
СОВРЕМЕННАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ И ВУЛКАНИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ

ЕЁ РАЗВИТИЕ И ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ



Современная сейсмическая и вулканическая активность Земли, её развитие и возможные причины

Оригинальное название

Súčasná seizmická a vulkanická aktivita Zeme, jej vývoj a možné príčiny

Автор

Earth Pulse Research

Год публикации

2026

Версия документа

Версия 1.0

Оригинальный язык

Словацкий

Официальный сайт проекта:

<https://earthpulseresearch.org>

Переводы

Некоторые языковые версии данного отчёта были подготовлены с использованием инструментов перевода на основе искусственного интеллекта. Эти переводы не проходили профессиональную языковую редактуру и могут содержать лингвистические или терминологические неточности.

Рекомендуемое цитирование

Earth Pulse Research. (2026).

Current seismic and volcanic activity of the Earth, its evolution and possible causes.

Доступно на: <https://earthpulseresearch.org>

Отказ от ответственности

Данный отчёт предназначен для информационных и исследовательских целей. Представленные интерпретации основаны на доступных научных данных и могут изменяться по мере появления новых исследований.

Авторские права

© 2026 Earth Pulse Research.

Все права защищены.

Содержание

Введение.....	5
1. Глобальное увеличение сейсмической активности в мире.....	6
Развитие годовых количеств глобальных землетрясений.....	6
Землетрясения $M \geq 4,4$	6
Землетрясения $M \geq 4,5$	7
Землетрясения $M \geq 7$	8
Развитие глобальной сейсмической сети.....	9
Обоснование выбора сейсмологических каталогов.....	11
2. Рост сейсмической и вулканической активности на окраинах Евразийской плиты в 2025 году.....	14
Россия и Сибирь: пробуждение стабильной платформы и исторические рекорды.....	14
Камчатка: историческое мегаземлетрясение и нарушение сейсмических закономерностей.....	14
Нарушение закона Бата.....	19
Вулканическая активность на Камчатке: одновременное пробуждение шести вулканов.....	22
Сибирская Арктика: беспрецедентная активность на стабильной платформе.....	23
Мьянма: феномен «supershear»-землетрясения и беспрецедентный рост сейсмической активности...	24
Регион Эгейской плиты и прилегающие области: беспрецедентный рост активности.....	26
Санторини: Беспрецедентный рой землетрясений и движение магмы.....	28
Колумбо: растущая магматическая камера под морем.....	29
Разломная линия западной Турции и Эгейского моря.....	30
Ян-Майен и Шпицберген: пробуждение арктической вулканической зоны.....	31
3. Сейсмическая активность на окраинах Евразийской плиты в 2023–2025 годах.....	34
Тайвань.....	36
Япония.....	38
Исландия.....	41
Турция.....	42
Филиппины.....	44
4. Активизация других разломов.....	46
Восточно-Африканский рифт: десятикратный рост активности.....	46
Пробуждающиеся вулканы.....	47
Срединно-Атлантический хребет.....	48
Юго-восточный Индийский хребет.....	50
Дрейк-пролив: пробуждение антарктической зоны.....	52
Канада: пробуждение разлома Тинтина после 12 000 лет тишины.....	54
Сеймотектонический пояс Тянь-Шань.....	55
5. Огненное кольцо: глобальная активация.....	57
Южная Америка.....	57
Северная Америка: Каскадия.....	59
Маунт-Рейнир: крупнейший сейсмический рой в истории.....	59
Маунт-Эдамс.....	60
Маунт-Сент-Хеленс.....	60
6. Пробуждающиеся супервулканы.....	62
Campi Flegrei – исторический год активности.....	62
2025 год: рекордная сейсмическая активность.....	63
Брадисеизм: постоянное поднятие кальдеры.....	64
Рекордные температуры фумарол: 165°C.....	65
Таящийся асфальт и дым с дорог.....	66
Эмиссии CO ₂ : 5500 тонн в день.....	67
Синтез: все индикаторы указывают на пробуждение.....	67
Campi Flegrei: перед малым или большим извержением?.....	68
Что означало бы суперизвержение Campi Flegrei?.....	71

Sakurajima и кальдера супервулкана Aira.....	72
Германия: Laacher See.....	74
7. Глобальный рост вулканической активности.....	77
8. Оценка доступных данных, методик и физических взаимосвязей.....	79
Закон Гутенберга–Рихтера.....	79
9. Ограничения чисто тектонического толкования и необходимость более широкого контекста.....	81
10. Другие глобальные геодинамические изменения системы Земли.....	82
Изменения вращения Земли и длины суток (LOD).....	82
Динамика ядро–мантия и её долгосрочные изменения.....	83
Движение северного магнитного полюса.....	84
Эволюция геомагнитного поля и его ослабление.....	87
Рост наблюдений красных полярных сияний в необычно низких географических широтах.....	91
Сравнение значительных геомагнитных бурь по силе (интенсивности) и по распространению полярных сияний.....	92
Потепление океанов и изменения в океанических течениях.....	94
Беспрецедентное потепление океанов в последние годы.....	94
Потепление океанов в глубине: менее заметное, но принципиально важное.....	96
Влияние потепления на океанические течения.....	96
Гольфстрим и АМОС.....	97
Роль геотермального тепла.....	98
Связь между сейсмической активностью и температурными аномалиями океанов.....	98
11. Повторяющиеся циклические события в истории Земли.....	100
Младший дриас – резкие климатические изменения и геомагнитная экскурсия Гётеборг.....	102
Событие Генриха 1 (H1) и геомагнитная экскурсия Хилина-Пали.....	106
Событие Генриха 2 (H2) и геомагнитная экскурсия Lake Mungo 2.....	107
Событие Генриха 3 (H3) и геомагнитическая экскурсия Lake Mungo 1 / Mono Lake.....	108
Событие Генриха 4 (H4) и геомагнитическая экскурсия Лашамп.....	110
Параллель с современностью: Повторение исторических циклов.....	112
Заключение.....	114
Благодарность.....	116
Источники.....	117

Введение

Этот отчёт анализирует значительный рост сейсмической и вулканической активности, зафиксированный в течение 2025 года как в глобальном, так и в региональном масштабе. На основе данных международных сейсмологических баз и национальных геофизических институтов было выявлено увеличение количества землетрясений, угроз потенциальных вулканических извержений и сопутствующих геодинамических явлений по сравнению с долгосрочным средним показателем за последние десятилетия. Данная аналитическая работа направлена на количественную оценку этих изменений, их пространственное распределение и возможные связи с более глубокими тектоническими процессами.

Особое внимание уделяется регионам, где повышенная активность проявляется длительно и кумулятивно, то есть не только в 2025 году, но и в предыдущие годы. Анализ указывает на то, что наблюдаемые явления не представляют собой изолированные события, а могут быть частью более широкого тренда постепенного роста сейсмической энергии, высвобождаемой в литосфере. Этот тренд проявляется не только в увеличении числа землетрясений, но и в повышенной частоте сейсмических роев, сильных афтершоков и событий, демонстрирующих отклонения от классических сейсмологических закономерностей.

Существенным выводом отчёта является выраженная пространственная концентрация самых сильных землетрясений и наиболее интенсивной вулканической активности вдоль окраин Евразийской тектонической плиты в последние годы. От района Исландии через Средиземноморье, Турцию, Мьянму, Филиппины, Индонезию вплоть до Японии и Камчатки формируется почти непрерывный пояс повышенной геодинамической активности. Именно в этих регионах в последние годы были зафиксированы повторяющиеся сильные землетрясения, обширные сейсмические рои и случаи необычно мощных афтершоков, что указывает на сохраняющееся или нарастающее напряжение в разломных системах.

В данной работе также документируется повышенная активность ряда вулканических систем, включая пробуждение длительно спокойных регионов и ускоренные изменения в магматических системах. Сочетание сейсмических и вулканических проявлений указывает на гемодинамическую активизацию, возможные изменения в более глубоких процессах Земли, включая активизацию мантии, реорганизацию полей напряжений земной коры и изменений краевых тектонических процессов.

Целью данного документа является предоставление целостного обоснованного (подтверждённого), взгляда на текущее развитие сейсмической и вулканической активности за последние десятилетия и выявление определённых регионов, где эти явления концентрируются.

Проведенный в отчете анализ выявляет необходимость рассматривать рост сейсмической и вулканической активности не как эпизодическое явление, а как часть глобального процесса долгосрочного характера. Более серьезные последствия таких геодинамических изменений диктуют необходимость изменения подхода к изучению процессов на планете, переоценки сейсмических рисков, мониторинга активных зон. Внимание следует уделить информированности населения и подготовки инфраструктуры к возможным катастрофам.

1. Глобальное увеличение сейсмической активности в мире

Развитие годовых количеств глобальных землетрясений

При оценке долгосрочного развития глобальной сейсмической активности для более детального анализа были выбраны пороговые магнитуды $M \geq 4,4$ и $M \geq 4,5$, которые согласно историческому глобальному покрытию сейсмических сетей представляют уровень, начиная с которого землетрясения в большинстве регионов мира длительное время надежно регистрируются.

Как указывается в анализе сети USGS (NEIC) 1998 года, пороговые значения полноты магнитуды (magnitude completeness threshold) для большинства регионов мира находятся в интервале $M 4,3-4,4$ ¹. Авторы исследовали данные по всем 50 регионам, первоначально предложенным Гутенбергом и Рихтером (1954) и формализованным Флинном и Энгдалом (1965). Деление на 50 сейсмических регионов представляет собой глобальную классификацию Земли на крупные тектоно-сейсмические области, что позволяет систематически сравнивать сейсмичность различных частей планеты в единой глобальной системе координат.

Землетрясения $M \geq 4,4$

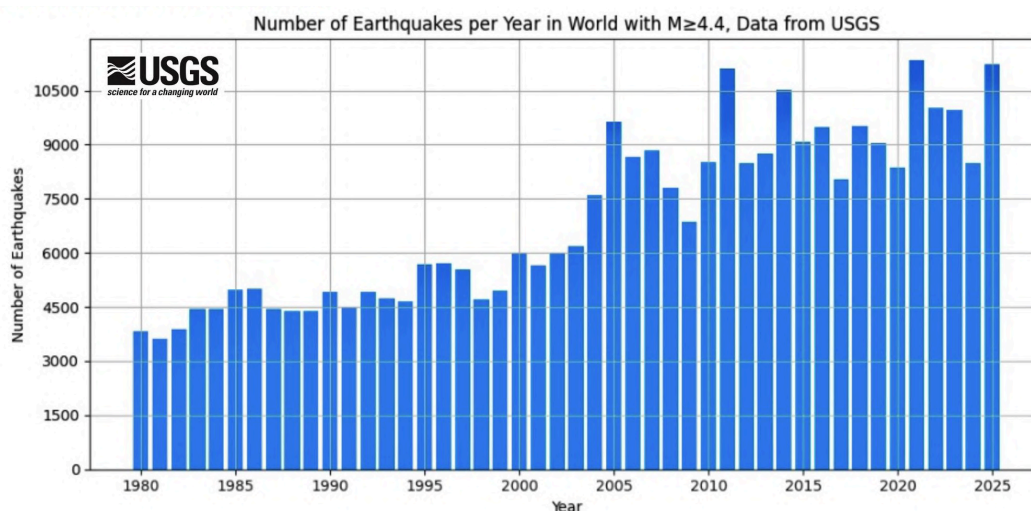


Рис. 1: Глобальный рост числа землетрясений с $M \geq 4,4$; график создан в Python с использованием данных каталога USGS: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

График на рис. 1 показывает годовое количество глобально зарегистрированных землетрясений с магнитудой $M \geq 4,4$ в период 1980–2025 гг. на основе данных каталога USGS. Этот порог был выбран с учётом анализов полноты сейсмологических каталогов, согласно которым глобальный порог полноты каталога NEIC (USGS) находится примерно в диапазоне $M \approx 4,4-4,5$. Использование магнитуды $M \geq 4,4$ позволяет включить большее число событий при сохранении приблизительной глобальной репрезентативности данных.

Из графика видно, что количество зарегистрированных землетрясений такой магнитуды демонстрирует с середины 90-х годов постепенный рост, который связан не только с улучшением глобального сейсмического мониторинга, но и отражает реальную сейсмическую активность

¹ <https://ds.iris.edu/news/IRISnewsletter/volume2000no1/page-02-04.htm>

планеты. Примерно с 2005 года годовые значения числа событий находятся значительно выше, чем в 80-е и 90-е годы. Особенно интересным является развитие ситуации в недавний период, в котором можно наблюдать относительно уплотнённую сейсмическую активность. Наибольшее количество событий (11 353) было зарегистрировано в 2021 году, при этом 2025 год представляет собой второе по величине число зарегистрированных землетрясений (11 211) за весь анализируемый временной интервал.

Следует также отметить, что каталог USGS ComCat является динамической базой данных, которая постоянно обновляется на основе данных глобальных и региональных сейсмических сетей. Параметры событий могут быть дополнительно пересмотрены, а в каталог могут задним числом добавляться и более ранние события. По этой причине окончательное количество землетрясений за самые последние годы может ещё немного изменяться, и возможно, что число событий, зарегистрированных в 2025 году, в будущем ещё несколько увеличится.

