в земную кору, самым первым шагом необходимо осуществлять мониторинг геотермальных и геофизических параметров на глубине. Для таких исследований необходимо бурение новых скважин и проводить в них регулярные

измерения температуры, давления, отбор проб газового состава и маркеров усиления магматических процессов, сейсмических шумов и других параметров.

Для этих исследований были намечены 10 точек для бурения научно-исследовательских скважин (рис. 93, 94).

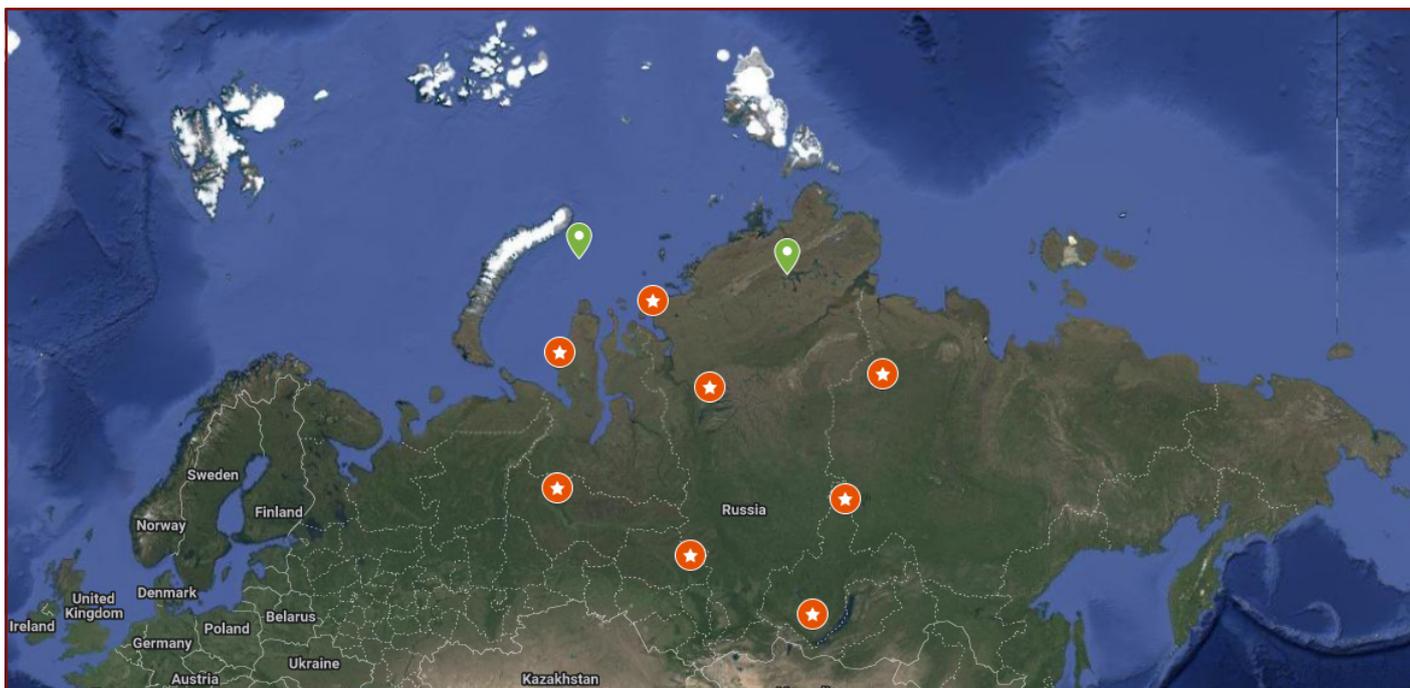


Рис. 93

Предварительное местоположение 10 рекомендуемых точек для бурения научно-исследовательских скважин