Землетрясения $M \geq 4,5$

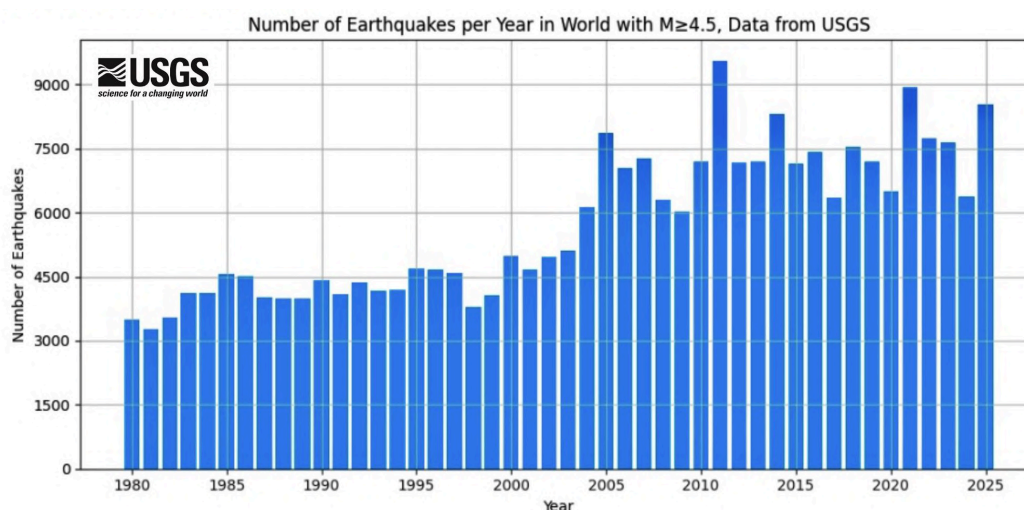


Рис. 2: Глобальный рост числа землетрясений с $M \geq 4,5$; график создан в Python с использованием данных каталога USGS: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

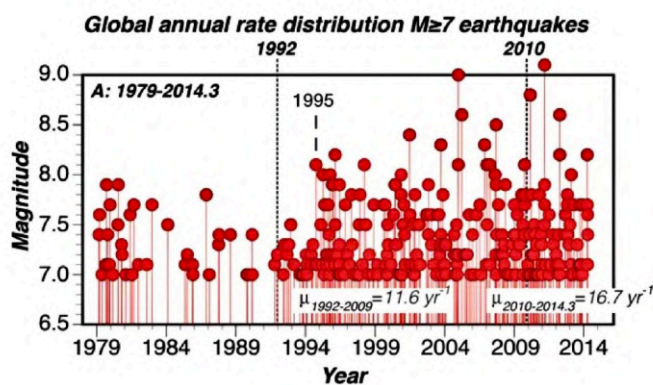
Аналогичную картину демонстрирует и график на рис. 2 для $M \geq 4,5$, представляющий ещё более строгий порог надёжной глобальной детекции. И при этом уровне магнитуды после рубежа тысячелетий наблюдается смещение к более высоким годовым количествам событий по сравнению с 1980-ми и 1990-ми годами, при этом последние годы характеризуются повышенной вариабельностью на более высоком базовом уровне. После 2004 года произошло заметное увеличение числа зарегистрированных событий, а в последующие годы значения стабилизировались на существенно более высоком уровне по сравнению с предыдущими десятилетиями. В последние годы годовые показатели неоднократно находились среди самых высоких значений всего временного ряда, причём 2025 год относится к числу значений значительно выше среднего за рассматриваемый период. Это подтверждает, что повышенные количества зарегистрированных событий проявляются и при магнитудах, которые уже длительное время надёжно фиксируются в глобальном масштабе.

Тот факт, что аналогичный рост числа событий наблюдается также при магнитудах $M \geq 4,4$ и $M \geq 4,5$, то есть в интервале, который, согласно анализам USGS, считается практически полностью

регистрируемым на глобальном уровне уже с 90-х годов, указывает на то, что рост числа зарегистрированных землетрясений в последние десятилетия нельзя объяснить улучшением технологий обнаружения. В частности, повышенные значения в последние годы, включая второй исторический максимум при $M \geq 4,4$ в 2025 году, указывают на значительный уровень современной зарегистрированной глобальной сейсмической активности.

Землетрясения $M \geq 7$

Диаграммы на рис. 3 и рис. 4 из рецензируемого исследования, опубликованного в журнале *Geophysical Research Letters (AGU)*², отображают глобальное годовое распределение землетрясений с магнитудой $M \geq 7$ в период 1979–2014.3. Каждая точка на рис. 3 представляет отдельное сильное землетрясение, при этом ось x отображает время, а ось y — его магнитуду. Одновременно показана и годовая частота этих событий (рис. 4).



The 2010–2014.3 global earthquake rate increase

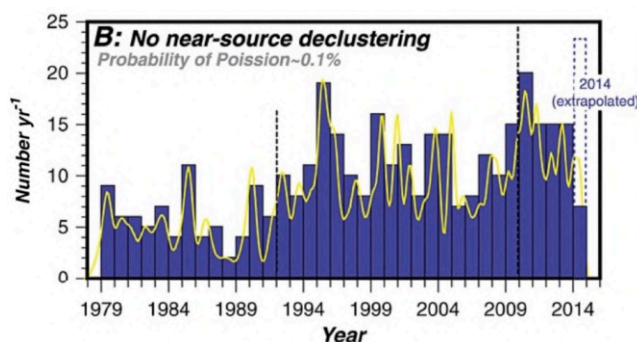


Рис. 4: Годовая гистограмма землетрясений с магнитудой $M \geq 7,0$ с 1979 года, источник:

Рис. 3: Глобальное временное распределение землетрясений с магнитудой $M \geq 7,0$ с 1979 года, источник:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GL060513> <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GL060513>

Уже при первом взгляде заметен чёткий перелом около 1995 года. До этого периода сильные землетрясения $M 7+$ встречаются относительно реже и распределены во времени более равномерно. После 1995 года наблюдается значительное увеличение частоты, что авторы также количественно оценивают статистически:

для периода 1992–2009 средняя частота составляет приблизительно 12 событий в год, тогда как в период 2010–2014.3 она достигает 17 событий в год.

Помимо перелома в 1995 году, на графике заметна и дальнейшая усиливающаяся тенденция после 2010 года, когда не только увеличивается число событий, но и появляется более высокая концентрация очень сильных землетрясений ($M 8+$ и в отдельных случаях близких к $M 9$). Этот период характеризуется повышенной «плотностью» точек, что указывает не просто на случайные колебания, а на изменение режима глобальной сейсмической активности.

Важно отметить, что для землетрясений с магнитудой $M \geq 7$ совершенствование измерительной техники или плотность сейсмических станций не играют решающей роли — такие события

² <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GL060513>

надежно регистрировались уже с начала прошлого столетия. Следовательно, наблюдаемый рост указывает на реальное глобальное явление.

Таким образом, представленные графики дают веское доказательство того, что повышенная сейсмическая активность последних десятилетий касается не только более слабых землетрясений (M 4+), но и самых мощных и энергетически значимых событий, при этом ключевые переломные периоды приходятся на 1995 и 2010 годы.

Развитие глобальной сейсмической сети

Современный глобальный мониторинг начался с создания Global Seismographic Network (GSN), которая начала формироваться в 1980-е и 1990-е годы как цифровая сеть примерно из 150 высококачественных сейсмических станций, равномерно размещённых по всей планете. GSN передаёт данные в реальном времени и служит ядром современного глобального сейсмического мониторинга, при этом её станции предоставляют согласованные и высокочувствительные записи землетрясений широкого диапазона магнитуд.³

Благодаря постепенному развитию глобальных сейсмических сетей — особенно систем World-Wide Standardized Seismograph Network (WWSSN) и её последующих цифровых преемников, таких как GEOSCOPE и Global Seismographic Network (GSN), способность глобально обнаруживать более слабые землетрясения значительно улучшилась во второй половине XX века. Анализы глобальных каталогов (например, International Seismological Centre и National Earthquake Information Center) показывают постепенную регистрацию землетрясений различных магнитуд по всей планете.⁴

³ <https://eos.org/editors-vox/global-seismic-networks-recording-the-heartbeat-of-the-earth>
<https://www.usgs.gov/publications/achievements-and-prospects-global-broadband-seismographic-networks-after-30-years>

⁴ <https://academic.oup.com/gji/article/206/3/1652/2583518?login=false>

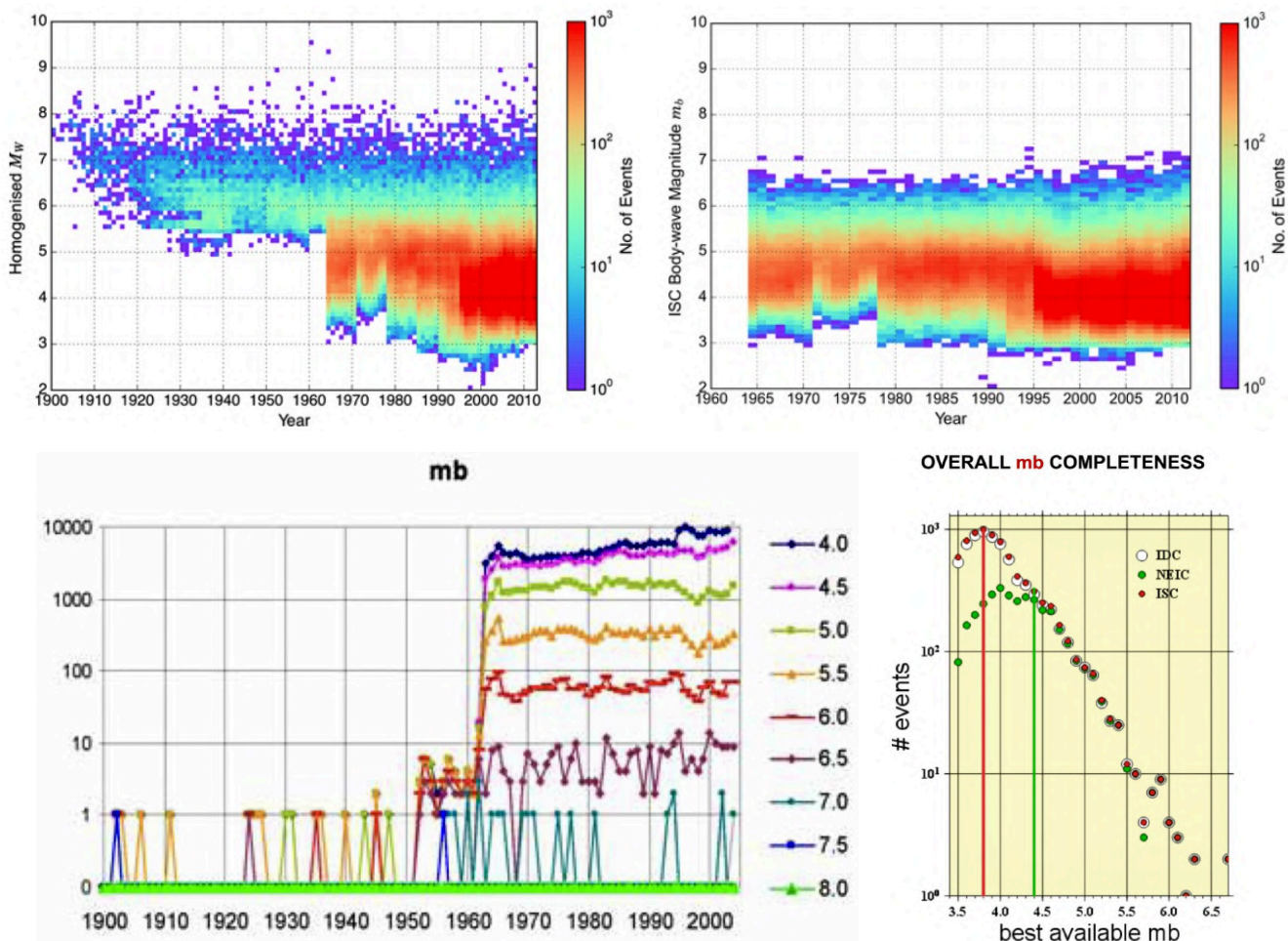


Рис. 5:

Сверху слева: плотность магнитуд M_w землетрясений во времени для расширенного глобального каталога ISC до 2013 года,

сверху справа: плотность магнитуд m_b землетрясений во времени для пересмотренного бюллетеня ISC, источник: <https://academic.oup.com/gji/article/206/3/1652/2583518?login=false>.

Снизу слева: годовое количество землетрясений m_b в каталоге NEIC (USGS) по времени и магнитуде, 1900–2004, источник: https://www.researchgate.net/publication/2178834_Does_the_Earth_show_up_an_impending_mega-earthquake#pf5.

Снизу справа: общая полнота магнитуд m_b для различных каталогов за 2001 год: бюллетень ISC стандартно является наиболее полным для m_b , порог магнитуды для бюллетеня ISC составляет около m_b 3,8, для бюллетеня NEIC (USGS) m_b 4,4, источник: <https://www.isc.ac.uk/docs/papers/download/2004p01/>.

Рис. 5 иллюстрирует развитие возможностей обнаружения в глобальных сейсмологических каталогах и оценку магнитуды полноты M_c на основе данных ISC, IDC и NEIC (USGS). Верхние диаграммы показывают временное развитие зарегистрированных землетрясений в зависимости от магнитуды. В левой диаграмме события выражены в моментной магнитуде M_w , тогда как правая диаграмма использует магнитуду поверхностных волн m_b , которая часто доступна также для более старых исторических событий. Из обеих диаграмм видно, что по мере развития глобальных сейсмических сетей происходит значительное увеличение числа зарегистрированных слабых землетрясений, что проявляется в снижении порога обнаружения каталогов, особенно со второй половины XX века.