Название скважины	Населенный пункт или инфраструктура рядом	Координаты X (Latitude)	Координаты Y (Longitude)	Разрез
Ц 1	Красноярский край, Норильск, район Талнах	69.4459423	88.7670478	П-ов Таймыр
ЗСЗ 2	полуостров Ямал, месторождение Харасавэй	71.1849618	66.9830117	Западная Сибирь
ЗЮЗ 3	ХМАО, Белоярский район, Кислорское месторождение	63.6572613	66.5569363	Западная Сибирь
ЮЗ 4	п. Центральный в Верхнекетском районе Томской области	58.9454	86.0127	Западная Сибирь
Ю 5	деревня Чичкова, Чичковское муниципальное образование, Усть-Удинский район, Иркутская область	54.19598	103.7021	Восточная Сибирь
ЮВ 6	село Наканно в Катангском районе Иркутской области	62.89873	108.45027	Восточная Сибирь
В 7	село Жилинда в Оленёкском районе Якутии	70.1528916	113.9261131	Восточная Сибирь
СЗ 8	поселок Диксон в Таймырском Долгано-Ненецком районе Красноярского края	73.50246	80.5498	П-ов Таймыр
СВ 9	Месторождение Свинец-Цинк на СЗ от озера Таймыр, п-ов Таймыр	74.52147	100.02184	Восточная Сибирь
СЗ 10	Карское море, площадка Рогозинская-1	75.16298	69.74128	Западно-Арктическая платформа

Рис. 94

Таблица 10 рекомендуемых скважин для научно-исследовательского бурения с целью мониторинга продвижения Сибирского плюма, включающая название скважины, координаты, населённый пункт или инфраструктуру рядом, геологическое строение разреза

**Критерии выбора этих скважин основывались на следующих принципах:**

1. Расположение скважины относительно наибольшего пересечения тепловых и геодинамических аномалий, ассоциированных с внедрением и растеканием головы плюма. Исходя из этого принципа, одна скважина была намечена в районе центральной части предполагаемого поднятия головы плюма, 7 скважин были намечены по периметру предполагаемого растекания магмы. Ещё одна скважина была намечена в районе Байкала, в направлении предполагаемого активного продвижения магмы под подошвой Восточно-Сибирского кратона. И ещё одна скважина была намечена в районе Карского моря для мониторинга продвижения плюма под океанической корой Арктического шельфа.
2. Расположение скважин выбиралось оптимально для дальнейших работ по сейсмотомографии, чтобы информация с сейсмических датчиков в скважинах при последующем преобразовании могла дать наиболее чёткое 3D-изображение. То есть чтобы сетка сейсмодатчиков в скважинах
3. Места скважин выбирались с учётом возможности доставки оборудования для бурения и обеспечения подъездных путей (транспортной доступности). Так как на севере Западной и Восточной Сибири крайне труднопроходимые территории, болотистые ландшафты, мало дорог, экстремальные климатические условия, то выбор площадок для бурения опирался на расположение уже существующей инфраструктуры для проведения научно-исследовательских работ: наличие дорог, населённых пунктов, действующих буровых площадок. Две точки были выбраны на действующих на данный момент нефтяных месторождениях, принадлежащих компаниям «Газпром» и «Роснефть», остальные расположены в районах рядом с месторождениями нефти, газа и других полезных ископаемых. Необходимо отметить, что при невозможности пробурить скважины в указанных координатах допускается смещение скважин на 10–20 км в любых направлениях.

была расположена оптимально для сейсмотомографии недр.

## **Рекомендуемые методы исследований в скважинах**

Для комплексного мониторинга и изучения мантийного плюма необходим сбор следующих параметров с датчиков в научно-исследовательских скважинах.

**1. Температурный мониторинг:** измерение температуры на различных глубинах для анализа термических аномалий и усиления геотермального потока в результате продвижения магмы в области растекания плюма.

**2. Давление:** определение давления в скважине для оценки изменений гидродинамических условий в результате активности магмы и флюидной фазы.

**3. Отбор проб газов:** сбор проб газов, поступающих из глубинных пластов, для изучения их состава и возможного влияния магматической активности.

**4. Сейсмические исследования:** установка как стандартных, так и широкополосных сейсмических датчиков для регистрации

сейсмической активности с целью создания детализированной сейсмотомографии земной коры и мантии для постоянного мониторинга состояния плюма.

**5. Состав пластового флюида:** изучение состава пластовых жидкостей для идентификации возможной термальной или магматической подпитки.

**6. Геомеханические исследования:** измерение напряжений в породах для анализа напряжённого состояния литосферы, испытывающей деформации от внедрения плюма.

**7. Электромагнитные методы:** проведение электромагнитных исследований для фиксации изменений электрических свойств сред, связанных с внедрением магмы.

Собранные данные будут служить основой для построения комплексной модели динамики мантийного плюма, а также для оценки его влияния на геологические процессы в Сибири.

## **Особенности бурения и проведения блокировки магматических каналов во время плановой дегазации**

Основной целью бурения скважин во время плановой дегазации будет снижение давления во вторичных магматических очагах плюма, предотвращение взрывов магмы и организация контролируемого вывода газа и лавы.

На начальном этапе бурение будет выполняться с участием операторов, поскольку на небольшой глубине процесс представляет стандартную технологическую задачу с минимальными рисками для персонала. Для этого будут применяться традиционные буровые установки, оборудованные системами мониторинга температуры и давления, что позволит контролировать процесс и оперативно реагировать на отклонения от нормы.

При достижении критической глубины и приближении к активным зонам магматической системы риск для людей существенно возрастает. На этом этапе работы полностью должны будут перейти в режим автоматизации. Будут использоваться специализированные буровые установки с автоматическим управлением. Процесс бурения будет регулироваться дистанционно с помощью программного обеспечения, которое анализирует поступающие данные в реальном времени и корректирует действия оборудования. Для повышения точности контроля операторы будут применять технологии виртуальной реальности, которые обеспечивают подробное управление оборудованием без физического

нахождения в опасной зоне. Это позволит уменьшить вероятность аварий, связанных с выбросом газов под высоким давлением или разрушением оборудования ударной волной.

Мониторинг состояния бурового комплекса и окружающей среды будет осуществляться с помощью дронов и роботов. Дроны, оснащённые камерами, тепловизорами и датчиками, будут фиксировать утечки газов, тепловые аномалии и сейсмическую активность. Роботы, работающие непосредственно в зоне бурения, будут собирать данные о температуре, давлении и химическом составе среды, передавая их в автоматизированные центры управления. Эти технологии позволят свести к минимуму присутствие людей в зоне повышенного риска и обеспечить высокий уровень точности и безопасности.

После завершения бурения на следующем этапе предполагается проведение контролируемой дегазации — постепенного стравливания давления и вывода больших объёмов лавы. На финальных стадиях, после значительного снижения объёма магмы и газов, может возникнуть необходимость проведения контролируемого взрыва для закрытия путей подъёма магмы. Один из предложенных методов предусматривает направленный ядерный взрыв в пробурённой скважине. Его целью является разгрузка тектонических напряжений и создание стабильных структурных барьеров, прекрывающих магматические каналы.

Такой подход предполагает разрушение пород в зонах высокого напряжения с последующим их сплавлением и охлаждением под воздействием тепловой энергии. Это послужит формированию монолитного барьера, который сможет полностью или частично блокировать доступ магмы к поверхности. Термодинамическое воздействие также может снизить тектоническое напряжение, уменьшая вероятность дальнейших извержений.

Реализация ядерных взрывов требует высокого уровня точности в расчётах, включая оценку литостатического давления, твёрдости и плотности горных пород, а также характеристик магматического расплава. Эти факторы должны быть учтены для достижения максимальной эффективности метода и минимизации возможных рисков.

## **Выбор оптимального времени для бурения скважин во время плановой дегазации**

В настоящее время основное внимание наших специалистов сосредоточено на изучении оптимальных временных рамок бурения для проведения плановой дегазации. Хотя делать окончательные выводы пока преждевременно, но предварительные расчёты уже указывают на возможность точного выбора наиболее благоприятного времени для начала дегазации. Полученные результаты свидетельствуют, что при правильно выбранном сроке риск возможных осложнений может быть снижен в несколько раз.

В процессе бурения необходимо учитывать не только физико-механические характеристики пород, включая их прочность и трещиноватость, но также временные параметры, связанные с небесной механикой. Расчёты должны основываться на анализе положения Земли на эклипнике, фазы Луны,

расположения крупных планет, таких как Юпитер, а также текущего уровня солнечной активности. Кроме того, важным фактором является мониторинг глубокофокусных землетрясений в регионе будущего бурения, так как они способны значительно повысить локальную сейсмическую активность.

На настоящий момент сформировано общее представление о механизме и ключевых закономерностях процесса, однако эти данные требуют дальнейшей многократной проверки. Полученные результаты должны быть не только тщательно перепроверены нашей научной группой, но и подтверждены независимыми исследованиями и моделями других специалистов.