Нижняя левая диаграмма представляет развитие количества землетрясений в каталоге NEIC (USGS) по различным порогам магнитуды в период 1900–2004 годов. График показывает значительный рост числа зарегистрированных событий с 1960-х годов, который связан прежде всего с развитием глобальной сети сейсмических станций и постепенным снижением порога обнаружения.

Правая нижняя диаграмма непосредственно сравнивает полноту каталогов ISC, IDC и NEIC за 2001 год. Из неё следует, что бюллетень ISC в целом является наиболее полным, при этом его порог полноты составляет приблизительно $m_b \approx 3,8$, тогда как каталог NEIC (USGS) имеет более высокий порог полноты примерно $m_b \approx 4,4$. Это значение очень близко к границе $M \approx 4,5$, которая в литературе часто рассматривается как практический предел глобально надёжно регистрируемых землетрясений в современных каталогах.

На основании приведённых источников и представленных в них данных можно сделать вывод, что приблизительное пороговое значение полноты каталога NEIC (USGS) в глобальном масштабе находится в диапазоне $M \approx 4,4-4,5$, при этом надёжная планетарная регистрация землетрясений такой величины возможна как минимум с середины 90-х годов XX века. Из анализируемых диаграмм также следует, что землетрясения в этом диапазоне магнитуд фиксировались в глобальных каталогах уже в более ранние периоды.

Магнитуда m_b (body-wave magnitude) основана на амплитуде первичных сейсмических волн (P-волн) и в глобальных сейсмологических каталогах часто приводится особенно для более старых событий, поскольку длительное время она стандартно использовалась в международных бюллетенных системах преимущественно для землетрясений средней интенсивности. Однако в современной сейсмологии всё чаще используется моментная магнитуда M_w , которая выводится из физического сейсмического момента и точнее характеризует общую энергию землетрясения. В интервале примерно $M 4-5$ значения m_b и M_w в большинстве случаев очень близки, при этом разница между ними обычно невелика. Поэтому при интерпретации порогов полноты каталогов в этом диапазоне магнитуд эти значения можно считать приблизительно сопоставимыми.

Обоснование выбора сейсмологических каталогов

При анализе временных изменений сейсмической активности ключевым вопросом является выбор подходящего сейсмологического каталога. Различные базы данных отличаются методикой обработки данных, временным охватом, используемыми типами магнитуд и степенью полноты. В данной работе использовался главным образом каталог USGS, а также другие каталоги, которые взаимно дополняют друг друга и позволяют более надёжно оценить региональную сейсмичность. Выбор отдельных источников основывался прежде всего на их доступности, методике обработки данных, временном покрытии и практической применимости для статистического анализа.

USGS

Каталог United States Geological Survey (USGS) является одним из наиболее широко используемых источников современных сейсмологических данных. В данной работе он использовался прежде всего из-за ориентации анализа на сейсмическую активность последних лет, особенно в временном горизонте примерно последних 1–3 лет. Одной из характерных особенностей этого каталога является то, что данные о землетрясениях постоянно обновляются и уточняются. В первые часы или дни после события записи основаны на быстрых автоматических решениях, которые позже дополняются более точными локализациями и пересмотренными значениями магнитуды. В результате количество землетрясений, зарегистрированных в последние годы, может в будущем немного увеличиваться по мере добавления в каталог новых выявленных событий или корректировки параметров уже зарегистрированных землетрясений.

Преимуществом каталога USGS является его высокая прозрачность и простая проверяемость данных. Данные свободно доступны через веб-интерфейс, а также через стандарт Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN), который позволяет автоматически загружать данные и далее обрабатывать их в различных аналитических инструментах и программных средах (например, Python, MATLAB или R). Каталог также использует единую предпочтительную магнитуду для каждого землетрясения, что значительно облегчает статистическую обработку данных. По сравнению с некоторыми более сложными базами данных он предоставляет относительно простые и непосредственно пригодные для использования данные даже для пользователей без глубокого сейсмологического образования.

VolcanoDiscovery

База данных VolcanoDiscovery использовалась главным образом при анализе сейсмической активности в конкретных регионах мира, где она содержала значительно больше зарегистрированных событий, чем каталоги USGS или ISC. Этот источник агрегирует данные из различных сейсмологических служб и позволяет отображать землетрясения по различным порогам магнитуды, чаще всего M2+, M3+ и M4+, при этом временное покрытие для многих регионов достигает 1990 года. Для целей данной работы из этой базы данных использовались только землетрясения с магнитудой $M \geq 4$.

Преимуществом базы данных VolcanoDiscovery является прежде всего её наглядный веб-интерфейс, который позволяет быстро просматривать статистику, диаграммы и картографические обзоры сейсмической активности без необходимости загрузки данных и их последующей обработки. Такие визуализационные инструменты могут быть особенно полезны для быстрой ориентации в региональной сейсмичности.

С другой стороны, у этого источника имеются и значительные ограничения. При более детальном сравнении выяснилось, что каталог в некоторых случаях демонстрирует несогласованности в суммарном количестве землетрясений по отдельным странам или регионам. Кроме того, в последние годы были зафиксированы случаи, когда база данных дополнительно добавляла значительное количество событий в более ранние временные периоды без ясного методического объяснения. Эти обстоятельства снижают общую надёжность базы данных и требуют осторожности при интерпретации её статистических результатов.

EMSC

European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC) управляет базой данных землетрясений, ориентированной прежде всего на Европу, Средиземноморье и прилегающие регионы. Её систематические цифровые записи доступны примерно с 1998 года. Каталог интегрирует данные множества национальных сейсмологических служб и предоставляет оперативную информацию о землетрясениях, включая их локализацию, магнитуду и основные параметры.

В данной работе каталог EMSC использовался главным образом в тех регионах, где он предоставлял более плотные или более полные записи по сравнению с другими глобальными базами данных. Речь прежде всего идёт о северном регионе, а именно о районе Ян-Майена и Шпицбергена, где европейские сейсмологические сети часто регистрируют больше слабых событий, чем глобальные каталоги. В таких случаях база данных EMSC может давать более детальную картину региональной сейсмичности.

Почему не использовался ISC Bulletin

Хотя в подобных сейсмологических анализах часто используется каталог ISC Bulletin, главным образом благодаря его высокой полноте и интеграции данных из большого количества глобальных и региональных сейсмических сетей, в данной работе он не использовался как основной источник данных. Причиной является ориентация анализа на самый недавний этап развития сейсмической активности в последние годы. Самые последние годы в каталоге ISC Bulletin ещё не прошли полной ревизии, причём окончательная проверка и объединение решений из различных сейсмических сетей может занимать примерно до двух лет.

В неревизованных данных поэтому могут временно присутствовать дубликаты или параллельные решения одного и того же события из различных агентств, что может приводить к небольшому завышению числа землетрясений в самые последние годы до тех пор, пока каталог не будет полностью пересмотрен. По этой причине в данной работе для анализа текущей сейсмической активности использовался каталог USGS ComCat (NEIC), который предоставляет быстро обновляемые и оперативно обработанные данные с единым предпочтительным решением событий, что позволяет проводить более согласованный анализ сейсмичности в временном горизонте последних лет.

Использование нескольких каталогов в данной работе позволяет сочетать преимущества отдельных баз данных — глобальное покрытие и простоту работы с данными в случае USGS, визуальную доступность статистики в базе VolcanoDiscovery и региональную точность европейских данных EMSC. Такой подход одновременно снижает риск систематических ошибок, которые могли бы возникнуть при использовании только одного источника сейсмологических данных.

2. Рост сейсмической и вулканической активности на окраинах Евразийской плиты в 2025 году

Россия и Сибирь: пробуждение стабильной платформы и исторические рекорды

Камчатка: историческое мегаземлетрясение и нарушение сейсмических закономерностей

29 июля 2025 года сейсмологические станции по всему миру зафиксировали одно из самых мощных землетрясений в современной истории наблюдений. Землетрясение магнитудой $M 8,8$ поразило полуостров Камчатка на российском Дальнем Востоке. Это событие занимает шестое место среди самых сильных землетрясений с начала современных сейсмологических записей и по силе сопоставимо с историческим землетрясением в Чили от 27 февраля 2010 года.⁵

Исторический контекст: сравнение с 1952 годом

В 1952 году на Камчатке произошло чрезвычайно мощное землетрясение магнитудой $M 9,0$ — пятое по силе за всю историю наблюдений. Оно вызвало цунами высотой около 18 метров, а оценки числа жертв варьируются от 2300 до 14 000 человек.⁶ Гипоцентр этого мегаземлетрясения 1952 года находился на глубине 22 км⁷, тогда как мегаземлетрясение 2025 года имело глубину 35 км.⁸

Обычно считается, что мегаземлетрясения с магнитудой порядка $M9$ в мегаразломных зонах представляют собой высвобождение дефицита скольжения, который накапливается на границе литосферных плит на протяжении столетий. Однако событие на Камчатке в 2025 году ($M 8,8-8,9$), судя по пространственному распределению афтершоков, разорвало практически тот же сегмент разлома, что и землетрясение $M 9,0$ в 1952 году. Этот чрезвычайно короткий интервал между двумя крупными разрывами ставит под сомнение справедливость традиционных представлений о ходе сейсмического цикла.⁹

Результаты японского исследования, представленные на рис. 6, указывают на то, что разрыв 2025 года сопровождался смещениями по разлому, превышающими 9 м, на обширной территории от южной Камчатки до северных Курильских островов. Это смещение значительно превосходит приблизительно 6 м конвергенции плит, накопленной с 1952 года, и пространственно совпадает с зоной максимального скольжения во время события 1952 года. В областях наибольших смещений наблюдалось примерно двукратное ускорение скорости скольжения, вероятно под воздействием динамических напряжений и сложного фрикционного поведения разлома. После основной разрыва в области границы плит появились афтершоки с низкоугловым нормальным разломом, которые указывают на то, что во время главного землетрясения произошло так называемое динамическое превышение равновесного сдвигового

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Lists_of_earthquakes

⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/1952_Северо-Курильское_землетрясение

⁷ https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official19521104165830_30/executive

⁸ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/executive>

⁹ <https://seismica.library.mcgill.ca/article/view/2012/2650>

напряжения на разломе. Авторы исследования отмечают, что столь полное высвобождение напряжений является необычным даже среди мегаземлетрясений.

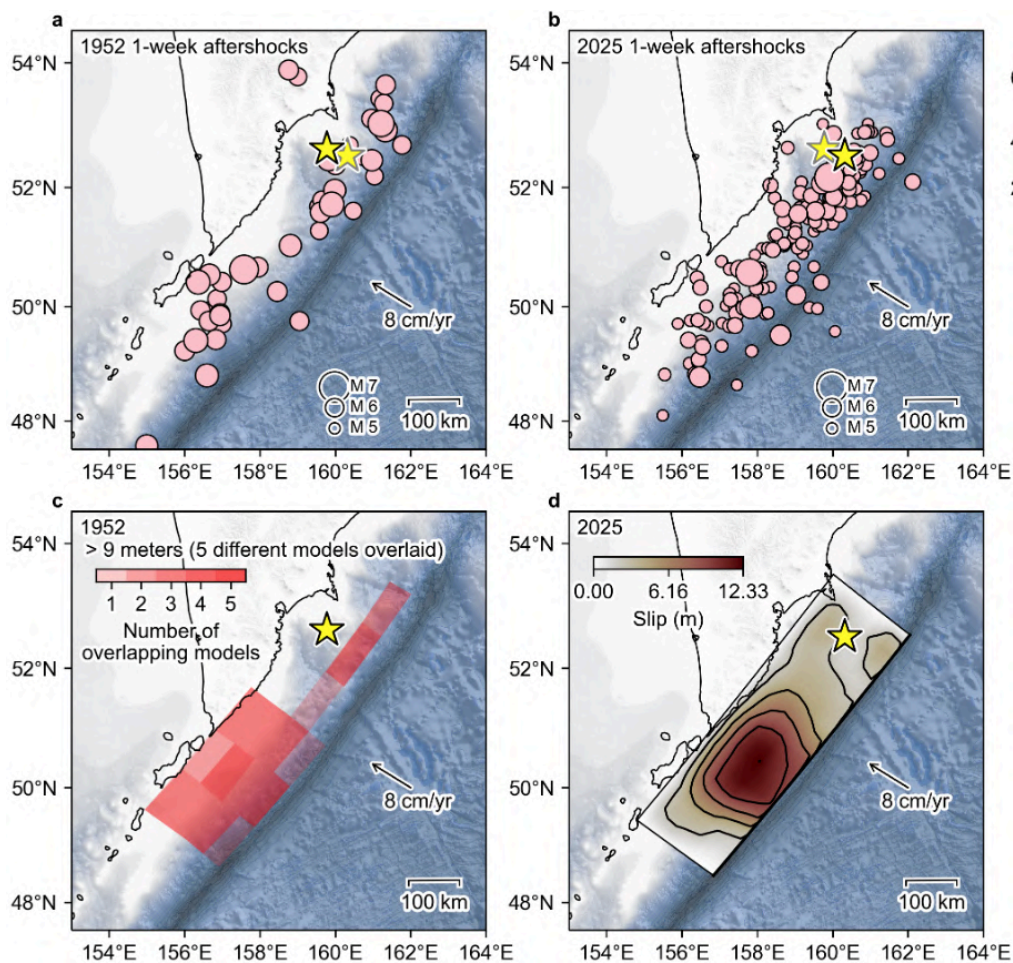


Рис. 6: Сравнение мегаземлетрясений на Камчатке в 1952 и 2025 годах. (а, б) Афтершоки после событий (а) 1952 года и (б) 2025 года в течение последующей недели (4–11 ноября 1952 г.; 29 июля – 5 августа 2025 г.). Чёрная звезда с обводкой обозначает эпицентр главного толчка для событий (а) 1952 и (б) 2025 годов. Розовые круги представляют афтершоки. Для сравнения, серая звезда с обводкой обозначает эпицентр главного толчка для событий (а) 2025 и (б) 1952 годов. (с, d) Косейсмические модели смещений для событий 1952 и 2025 годов. Источник:

<https://seismica.library.mcgill.ca/article/view/2012/2650>

Следующие рисунки 7–10 показывают сравнение количества землетрясений, расположенных в зоне (155,0° в.д. – 163,5° в.д., 49,5° с.ш. – 55° с.ш.), которая включает непосредственные афтершоки (а не фоновую сейсмичность — «background seismicity») этих основных мегаземлетрясений (1952 г., М 9,0 и 2025 г., М 8,8), попадающих в пределы 1–2-кратной длины разорванного разлома согласно критериям USGS для зоны афтершоков.¹⁰ Для последующих сравнений прямых афтершоков границы сейсмической зоны были выбраны равными 1 длине разрыва разлома. Для мегаземлетрясения 1952 года длина разрыва оценивалась примерно в 600–700 км.¹¹ Для мегаземлетрясения 2025 года длина разрыва оценивалась примерно в 600 км.¹²

¹⁰ <https://www.usgs.gov/faqs/foreshocks-aftershocks-whats-difference>

¹¹

https://www.researchgate.net/publication/227083108_Asp erityy_Distribution_of_the_1952_Great_Kamchatka_Earthquake_and_its_Relation_to_Future_Earthquake_Potential_in_Kamchatka

¹² <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772467025000703>

Методическое обоснование выбора границ сейсмических зон для сравнения афтершоков после мегаземлетрясений на Камчатке в 1952 и 2025 годах

Аналитическое пространственное окно было определено как 155,0° в.д. – 163,5° в.д., 49,5° с.ш. – 55,0° с.ш. с целью захвата прямых афтершоков, связанных с мегатрастовыми разрывами землетрясений Камчатка 1952 (M 9,0) и 2025 (M 8,8), при сохранении максимальной сопоставимости обоих событий.