## Сценарии результатов проведения плановой дегазации Сибирского плюма

При проведении плановой дегазации Сибирского плюма возможны три основных сценария развития событий, рассчитанные с учётом двух стадий проекта: раннего и более позднего этапов. Рассмотрим их подробнее.

### **1. Минимальный ущерб для территории России**

В случае, если процесс дегазации и сброса избыточной лавы из вторичных магматических очагов будет моделироваться международной командой экспертов, а расчёты будут тщательно и точно выполнены с учётом всех геологических особенностей, оба этапа дегазации пройдут без аварий и осложнений. Тогда ущерб территории России сведётся к минимуму: потеря составит 5–7 % площади страны, в крайнем случае до 10 % (радиус поражения около 500–600 км). В рамках этого сценария возможно обеспечение защиты крупных городов Красноярского края, а гибели людей удастся избежать. Более того, предполагается, что при благоприятном развитии событий отвод лавы может быть перенаправлен в сторону арктических морей, что позволит России увеличить свои территории за счёт расширения береговой линии.

### **2. Средний ущерб для территории России**

В рамках данного сценария предполагается успешное проведение раннего этапа дегазации, однако на поздних стадиях могут возникнуть непредвиденные сложности, такие как внезапный газовый взрыв или выброс лавы. Поскольку к этому моменту часть газов и лавы будет уже стравлена, последствия будут менее разрушительными. Может произойти

разлив жидких базальтовых лав, характерный для Исландии или Гавайских островов, или извержение средней эксплозивности. В таком случае возможная потеря территории увеличится до 25–30 % (около 4–5 млн км<sup>2</sup>). Последствия могут затронуть города в радиусе 1000 км от активной зоны. Однако этот сценарий не приведёт к глобальной катастрофе для цивилизации или необратимым разрушениям на территории России. Человечество сможет справиться с возникшими климатическими и экологическими вызовами.

### **3. Максимальный ущерб для России и всего мира**

Этот сценарий предполагает, что поздняя инициатива или недостаточная квалификация специалистов приведут к серьёзным проблемам. Нехватка исследований, ошибка в расчётах или бурение через мягкие или трещиноватые породы могут нарушить ход операции. Если осложнение произойдёт на раннем этапе дегазации, когда давление в очагах максимально высоко, это может вызвать один из двух катастрофических исходов: мгновенный взрыв всей системы Сибирского плюма или медленные, но масштабные излияния лавы, по аналогии с формированием Сибирских траппов. Несмотря на потенциальные риски, вероятность такого развития событий крайне мала, поскольку трудно представить реализацию столь сложного проекта без должной международной подготовки.

Оптимистичный и наиболее вероятный вариант предполагает потерю лишь 5–7 % территории России при минимальном ущербе. Даже в случае осложнений на поздних этапах ущерб может возрасти до 25–30 %, что остаётся значительно более благоприятным, чем последствия бездействия. Риск же более серьёзных разрушений в процессе плановой дегазации для России или для всего мира ничтожно мал.

Реализация плановой дегазации обеспечит России уникальный опыт управления глобальными геодинамическими рисками, что укрепит её позиции как международного научного и технологического лидера. Успешная реализация проекта продемонстрирует способность страны справляться с вызовами планетарного масштаба, способствуя укреплению глобального сотрудничества в области предотвращения природных катастроф. Это не только стабилизирует внутреннюю политическую и социальную обстановку, но также укрепит международное взаимодействие для решения глобальных проблем.

Контролируемая дегазация Сибирского плюма может оказывать влияние не только на локальную зону, но и на другие вулканические системы, такие как Йеллоустон и стратовулканы по всему миру. Магматические резервуары и их динамика образуют единую взаимосвязанную глобальную сеть, функционирующую как единый геомеханический механизм. Контролируемое снятие давления в

одном сегменте может снизить систему напряжений в магматических резервуарах, предупреждая цепные реакции и извержения. Это можно представить как разгерметизацию автомобильной шины: снижение давления в одной её части позволяет перераспределить нагрузку и избежать разрыва на критически напряжённых участках. Аналогичный подход к дегазации может способствовать стабилизации магматических систем в глобальных масштабах.

Таким образом, проведение плановой контролируемой дегазации в любом случае остаётся единственным шансом на спасение как России, так и всего человечества, что несопоставимо выгоднее и разумнее, чем бездействие. Этот сценарий позволит избежать глобальной катастрофы и даст человечеству время для разработки дальнейших решений.

Однако, несмотря на значительные перспективы, успешная реализация даже оптимистичного сценария станет вызовом внушительного масштаба. Действовать необходимо уже сейчас, так как промедление повышает вероятность катастрофических событий. Удивительно, но реализация подобного проекта может встретить возражения внутри России, учитывая потенциальные риски разрушения инфраструктуры и ослабление контроля над стратегическими ресурсами.

## ■ Выводы

Сибирский плюм представляет глобальную геодинамическую угрозу, сопоставимую по масштабу с тысячей катастрофических извержений крупнейших супервулканов. В случае неконтролируемого извержения могут возникнуть последствия планетарного масштаба, включая наступление ледникового периода, уничтожение экосистем, разрушение инфраструктуры и гибель человечества. Эти риски диктуют необходимость принятия превентивных мер в виде плановой дегазации магматической системы Сибирского плюма.

Бездействие создаёт угрозу стихийных неконтролируемых извержений, последствия которых будут катастрофическими не только для России, но и для всей планеты. Контролируемое снижение давления в магматических очагах поможет избежать худших сценариев и предоставит человечеству жизненно необходимое время для разработки долгосрочных решений.

Кроме того, интеграция технологии атмосферных генераторов воды в повседневное использование наряду с дегазацией Сибирского плюма создаст новые возможности для восстановления экологического баланса. Это позволит очистить океан от пластика, усилить водный цикл, а также восстановить тепловое равновесие планеты. Комплексное внедрение таких решений может стабилизировать климатическую

ситуацию и обеспечить будущее для всего человечества, высвободив время для поиска решения проблемы внешнего космического воздействия, вызывающего катастрофические события во время цикла 12 000 лет.

Данные задачи требуют срочного международного сотрудничества учёных из разных дисциплин, включая квантовых физиков, для разработки и реализации комплексных решений. Однако геополитические и военные конфликты препятствуют такому сотрудничеству. Поэтому необходим глобальный мораторий на войны и перенаправление военных ресурсов на смягчение последствий катастроф и гуманитарные усилия. У человечества осталось только 4–6 лет относительно стабильного времени, чтобы успеть предпринять необходимые меры.

Если будут созданы условия для открытого сотрудничества, то учёные не будут начинать с нуля, так как уже имеются реальные наработки и понимание причинно-следственных связей в этом направлении. Неспособность человечества отдать приоритет глобальному единству и научному сотрудничеству приведёт к необратимым последствиям для жизни на Земле.

## ■ Приложение 1

Методика анализа сейсмической активности включала скачивание и специальную обработку данных, полученных на сайте Международного Сейсмологического Центра (International Seismological Centre — ISC). Поскольку данные содержат различные источники из разных стран и исследовательских институтов, а также разные типы магнитуд ( $M_w$ ,  $M_s$ ,  $M_b$ ,  $M_L$ ,  $M_D$  и т. д.), то был выполнен определённый алгоритм обработки данных для выбора подходящего типа магнитуды из различных источников. Мы использовали два различных подхода:

1. Называемый в тексте **специальным алгоритмом медианных значений магнитуды**. Метод заключается в выборе предпочтительной оценки величины магнитуды и включении события в выборку, если предпочтительная оценка находится в необходимом диапазоне магнитуд. Мы выбираем предпочтительную оценку магнитуды, ища среди оценок следующие типы магнитуд (в порядке предпочтения):  $M_w$ ,  $M_L$ ,  $M_S$ ,  $M_b$ ,  $M_D$ ,  $M_V$ . Если для предпочтительного типа есть выборка магнитуд для одного события, то для расчёта медианы берутся все оценки магнитуды выбранного типа для этого события. Затем для них находится медиана. Если для данного события нет оценки ни одного из вышеперечисленных предпочтительных типов (что бывает редко, всего несколько процентов событий во всей базе данных), то выбирается любая оценка магнитуды со значением, совпадающим с медианой, вычисленной на основе всех типов магнитуд этого события.