Выбор продольных границ (155,0 – 163,5° в.д.)

Восточная и западная границы были выбраны таким образом, чтобы полностью охватывать продольный протяжённый диапазон обеих косейсмических разрывов, что следует из пространственного распределения ранних афтершоков и моделей косейсмического скольжения (Yagi и соавт., 2025, рис. 1). Выбранный диапазон превышает продольную длину более короткого разрыва (2025) и одновременно покрывает всё ядро более протяжённого разрыва 1952 года, не включая при этом значительной удалённой или тектонически несвязанной сейсмичности.

Выбор северной границы (55,0° с.ш.)

Северная граница аналитического окна была установлена таким образом, чтобы охватывать северный край наблюдаемого поля афтершоков обоих событий.

Ключевое обоснование южной границы (49,5° с.ш.)

Южная граница аналитического окна (49,5° с.ш.) была выбрана сознательно консервативно на основе сочетания геометрических, сейсмологических и тектонических критериев. Как следует из исследования Yagi и соавт., 2025, рис. 1c–d, непрерывное косейсмическое скольжение и связанное ядро афтершоков обоих событий не простираются южнее примерно 49,5° с.ш. Сейсмичность, наблюдаемая южнее этой границы, является разреженной, пространственно несвязанной и представляет собой переход к тектонической обстановке Курильской дуги.

Включение областей южнее 49,5° с.ш. привело бы к:

- смешению мегатрастовых афтершоков с переходной или дистанционно индуцированной сейсмичностью,
- снижению тектонической однородности анализируемой области,
- потенциальному искажению сравнения свойств афтершоков обоих событий.

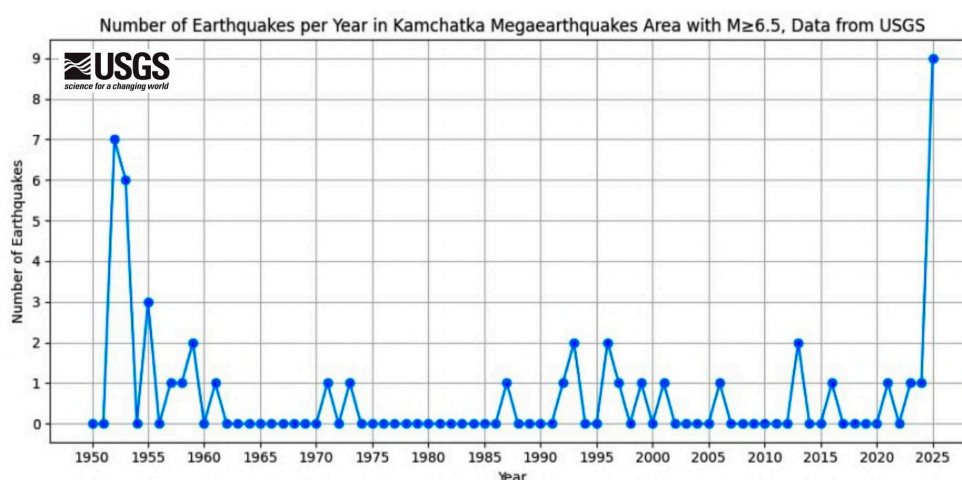


Рис. 7: Количество землетрясений с $M \geq 6,5$ в сейсмической зоне мегаземлетрясений на Камчатке, данные: USGS

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. The Kamchatka Megaequakes Area is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 155.0°E–163.5°E longitude and 49.5°N–55.0°N latitude.

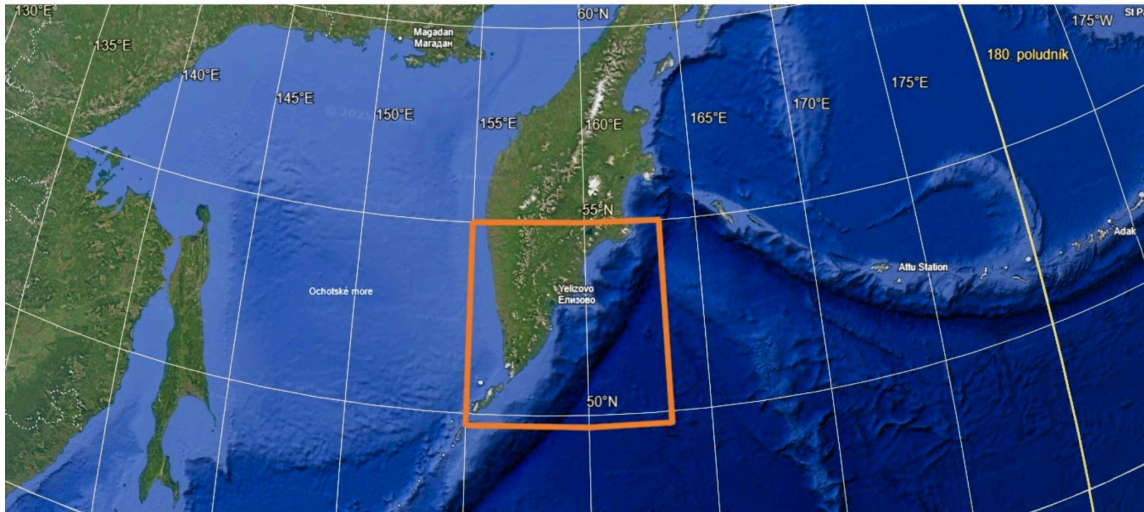


Рис. 8: Зона для сравнения толчков до и после мегаземлетрясений на Камчатке, источник: Google Earth, собственная обработка

График из каталога USGS (Рис. 7) показывает, что возникновение землетрясений с магнитудой $M \geq 6,5$ в мегатрастовой области Камчатки ($155,0^\circ$ в.д. – $163,5^\circ$ в.д., $49,5^\circ$ с.ш. – $55,0^\circ$ с.ш.) сильно концентрируется в периоды, непосредственно связанные с мегаземлетрясениями. Мегаземлетрясение от 4 ноября 1952 года имело в первые 5 месяцев после события 7 афтершоков магнитудой $M 6,5$ и выше (4 ноября 1952 – 4 апреля 1953).

Похожий, но ещё более выраженный рост активности наблюдается в 2025 году после мегаземлетрясения $M 8,8$, которое демонстрирует наивысшую годовую частоту сильных предвестников и афтершоков за весь анализируемый временной интервал. Это землетрясение, более слабое всего на две десятые доли магнитуды, уже имеет в сумме 4 предвестника магнитудой $M 6,5$ и выше и 4 афтершока магнитудой $M 6,5$ и выше в течение 5 месяцев с момента его возникновения (29 июля 2025 – 31 декабря 2025).

Период афтершоков, вероятно, является более длительным, однако в анализе у нас пока имеется в распоряжении лишь 5 месяцев с момента последнего мегаземлетрясения. Вне этих двух периодов появление землетрясений $M \geq 6,5$ является спорадическим либо отсутствует вовсе, что подтверждает, что сильная сейсмичность в данной области в первую очередь связана с мегатрастовыми разрывами и их последующими афтершоковыми последовательностями.

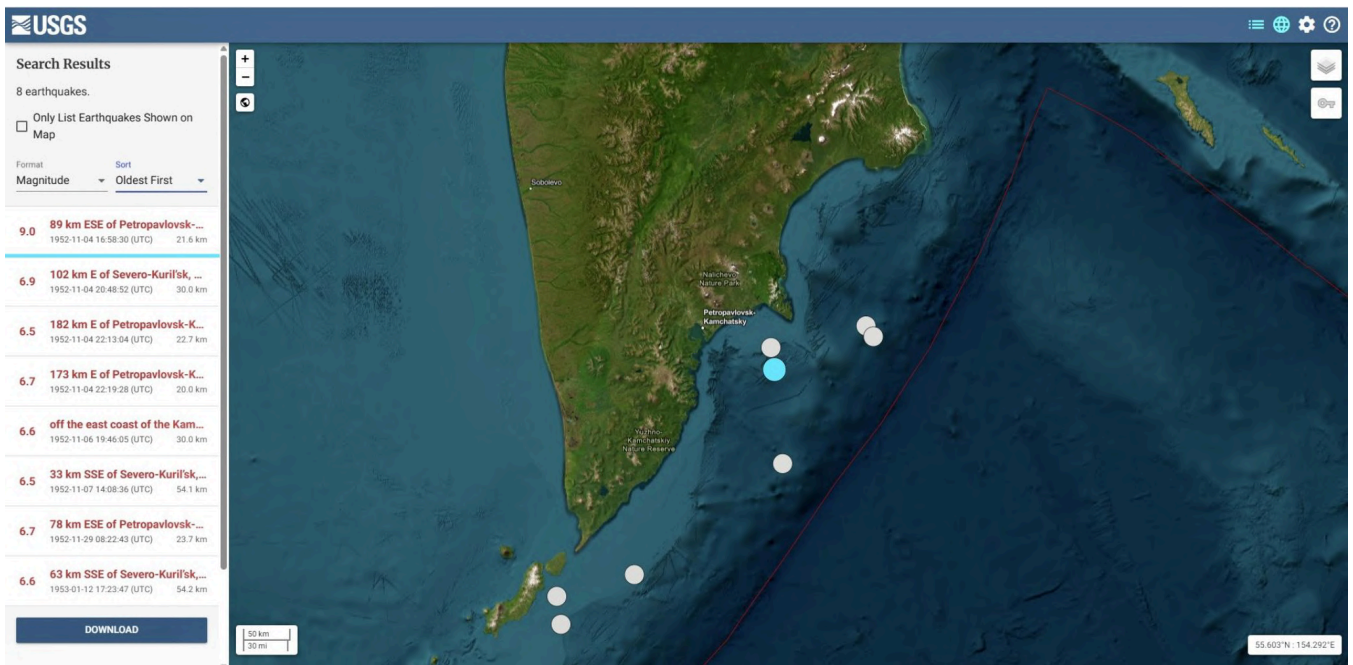


Рис. 9: Список землетрясений и их расположение с магнитудой более М 6,5 в зоне афтершоков мегаземлетрясения 1952 года и первых 3 месяцев 1953 года по данным USGS: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

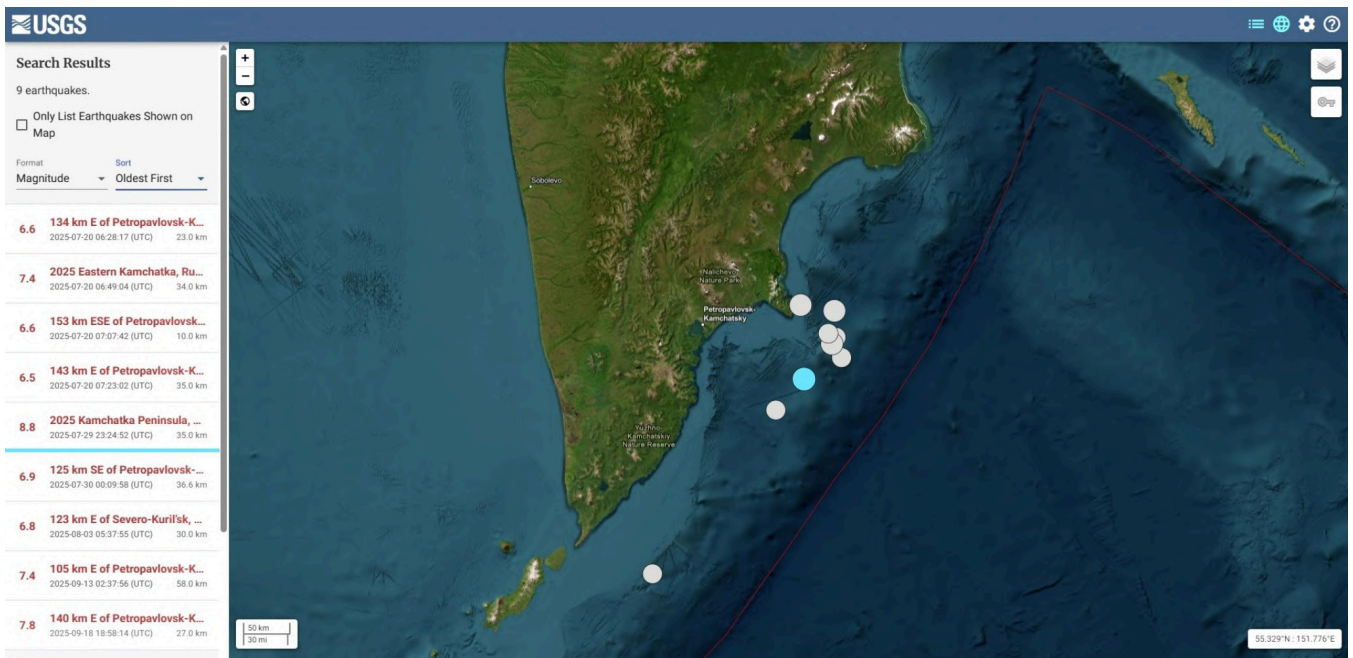


Рис. 10: Список землетрясений и их расположение с магнитудой более М 6,5 в зоне предвестников и афтершоков мегаземлетрясения 2025 года по данным USGS: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Кроме того, мегаземлетрясение от 4 ноября 1952 года (М 9) не имело ни одного предвестника или афтершока с магнитудой М 7 и выше, тогда как мегаземлетрясение от 29 июля 2025 года (М 8,8) имело в том же году один сильный предвестник магнитудой М 7,4 и два сильных афтершока магнитудами М 7,4 и М 7,8. Афтершоки сравниваются за временной интервал 5 месяцев с момента возникновения мегаземлетрясения:

- 20 июля 2025: М 7,4 (Камчатка) — первоначально считалось главным землетрясением
- 29 июля 2025: М 8,8 (Камчатка) — фактическое мегаземлетрясение
- 13 сентября 2025: М 7,4 (Камчатка) — афтершок
- 18 сентября 2025: М 7,8 (Камчатка) — афтершок

Критическое различие: это историческое мегаземлетрясение 1952 года не имело ни одного предвестника или афтершока с магнитудой $M \geq 7$ в первые месяцы после события.¹³ Камчатские землетрясения 2025 года, таким образом, ведут себя фундаментально иначе, чем исторический прецедент.

Землетрясения с магнитудой $M \geq 6,5$ были выбраны в сравнительном исследовании с точки зрения надёжности их регистрации как минимум с 1950-х годов.

Нарушение закона Бата

Ещё более примечательным, чем само главное мегаземлетрясение этого года, является характер предвестников и афтершоков, которые нарушают фундаментальные сейсмологические закономерности. Согласно закону Бата¹⁴, самый сильный афтершок обычно примерно на 1,2 единицы магнитуды слабее основного землетрясения. Однако камчатское мегаземлетрясение этого года драматически нарушает данное правило.

«Все сейсмологи считали, что афтершок, произошедший 13 сентября (его магнитуда составила 7,4 — прим. NSN), был уже максимально сильным, как и ожидается согласно законам сейсмологии. Обычно он имеет магнитуду на 1,2 ниже, чем основной толчок. Однако затем произошёл ещё более сильный», — заявил Юрий Виноградов, директор Единой геофизической службы Российской академии наук.¹⁵

27 февраля 2010 года в Чили произошло мегаземлетрясение с той же магнитудой, что и камчатское мегаземлетрясение этого года — $M \geq 8,8$. В совокупности эти два землетрясения делят между собой 6-е место среди самых сильных землетрясений в измеряемой истории. Оба землетрясения произошли на одинаковой глубине: глубина гипоцентра чилийского мегаземлетрясения составляла 35 км¹⁶, и глубина камчатского мегаземлетрясения также составляла 35 км.¹⁷

Braile (2010) в своём исследовании анализировал прямые форшоки и афтершоки (а не фоновую сейсмичность — «background seismicity») чилийского мегаземлетрясения в его непосредственной сейсмической зоне (Рис. 11 - 12).¹⁸ Dengler (2025) анализировал крупные предвестники и афтершоки камчатского мегаземлетрясения в его непосредственной сейсмической зоне (Рис. 13).¹⁹

Сравнение хода форшоков и афтершоков камчатского мегаземлетрясения текущего года с землетрясением аналогичной силы в Чили ($M \geq 8,8$ от 27 февраля 2010 года) показывает существенные различия. В случае чилийского землетрясения не было зафиксировано ни одного форшока с магнитудой выше $M \geq 6,0$, а после главного толчка не произошло ни одного прямого афтершока сильнее $M \geq 7,0$.

¹³ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php?year=1952>

¹⁴ <https://arxiv.org/abs/physics/0307083>

¹⁵ <https://nsn.fm/incident/novoe-moschnoe-zemletryasenie-na-kamchatke-privelo-seismologov-v-zameshatelstvo>

¹⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S089598112300514X>

¹⁷ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/executive>

¹⁸ <https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/chile/chile.htm>

¹⁹

<https://www.msn.com/en-us/public-safety-and-emergencies/natural-disasters/lori-dengler-a-very-large-aftershock-reminder-that-the-kamchatka-earthquake-sequence-is-not-over/ar-AA1MYowB>

Feb. 27, 2010 M8.8 Chile Earthquake: Seismic/Eruption Views, Seismicity, Main Shock-Aftershock Sequence

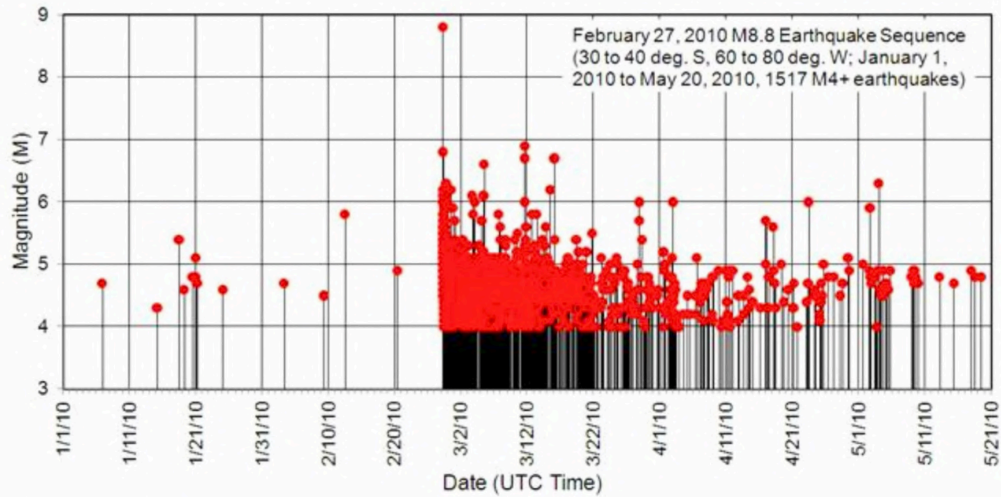
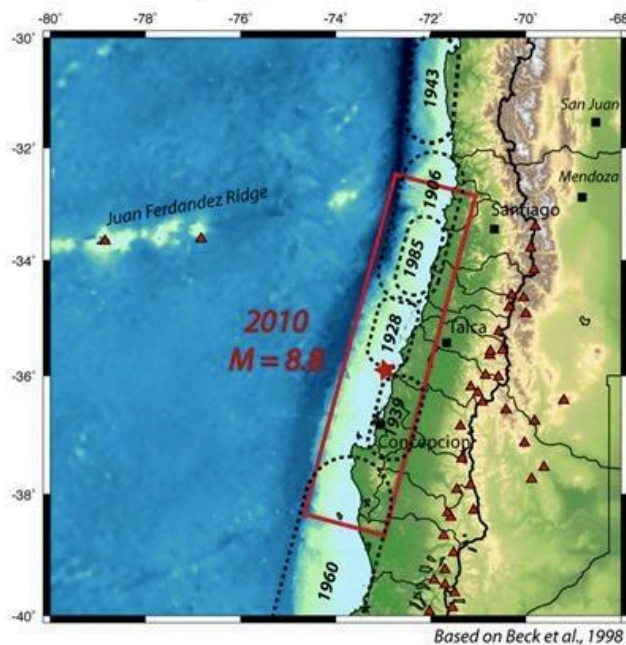


Рис. 11: Предвестники и афтершоки мегаземлетрясения в Чили в 2010 году. Источник: <https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/chile/chile.htm>

Magnitude 8.8 OFFSHORE MAULE, CHILE
Saturday, February 27, 2010 at 06:34:17 UTC



Coastal Chile has a history of very large earthquakes. Since 1973, there have been 13 events of magnitude 7.0 or greater.

The February 27 shock originated about 230 km north of the source region of the magnitude 9.5 earthquake of May, 1960 – the largest earthquake worldwide in the last 200 years or more.

An outline of the approximate rupture from this Magnitude 8.8 earthquake and it's relationship to the largest earthquakes along the coast of Chile this century.

Рис. 12: Зона афтершоков мегаземлетрясения в Чили в 2010 году. Источник: <https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/chile/chile.htm>

В случае Камчатки в 2025 году развитие сейсмической активности было значительно более интенсивным. Главному землетрясению предшествовало как минимум семь форшоков с магнитудой выше М 6,0, при этом два из них превысили М 7,0. Уже годом ранее, в 2024 году, в том же районе произошло землетрясение магнитудой М 7,0, которое многие сейсмологи интерпретировали как разрядку накопленного напряжения. Однако последующее развитие показало, что это событие скорее стало предвестником гораздо более мощного землетрясения. После главного толчка последовали исключительно сильные афтершоки — 13 сентября 2025 года магнитудой М 7,4 и 18 сентября 2025 года магнитудой М 7,8.

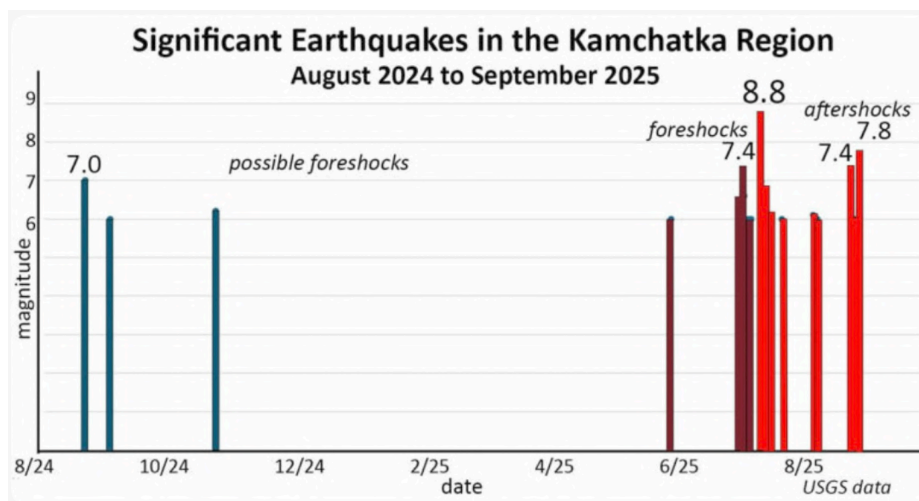


Рис. 13: Предвестники и афтершоки с магнитудой выше 6 мегаземлетрясения на Камчатке в 2024–2025 годах.

Источник:

<https://www.msn.com/en-us/public-safety-and-emergencies/natural-disasters/lori-dengler-a-very-large-aftershock-reminder-the-kamchatka-earthquake-sequence-is-not-over/ar-AA1MYowB>

Классические сейсмологические модели предсказывают, что самый сильный афтершок имеет магнитуду примерно на 1,2 меньше, чем основной толчок. В случае камчатской последовательности, однако, было зафиксировано несколько сильных афтершоков и, в частности, один с магнитудой М 7,8, который выходит за рамки этого закона. Некоторые афтершоки достигли магнитуды, превышающей М 7,0, что само по себе представляет собой сильное землетрясение.

Кроме того, даже при более слабых толчках проявляется значительная разница между этими двумя мегаземлетрясениями с одинаковой магнитудой М 8,8 и приблизительно одинаковой глубиной очага. В то время как мегаземлетрясение в Чили в 2010 году сгенерировало примерно 1000 афтершоков с магнитудой $M \geq 4,5$ (рис. 15), мегаземлетрясение на Камчатке в 2025 году произвело значительно больше — примерно 1700 (рис. 14). Эти различия наглядно показаны на графиках на рис. 14 - 15, которые сравнивают количество афтершоков в обоих случаях.

Координаты области для фиксации афтершоков чилийского мегаземлетрясения — $75,0^\circ$ з.д. – $71,0^\circ$ з.д. и $38,0^\circ$ ю.ш. – $32,5^\circ$ ю.ш. — были выбраны таким образом, чтобы как можно точнее охватить основную область предвестниковой и афтершоковой сейсмической активности, связанной с мегаземлетрясением М 8,8 в Чили в 2010 году. Это пространство включает сегмент границы между плитами Наска и Южноамериканской плитой, на котором произошёл основной разрыв, и одновременно охватывает как продольный, так и поперечный диапазон наблюдаемой зоны афтершоков, идентифицированной в сейсмологических каталогах.