2. Называемый в тексте **алгоритм максимальных значений магнитуды**. Выбирается оценка магнитуды с максимальным значением среди всех оценок величины для данного события.

Первый алгоритм в среднем приводит к небольшому снижению величины магнитуды относительно максимального переданного значения, но, как показал опыт, медианный алгоритм даёт адекватное поведение Закона Гутенберга — Рихтера и других закономерностей и достаточно хорошо согласуется с данными других сейсмологических баз, таких как Геологическая служба США (USGS) и Объединённые научно-исследовательские институты сейсмологии (IRIS).

Второй алгоритм позволяет оценить количество землетрясений, зарегистрированных каким-либо из исследовательских институтов со значением выше выбранного. Такое рассмотрение позволяет увидеть тенденцию в количестве землетрясений в выбранном диапазоне магнитуд.

**Все графики, представленные в разделе «Рост сейсмической активности как признак дестабилизации плит в результате активности Сибирского магматического плюма»,** были построены с использованием первого алгоритма — специального алгоритма медианных значений магнитуды (рис. 44–75).

После выбора магнитуды полученные данные были отфильтрованы по типам событий в базе ISC, чтобы исключить события, вызванные человеческой деятельностью в ходе горнодобывающих работ: взрывы, возможные взрывы, горные удары и т. д. Были исключены такие типы событий:

km = known mine explosion — известный взрыв на шахте

sm = suspected mine explosion — предполагаемый взрыв на шахте

kh = known chemical explosion (Not standard IMS) — известный химический взрыв (нестандартный IMS)

sh = suspected chemical explosion (Not standard IMS) — предполагаемый химический взрыв (нестандартный IMS)

kx = known experimental explosion — известный экспериментальный взрыв

sx = suspected experimental explosion — подозреваемый экспериментальный взрыв

kn = known nuclear explosion — известный ядерный взрыв

sn = suspected nuclear explosion — подозреваемый ядерный взрыв.

Также, поскольку на территории России находится много горнодобывающих предприятий, база данных ISC была сопоставлена с данными Единой геофизической службы РАН на январь 2025 года, в которой указаны все известные взрывы и горные удары на территории России. Данные события также были исключены, чтобы гарантировать, что в полученных данных не осталось событий, соответствующих взрывам.

## Список литературы

- Арушанов, М.Л. (2023) Динамика климата. Космические факторы. Hamburg: LAMBERT Academic Publishing.
- Арушанов, М.Л. (2023) 'Причины изменения климата Земли как результат космического воздействия, развеивающие миф об антропогенном глобальном потеплении', Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft, 53, сс. 4-14. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979>
- Баркин, Ю.В. и Любушин, А.А. (2007) 'Движение геоцентра Земли и его геодинамическое содержание', в сб.: Сагитовские чтения 2007, Московский государственный университет, Москва, 31 января-1 февраля. Доступно по адресу: [http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/life/chteniya/sagi2007/SAGITOV\\_BARKIN\\_2007.pdf](http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/life/chteniya/sagi2007/SAGITOV_BARKIN_2007.pdf)
- Баркин, Ю.В. (2009) 'Циклические инверсионные изменения климата в Северном и Южном полушариях Земли', в Геология морей и океанов: Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. Москва: ГЕОС, сс. 4-8.
- Баркин, Ю.В. (2011) 'Синхронные скачки активности природных планетарных процессов в 1997-1998 гг. и их единый механизм', в Геология морей и океанов: Материалы XIX Международной научной конференции по морской геологии. Т. 5. Москва: ГЕОС, сс. 28-32.
- Баркин, Ю.В. и Смольков, Г.Я. (2013) 'Скачкообразные изменения трендов геодинамических и геофизических явлений в 1997-1998 гг.', в Всероссийская конференция по солнечно-земной физике, посвящённая 100-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН В.Е. Степанова, Иркутск, 16-21 сентября.
- Баркин, Ю.В. (2014) 'Геофизические следствия относительных смещений и колебаний ядра и мантии Земли', Институт физики Земли РАН, Москва, 16 сентября.
- Богоявленский, В.И. (2023) 'Новые данные о грязевом вулканизме в Арктике на полуострове Ямал', Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 512, сс. 92-99. <https://doi.org/10.31857/S2686739723601084>
- Богоявленский, В.И., Никонов, Р.А. и Богоявленский, И.В. (2023) 'Новые данные об интенсивной дегазации земли в Арктике на севере Западной Сибири: термокарстовые озера с кратерами выбросов газа и грязевыми вулканами', Арктика: экология и экономика, 13, сс. 353-368. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368>
- Добрецов, Н.Л., Кирдяшкин, А.Г. и Кирдяшкин, А.А. (2001) Глубинная геодинамика. Новосибирск: Издательство СО РАН, филиал «ГЕО».
- Дьяченко, А.И. (2003) Магнитные полюса Земли. Москва: МЦНМО.
- Зоненшайн, Л.П. и Кузьмин, М.И. (1993) 'Глубинная геодинамика Земли', Геология и геофизика, 34(4), сс. 3-13.
- Зотов, Л.В., Баркин, Ю.В. и Любушин, А.А. (2009) 'Движение геоцентра и его геодинамика', в Труды конференции «Космическая геодинамика и моделирование глобальных геодинамических процессов», Новосибирск, 22-26 сентября. Новосибирск: Гео, сс. 98-101.
- Кирдяшкин, А.А. и Кирдяшкин, А.Г. (2013) 'Взаимодействие термохимического плюма с мантийными свободно-конвективными течениями и его влияние на плавление и перекристаллизацию мантии', Геология и геофизика, 54(5), сс. 707-721.
- 'Коммюнике и первый доклад IC GCGE GEOCHANGE «Глобальные изменения окружающей среды: угроза для развития цивилизации»' (2010) Том 1. Лондон. ISSN 2218-5798.