Протяжённость анализируемой области с запада на восток (75° з.д. – 71° з.д.) простирается от океанической части разломной зоны до континентальных областей, что позволяет зафиксировать сейсмическую активность вдоль всего сдвигового интерфейса, а также в перекрывающей континентальной коре. Протяжённость с севера на юг ($38,0^\circ$ ю.ш. – $32,5^\circ$ ю.ш.) соответствует длине основной разрывной зоны мегаземлетрясения и включает области с наибольшей плотностью афтершоков.

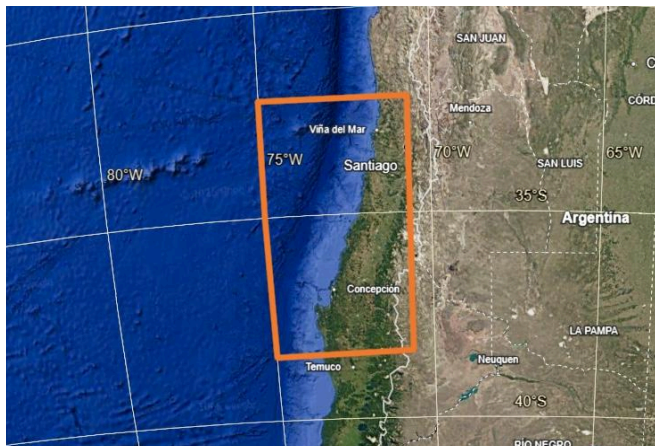
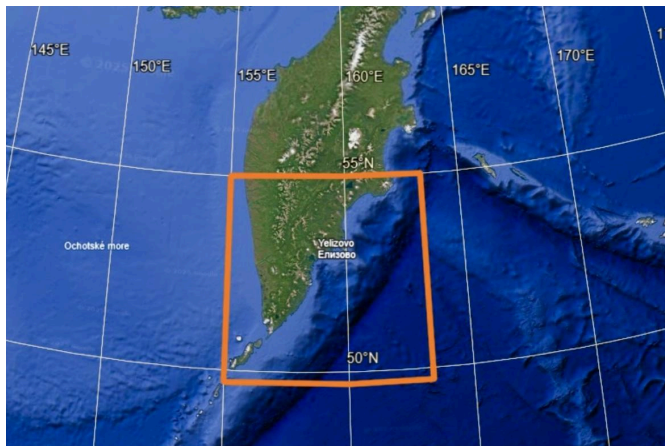
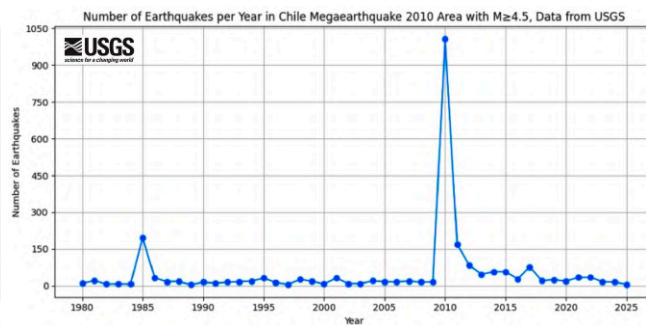
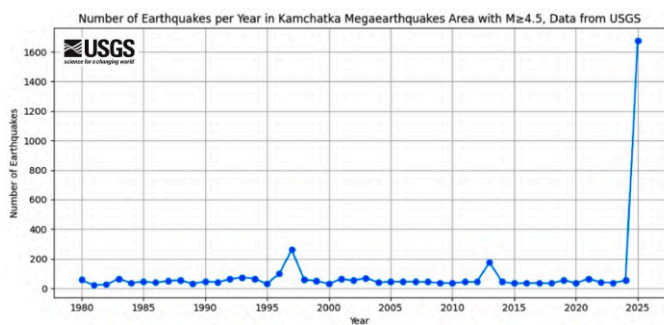


Рис. 14: Землетрясения с $M \geq 4,5$ на Камчатке, анализируемая пространственная область: $155,0^\circ$ в.д. - $163,5^\circ$ в.д., $49,5^\circ$ с.ш. - $55,0^\circ$ с.ш., источник данных: USGS, источник изображения: Google Earth, собственная обработка

Рис. 15: Землетрясения с $M \geq 4,5$ в Чили, анализируемая пространственная область: $75,0^\circ$ з.д. - $71,0^\circ$ з.д., $38,0^\circ$ ю.ш. - $32,5^\circ$ ю.ш., источник данных: USGS, источник изображения: Google Earth, собственная обработка

Такое поведение может указывать на то, что произошло не просто однократное высвобождение накопленного напряжения, но что весь регион проходит через процесс глубокой тектонической реорганизации.

Вулканическая активность на Камчатке: одновременное пробуждение шести вулканов

Всего через несколько месяцев после камчатского мегаземлетрясения этого года на полуострове Камчатка одновременно произошли извержения шести вулканов — по мнению учёных, это исключительно редкое явление, в последний раз наблюдавшееся в 1737 году после землетрясения магнитудой $M 9,0$. Юрий Демянчук, руководитель вулканологической станции в посёлке Ключи, заявил, что за пять десятилетий своей работы на Камчатке он не видел столь масштабной вулканической активности.²⁰

Камчатка является домом для 29 активных вулканов и ещё десятков потенциально активных. В 2025 году произошло резкое усиление активности не только у традиционных «рабочих» вулканов, таких как Ключевская сопка (самый высокий активный вулкан Евразии высотой 4750 метров), но и у вулканов, которые оставались спокойными десятилетиями или даже столетиями.

Особенно исключительным является вулкан Крашенинникова, который извергся впервые примерно за 600 лет — его последнее известное извержение датируется XV веком. Вулкан Кроноцкий извергся после 100 лет покоя. Пробуждение долго «спящих» вулканов может сигнализировать о фундаментальных изменениях в глубоких магматических системах.

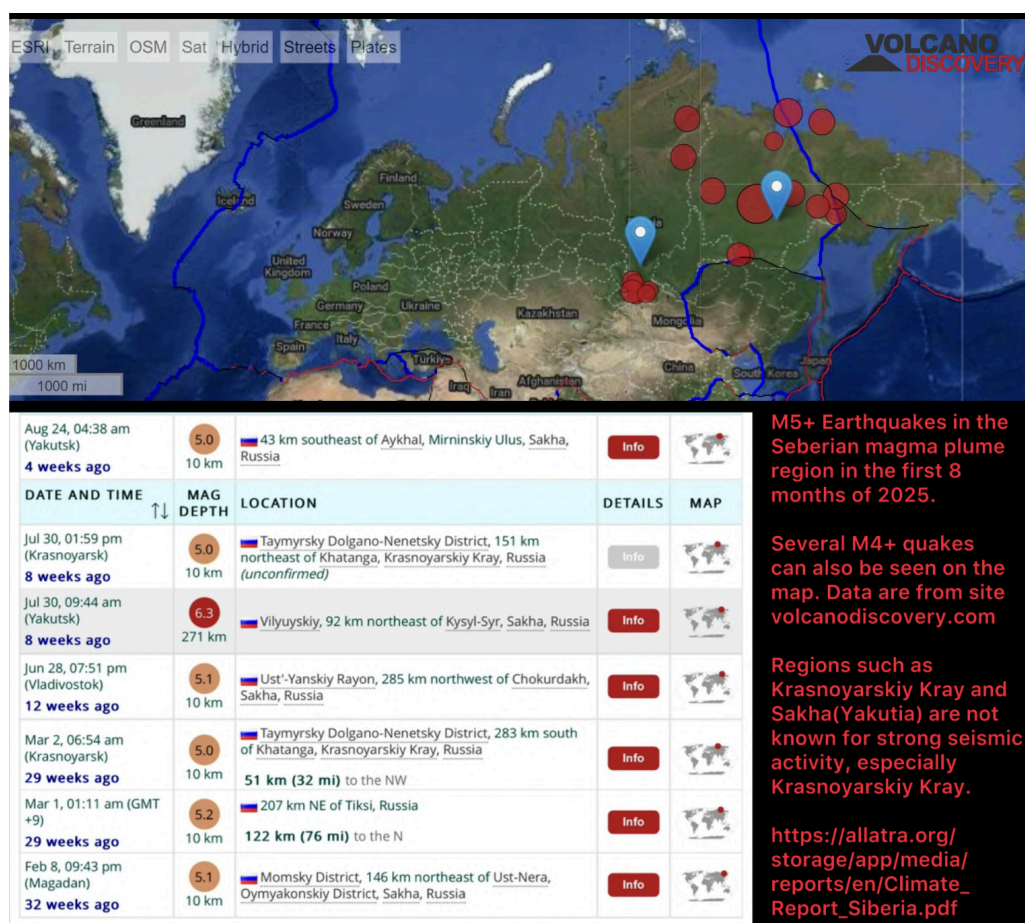
²⁰ <https://www.ap7am.com/en/110864/volcano-in-russias-kamchatka-ejects-ash-up-to-92-km-high>

Сибирская Арктика: беспрецедентная активность на стабильной платформе

Одним из самых загадочных и потенциально наиболее значимых явлений 2025 года является необычно сильная сейсмическая активность, зафиксированная в районах Красноярска и Якутии (Рис. 16 - 17). Это обстоятельство с геологической точки зрения является крайне необычным, поскольку данный регион расположен в самом сердце Сибирской платформы — одной из древнейших и наиболее стабильных тектонических структур на Земле.

Сибирская платформа представляет собой кратонную область, то есть часть континентальной коры возрастом более двух миллиардов лет, отличающуюся исключительной стабильностью. В таких регионах сильные землетрясения крайне редки, поскольку отсутствие активных тектонических границ означает минимальное накопление напряжений. Тем более удивительно, что именно в 2025 году эта область начала проявлять сейсмическую активность, нетипичную для неё.²¹

Сергей Шibaев, директор якутского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», отметил, что все школы, стадионы и государственные учреждения в Якутске должны проектироваться и строиться с учётом сейсмической опасности магнитуды 7.²²



21

<https://news.sgnorilsk.ru/2025/03/05/zemletryasenie-v-hatange-neharakternoe-yavlenie-dlya-sejsmicheskogo-spokojnogo-tajmyra/>

<https://dzen.ru/a/ZqjG6iMaR2Fxfei4>

22 <https://ysia.ru/v-yakutii-rastet-kolichestvo-zemletryasenij-uchenyj-rasskazal-o-sejsmicheskoy-opasnosti/>

Рис. 16: Землетрясения с магнитудой выше М 5 в районах Красноярского края и Якутии за первые 8 месяцев 2025 года. Источник: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/russia/sakha/archive/2025.html>, <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/russia/krasnoyarskiy-kraj/archive/2025.html>

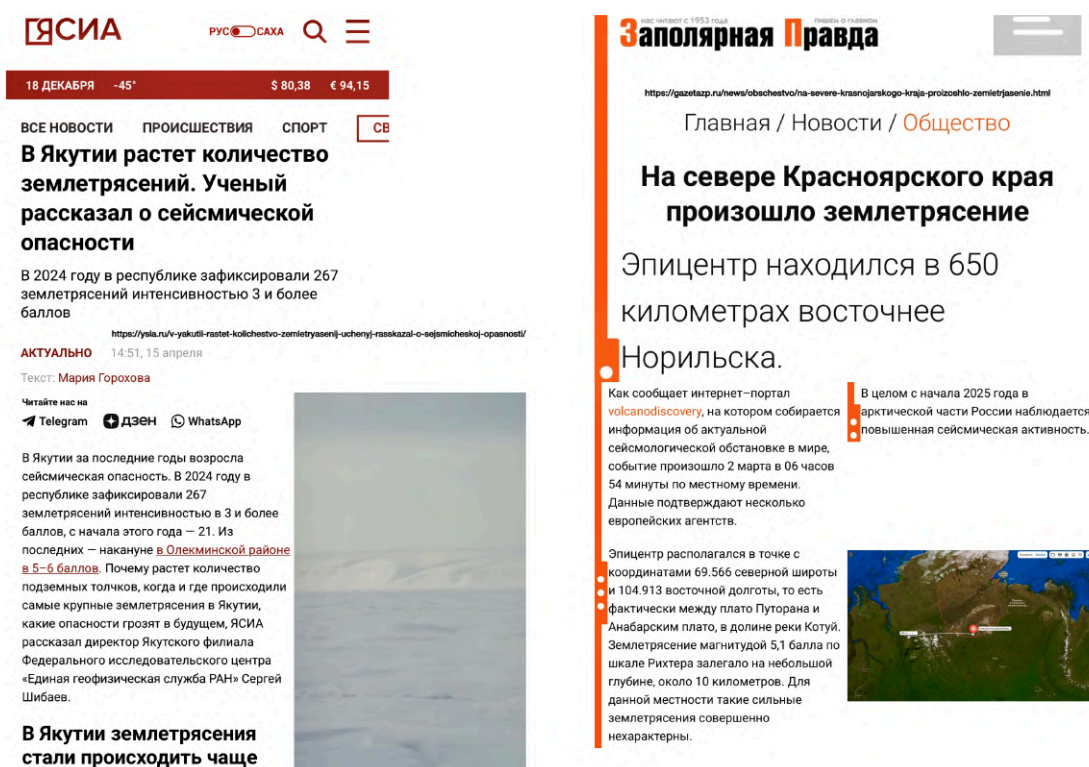


Рис. 17: «Землетрясение произошло на севере Красноярского края» и «Количество землетрясений в Якутии растёт», источник:

<https://gazetazp.ru/news/obschestvo/na-severe-krasnojarskogo-kraja-proizoshlo-zemletrjasenie.html>, <https://ysia.ru/v-yakutii-rastet-kolichestvo-zemletryasenij-uchenyj-rasskazal-o-sejsmicheskoy-opasnosti/>

Мьянма: феномен «supershear»-землетрясения и беспрецедентный рост сейсмической активности

28 марта 2025 года Мьянму поразило землетрясение магнитудой М 7,7, которое обладало исключительной характеристикой — это было так называемое рекордное «supershear»-землетрясение.²³ Данный термин обозначает землетрясения, при которых разломная трещина распространяется со скоростью, превышающей скорость сдвиговых сейсмических волн в данном материале (до 5 км в секунду).²⁴

Supershear-землетрясения встречаются крайне редко и представляют собой наиболее разрушительный тип сейсмических событий. Когда разлом распространяется со сверхзвуковой скоростью (относительно сейсмических волн), формируется своеобразная «сейсмическая ударная волна», аналогичная звуковому удару у сверхзвуковых самолётов. Это приводит к значительно большему высвобождению энергии и более разрушительным последствиям по сравнению с обычными землетрясениями.