Кулаков, И.Ю. (2008) 'Структура верхней мантии под Южной Сибирью и Монголией по данным региональной сейсмической томографии', Геология и геофизика, 49(3), сс. 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012>

Львова, Е.В. (2010) 'Тектоника мантийных плюмов: эволюция основных представлений', Вестник Московского университета. Серия 4: Геология, 5, сс. 21-29.

Михайлова, Р.С. (2014) 'Сильные землетрясения в мантии и их влияние в ближней и дальней зоне', Геофизическая служба РАН. Доступно по адресу: <http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mihaylova.pdf>

Михайлова, Р.С., Улубиева, Т.Р. и Петрова, Н.В. (2021) 'Гиндукушское землетрясение 26 октября 2015 г. с Mw=7,5, 10~7: предшествующая сейсмичность и афтершоковая последовательность', Землетрясения Северной Евразии, 24(2015), сс. 324-339. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.31>

Никифорова М. П., Варгин П. Н., Звягинцев А. М., Иванова Н. С., Кузнецова И. Н., Лукьянов А. Н. (2016). Озоновая мини-дыра над Северным Уралом и Сибирью. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, № 360, с. 168–180. В материалах Гидрометеорологической конференции, 9–10 февраля, Том 4, с. 91–96. Воронеж: Научно-исследовательские публикации.

Никифорова, М.П. (2017) 'Экстремально низкие значения общего содержания озона над северным Уралом и Сибирью в конце января 2016 года', Атмосфера и океан. Оптика, 30(1). doi:10.15372/AOO20170102

Росгидромет (2022) Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год. Москва: Росгидромет.

Росгидромет (2024) Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. Москва: Росгидромет.

Смольков, Г.Я. (2020) 'Гелиогеофизические исследования', Выпуск 25, сс. 14-29 [Электронный ресурс]. Доступно по адресу: <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569> (Дата обращения: 01.02.2024)

Сывороткин, В.Л. (2018) 'Глубинная дегазация в полярных регионах планеты и изменение климата', Актуальные проблемы нефти и газа, 23. doi:10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art48

ТАСС (2024) 'Территория России теплеет в 2,5 раза быстрее остальной планеты' [Электронный ресурс]. Доступно по адресу: <https://tass.ru/obschestvo/16009287> (Дата обращения: 31.12.2024)

Федеральный исследовательский центр "Единая геофизическая служба Российской академии наук" Доступно по адресу: <http://www.ceme.gsras.ru/zr/contents.html>

Хаин, В.Е. (1985) 'Геология СССР', Очерки региональной геологии Земли (Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde), Берлин-Штутгарт: Гебрюдер Борнтрагер.