²³ <https://phys.org/news/2025-08-reconstruction-myanmar-earthquake-supershear-event.html>

<https://phys.org/news/2025-07-supershear-boomerang-rupture-myanmar-earthquake.html>

²⁴ <https://doi.org/10.1029/2001GL013112>

Возникновение такого землетрясения в Мьянме, расположенной в сложной тектонической зоне взаимодействия Индийской и Евразийской плит, является важным индикатором экстремально высоких напряжений в земной коре.

Number of quakes per year in Myanmar M4+



<https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html>

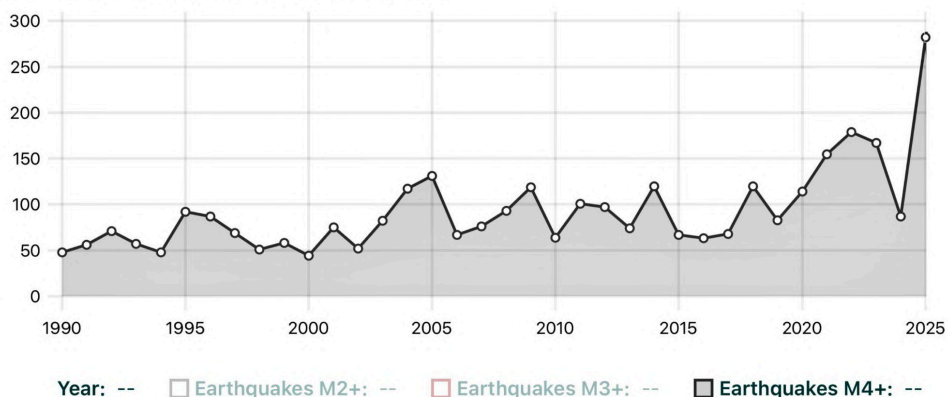


Рис. 18: Количество землетрясений с M4+ в Мьянме, источник:
<https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html>

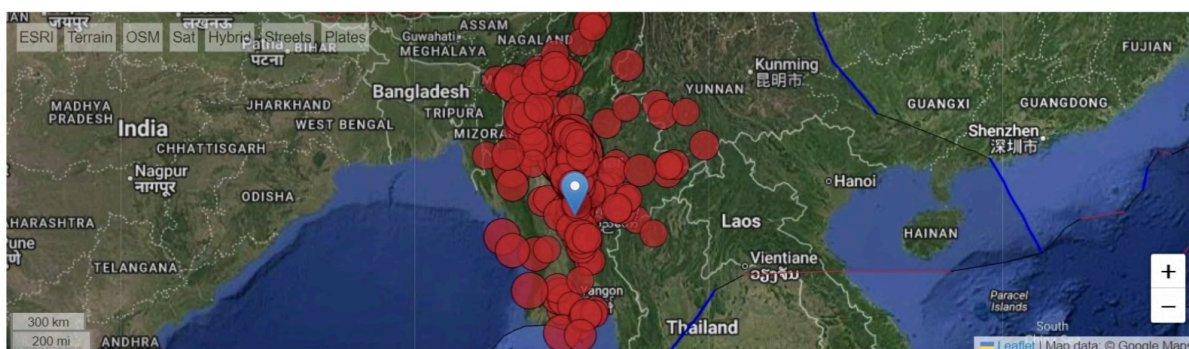


Рис. 19: Количество землетрясений с M4+ в Мьянме, за 2024 год, источник:
<https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html>

В 2025 году Мьянма переживает также беспрецедентную сейсмическую активность по количеству землетрясений. Если обычно в Мьянме ежегодно фиксировалось менее 100–150 землетрясений магнитудой M 4 и выше, то за весь 2025 год в Мьянме было зарегистрировано в общей сложности 282 землетрясения магнитудой 4 и выше²⁵ по данным портала volcanodiscovery и 300 землетрясений магнитудой M 4 и выше по данным портала earthquakelist.²⁶

Это землетрясение магнитудой M7,7 и последующие афтершоки вызвали резкий рост сейсмической активности, как показано на рисунках 18–19.

База данных VolcanoDiscovery была выбрана для анализа сейсмической активности в данной области, поскольку она содержала наибольшее количество зарегистрированных землетрясений по сравнению с базами данных USGS и ISC, причём в некоторые годы число событий было даже примерно вдвое больше.

²⁵ <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html>

²⁶ <https://earthquakelist.org/myanmar/>

Регион Эгейской плиты и прилегающие области: беспрецедентный рост активности

Более широкая область Эгейской плиты переживала в 2025 году беспрецедентный рост сейсмической и вулканической активности, который значительно превышал исторические записи и сигнализирует о потенциально фундаментальных изменениях в тектоническом и вулканическом режиме региона.

Количество землетрясений с магнитудой $M \geq 4$ в этой области в 2025 году превысило 500, что представляет собой более чем двукратный рост по сравнению с обычным средним значением 200–250 событий в год (рис. 20–21).

Область Эгейской плиты относится к числу наиболее хорошо сейсмологически мониторируемых регионов Средиземноморья, и каталоги в этой области являются надёжными для землетрясений примерно $M \geq 4$ уже с 80–90-х годов.²⁷

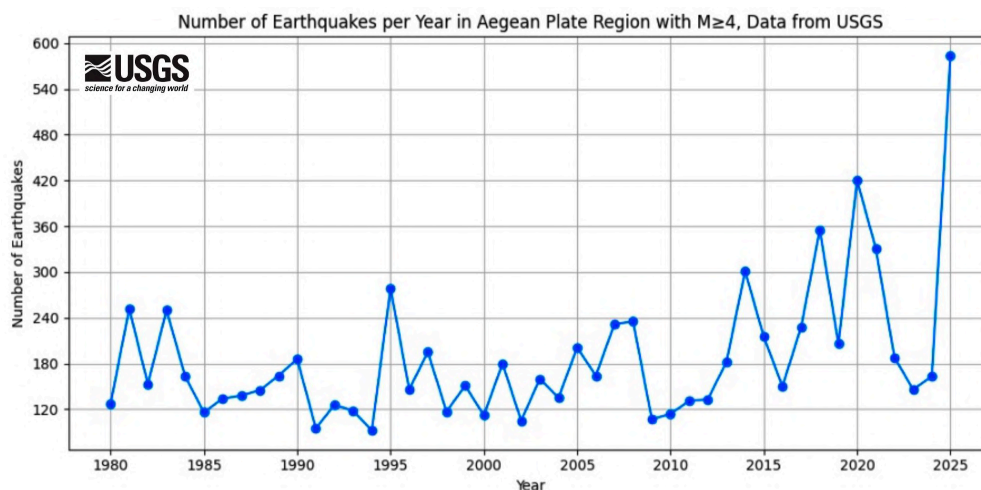


Рис. 20: Количество землетрясений с $M \geq 4$ в области Эгейской плиты, данные: USGS
<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

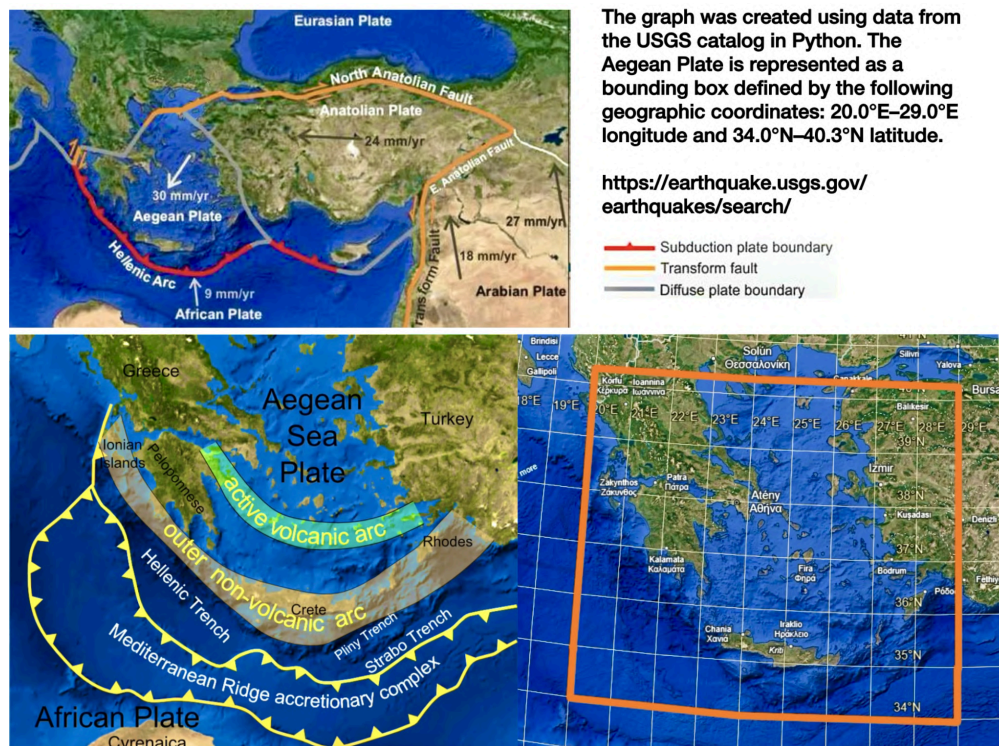


Рис. 21: Анализируемая зона Эгейской плиты, источники:

<https://www.keeptalkinggreece.com/2020/01/25/turkey-earthquake-greece-lekkas/> (слева вверху),
https://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_%C3%A9g%C3%A9en#/media/Fichier%3AHellenic_arc.png (слева внизу), Google Earth,
 собственная обработка (справа внизу)

Данный регион является частью Эгейско-анатолийского деформационного пояса, где взаимодействуют три тектонические плиты: Эгейская, Анатолийская, Африканская плита.

Эгейская вулканическая дуга является одной из самых активных тектонико-вулканических зон Европы. Этот процесс ответственен за существование следующих вулканических систем:

- Санторини–Колумбо (самая известная и наиболее активная)
- Нисирос — активная гидротермальная деятельность²⁸, последняя эрупция около 24 000 лет назад²⁹
- Метана — активные фумаролы и горячие источники³⁰
- Милос — обширная гидротермальная активность в окрестностях³¹

Повышенная сейсмическая активность в 2025 году указывает на реактивацию этой вулканической дуги.

Эгейская плита имеет более тонкую кору по сравнению с континентальными областями — её толщина составляет всего 25–30 километров, тогда как в стабильных континентальных регионах она достигает 35–40 километров.³² Более тонкая кора означает, что регион быстрее реагирует на изменения в глубинных процессах Земли.

Земная кора здесь постоянно растягивается, разрывается и проседает, что вызывает многочисленные землетрясения и также связано с вулканической активностью. Скорость

²⁸ <https://nisyros.de/en/geology-of-nisyros-volcano/the-volcanic-craters-of-nisyros>

²⁹ <https://www.mdpi.com/2076-3263/11/3/132>

³⁰ <https://athensattica.com/point/methana-peninsula/>

³¹ <https://greekcitytimes.com/2026/01/01/milos-island-hydrothermal-vents-discovery/>

³² <https://academic.oup.com/qji/article/169/3/1139/625072?login=false>

растяжения в отдельных районах достигает 3–4 сантиметров в год, что с геологической точки зрения является очень быстрым процессом.³³

Эгейская плита может функционировать как «сейсмический индикатор» более глубоких процессов в мантии, реагируя первой на изменения, которые позже проявятся и в других регионах.

Санторини: Беспрецедентный рой землетрясений и движение магмы

Санторини (древняя Фера) является одной из самых известных вулканических систем в мире, также знаменитой своей драматической геологической историей.

Крупнейшее известное извержение Санторини произошло около 1600 года до н. э. (точная датировка является предметом дискуссий) и достигло уровня 7 по шкале VEI. Это так называемое минойское извержение выбросило около 60 кубических километров вулканического материала и сформировало современную кальдеру. Извержение вызвало мощное цунами, которое затронуло всё восточное Средиземноморье. Многие исследователи связывают его с гибелью бронзового минойского цивилизационного центра на Крите.

В начале 2025 года учёные зафиксировали беспрецедентный рой землетрясений в районе Санторини, который, согласно исследованию Университета Орегона, был связан с движением магмы под вулканом.³⁴ Если ранее на Санторини практически не фиксировались землетрясения магнитудой 4 и выше, то в этом году их было более 350 согласно базе данных USGS (Рис. 22).

Исследование с применением передовых сейсмических методов показало, что землетрясения были вызваны не только тектоническими процессами, но и перемещением магмы в подземных камерах под кальдерой. Это движение магмы создавало давление, которое проявлялось в виде серии землетрясений.