Шерстюков, Б.Г. (2023) 'Глобальное потепление и его возможные причины', Гидрометеорология и экология, 70, сс. 7-37. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37>

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

Black, B.A., Elkins-Tanton, L.T., Rowe, M.C., Ukstins Peate, I., (2012). Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps. Earth and Planetary Science Letters, 317–318, pp.363–373. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001>

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

- Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., ... & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. *Journal of Applied Volcanology*, 3(5). <https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5>
- Bryson, R. A. (1989). Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. *Theoretical and Applied Climatology*, 39, 115-125. <https://doi.org/10.1007/bf00868307>
- Campbell I.H, Czamanske G.K, Fedorenko V.A, Hill R.I& Stepanov V. (1992) Synchronism of the Siberian Traps and the Permian–Triassic boundary. *Science*. 258, 1760–1763.doi:10.1126/science.258.5089.1760.
- Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). The Ethics of Volcano Geoengineering. *Earth's Future*, 11(10), e2023EF003714. <https://doi.org/10.1029/2023EF003714>
- Castro, J., & Dingwell, D. (2009). Rapid ascent of rhyolitic magma at Chaitén volcano, Chile. *Nature*, 461, 780-783. <https://doi.org/10.1038/nature08458>
- Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 137–142. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7>
- Ciavarella, A., Cotterill, D., Stott, P., et al. (2021). Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. *Climatic Change*, 166, 9. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>
- Cox, C., & Chao, B. F. (2002). Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998. *Science*, 297(5582), 831–833. <https://doi.org/10.1126/science.1072188>
- Davydova, V.O., Shcherbakov, V.D., Plechov, P.Yu., Koulakov, I.Yu., (2022). Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezymianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 421, 107422. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107422>
- D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. *Scientific Reports*, 12, 17654. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9>
- Dannberg, J., & Sobolev, S. (2015). Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept. *Nature Communications*, 6, 6960. <https://doi.org/10.1038/ncomms7960>
- Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*, 48(7). <https://doi.org/10.1029/2020gl092114>
- Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism. *Earth-Science Reviews*, 247, 104595. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595>
- Elkins-Tanton, L. T., Grasby, S. E., Black, B. A., Veselovskiy, R. V., Ardakani, O. H., & Goodarzi, F. (2020). Field evidence for coal combustion links the 252 Ma Siberian Traps with global carbon disruption. *Geology*, 48(10), 986-991. <https://doi.org/10.1130/G47365.1>
- Ernst, R. E., & Buchan, K. L. (2002). Maximum size and distribution in time and space of mantle plumes: evidence from large igneous provinces. *Journal of Geodynamics*, 34, 309-342.
- Fedorenko, V. A., Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., Czamanske, G. K., Hawkesworth, C. J., Wooden, J. L., & Ebel, D. S. (1996). Petrogenesis of the Flood-Basalt Sequence at Noril'sk, North Central Siberia. *International Geology Review*, 38(2), 99-135. <https://doi.org/10.1080/00206819709465327>

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Popykina, A., Ilin, N., Shatalina, M., Price, C., Sarafanov, F., Terentev, A., & Kurkin, A. (2024). Thunderstorms near the North Pole. *Atmosphere*, 15(3), 310. <https://doi.org/10.3390/atmos15030310>

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

Larson, R.L. and Olson, P. (1991) ‘Mantle plumes control magnetic reversal frequency’, *Earth and Planetary Science Letters*, 107(3-4), pp. 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. *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)

Samenow, J. (2019, August 12). Lightning struck near the North Pole 48 times on Saturday, as rapid Arctic warming continues. *The Washington Post*.

<https://www.washingtonpost.com/weather/2019/08/12/lightning-struck-within-miles-north-pole-saturday-rapid-arctic-warming-continues/>

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

Smirnov, S. Z., et al. (2021). High explosivity of the June 21, 2019 eruption of Raikoke volcano (Central Kuril Islands): Mineralogical and petrological constraints on the pyroclastic materials. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 418, 107346. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107346>

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

Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutskaya, N. A., Petrunin, A. G., Arndt, N. T., Radko, V. A., & Vasiliev, Y. R. (2011). Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. *Nature*, 477, 312-316. <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. *Journal of Petrology*, 60, 1371-1426. <https://doi.org/10.1093/petrology/eqz034>

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

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

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

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

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

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

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