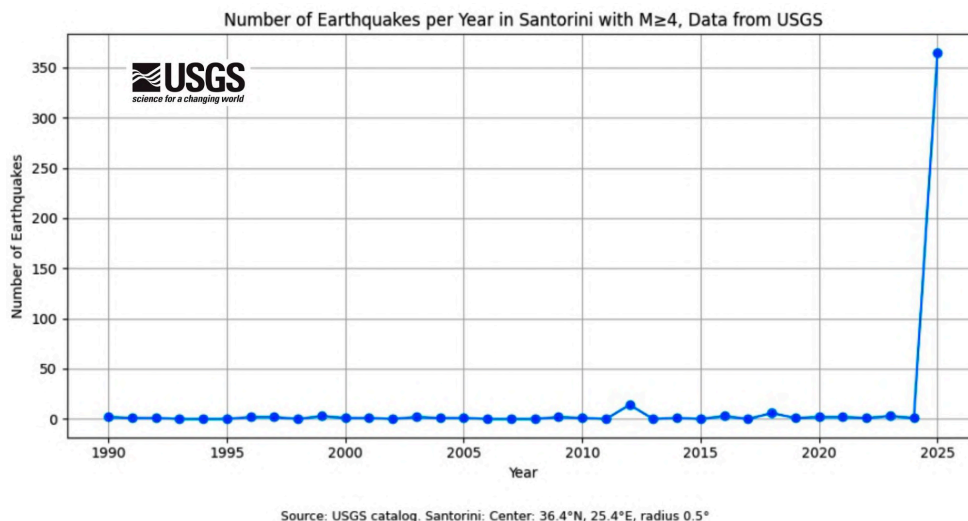
Греческие и международные вулканологические группы зафиксировали:³⁵

- резкий рост сейсмической активности,
- деформации поверхности (GPS-измерения показали небольшое поднятие центральной части кальдеры),
- повышенные выбросы вулканических газов из подводных fumarol.

³³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040195105005123>

³⁴ <https://news.uoregon.edu/study-finds-magma-helped-drive-recent-santorini-earthquakes>

³⁵ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2025GL115856>



Source: USGS catalog. Santorini: Center: 36.4°N, 25.4°E, radius 0.5°

Рис. 22: Количество землетрясений магнитудой 4 и выше в районе кальдеры Санторини, источник данных USGS:

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Колумбо: растущая магматическая камера под морем

Примерно в 7 километрах к северо-востоку от Санторини расположена подводная кальдера Колумбо — самый активный подводный вулкан региона Санторини. Диаметр кальдеры составляет около 3 километров, а глубина — около 500 метров. Она образовалась в результате последнего крупного эксплозивного извержения в 1650 году с массивными выбросами тефры.³⁶

Подводные роботы и океанографические экспедиции в 2025 году зафиксировали:³⁷

- новые фумаролы (подводные вентиляционные выходы вулканических газов) в районе Колумбо,
- повышение температуры морского дна (локально на 10–15 °C выше окружающей),
- аномалии в химическом составе морской воды, указывающие на утечку вулканических газов (CO₂, SO₂, H₂S),
- сейсмическую активность под морским дном, связанную с притоком магмы.

Новые исследования показали, что под вулканом Колумбо находится обширная магматическая камера, которая постепенно увеличивается со времени последнего извержения в 1650 году. Учёные использовали метод full-waveform inversion — продвинутую сейсмическую технику, анализирующую полный ход сейсмических волн, — благодаря чему им удалось создать детальное трёхмерное изображение магматической системы под этим подводным вулканом. Было установлено, что под кальдерой существует обширная зона частично расплавленной породы, то есть магмы, расположенная примерно на глубине 2–4 километров под морским дном. Объём магмы в этой камере постепенно увеличивается, поскольку из больших глубин постоянно поднимается новая магма, и вся система наполняется уже около 375 лет после последнего крупного извержения.³⁸

Учёные предупреждают о возможности цунамигенного извержения, поскольку активность магматической камеры может привести к чрезвычайно взрывному развитию событий. В случае контакта магмы с морской водой её взрывная сила резко возрастает. Подводные извержения представляют особый риск: горячая магма с температурой примерно 800–1200 °C при

³⁶ <https://link.springer.com/article/10.1007/s00445-025-01871-8>

³⁷ <https://goldschmidtabstracts.info/2025/31407.pdf>

³⁸ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022GC010475>

соприкосновении с водой вызывает её мгновенное испарение, что приводит к так называемым фреатомагматическим взрывам, считающимся наиболее взрывоопасным типом вулканической активности³⁹. Давление, возникающее при внезапном испарении огромного объёма воды, может привести к чрезвычайно мощным извержениям, формированию массивных цунами — когда водный столб над местом извержения резко поднимается и вызывает разрушительные волны, — а также к выбросу большого количества мелкодисперсного вулканического пепла, способного нарушить авиасообщение по всей Европе.

Исторические записи об извержении вулкана Колумбо в 1650 году описывают, что суда проходили через «кипящую морскую воду», пемза выпадала на расстоянии сотен километров от места взрыва, а в атмосферу выбрасывалось огромное количество вулканических газов. Последствия были трагическими — на близлежащих островах погибло около 70 человек.

Сочетание активности Санторини и Колумбо вызывает особую тревогу, поскольку указывает на то, что вся вулканическая система южной части Эгейского моря входит в фазу реактивации. Некоторые исследования предполагают, что обе кальдеры могут быть связаны с общим глубинным магматическим резервуаром, что означает: активность одной системы может оказывать влияние на другую.⁴⁰

Разломная линия западной Турции и Эгейского моря

Наряду с Эгейской плитой резкий рост активности переживает и соседняя Турция — в частности регион западной Турции.

В 2025 году в районе западной Турции и Эгейского моря произошло пять землетрясений с магнитудой выше М 6, чего не наблюдалось как минимум с 1950 года (Рис. 23 - 24):

- Апрель 2025: М 6,2 в районе Стамбула
- Май 2025: два землетрясения М 6+ в районе Крита (Греция)
- Август 2025: М 6+ в районе Балыкесира (Турция)
- Октябрь 2025: М 6+ в районе Балыкесира (Турция)

Концентрация пяти сильных землетрясений в течение одного года на относительно небольшой географической территории является крайне необычной и указывает на значительные изменения в распределении тектонических напряжений.

Особенно тревожными являются два землетрясения М 6+ в сентябре и октябре в районе Балыкесира, которые произошли в зоне Западноанатолийского разлома — области, где Западноанатолийская плита взаимодействует с Эгейской плитой.

³⁹ <https://geologybase.com/phreatomagmatic-erupions/>

⁴⁰ <https://www.nature.com/articles/s41586-025-09525-7>

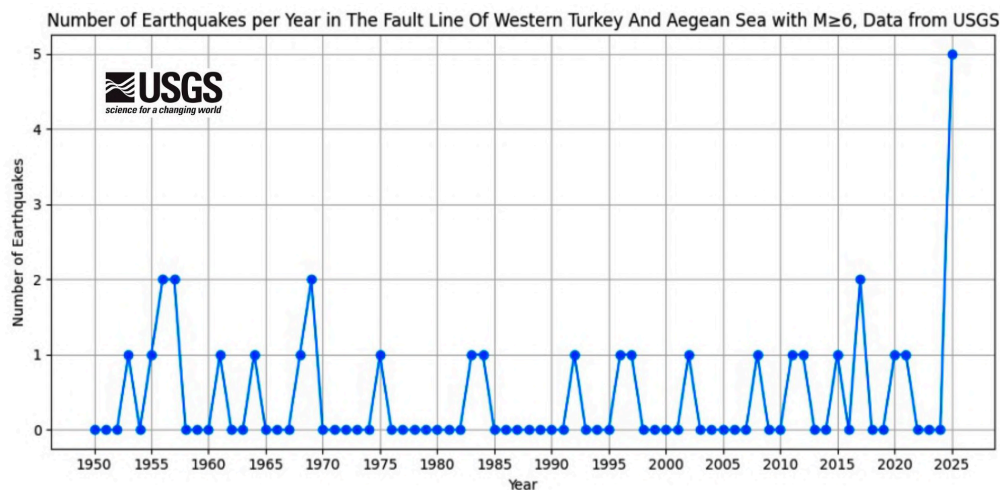


Рис. 23: Количество землетрясений с $M \geq 4$ в области разломной линии западной Турции и Эгейского моря, данные: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>



Рис. 24: Количество землетрясений с $M \geq 4$ в области разломной линии западной Турции и Эгейского моря, данные: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Ян-Майен и Шпицберген: пробуждение арктической вулканической зоны

Регион вокруг островов Ян-Майен и Шпицберген в Северном Ледовитом океане в последние годы переживает значительный рост сейсмической активности, который в 2025 году достигает новых максимумов. Эта область, часто остающаяся вне внимания из-за своей удалённости и экстремальных климатических условий, оказывается геологически гораздо более активной, чем предполагалось ранее.

Если ранее в районе Ян-Майена и Шпицбергена обычно регистрировалось не более примерно 50 землетрясений с магнитудой $M \geq 4$ в год, то в последние годы их количество превышает 70 и более (Рис. 25 - 26).

Этот более чем двукратный рост сейсмической активности в регионе, который исторически считался относительно спокойным, имеет большое геологическое значение. Арктические районы в целом характеризуются более низкой сейсмической активностью по сравнению с тектонически

активными поясами, такими как Тихоокеанское огненное кольцо, поэтому любой заметный рост активности заслуживает особого внимания.

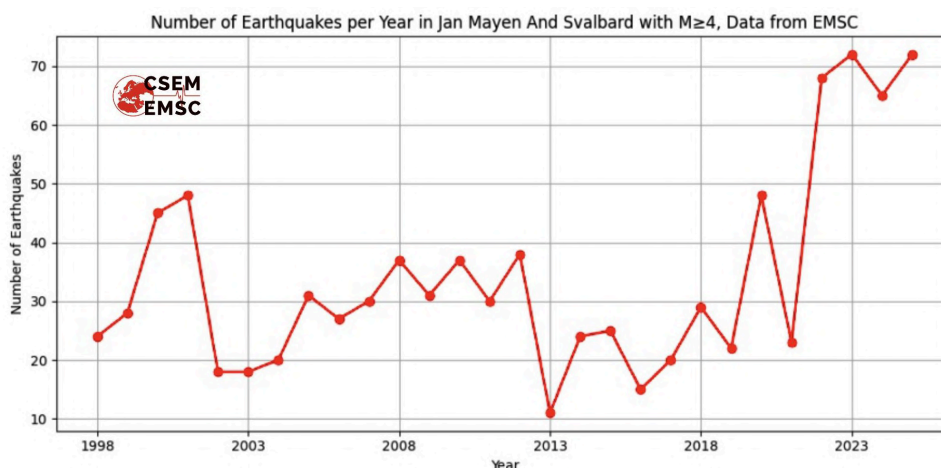


Рис. 25: Количество землетрясений с $M \geq 4$ в районе островов Ян-Майен и Шпицберген, источник данных: EMSC https://www.emsc-csem.org/Earthquake_information/

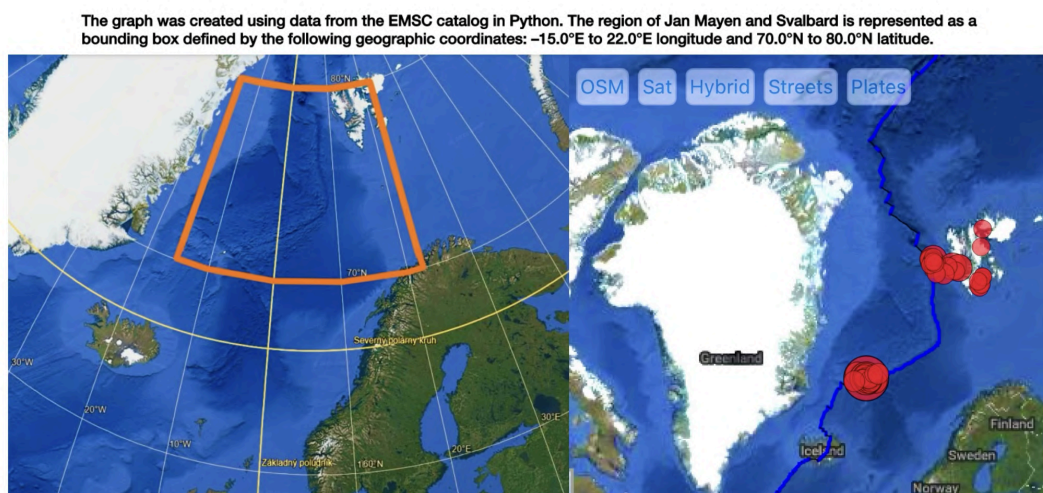


Рис. 26: Анализируемая зона района островов Ян-Майен и Шпицберген, источники: Google Earth, собственная обработка (слева), землетрясений с $M \geq 4$ в районе островов за 2024 год, источники: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/svalbard-jan-mayen/archive/2025.html> (справа)

Для анализа сейсмичности этой области была использована база данных EMSC (European-Mediterranean Seismological Centre), поскольку регионы Ян-Майен и Шпицберген покрываются главным образом норвежскими сейсмическими сетями, данные которых через EMSC регулярно публикуются и агрегируются вместе с данными других европейских агентств. Благодаря относительно плотной региональной сети станций в этой арктической области сейсмичность примерно с начала 90-х годов надёжно регистрируется начиная примерно с магнитуды $M \approx 4$ и выше.⁴¹

Ян-Майен является местом расположения активного вулкана Беренберг — единственного активного вулкана Норвегии и самой северной наземной активной вулканической системы в

⁴¹ https://nnsn.geo.uib.no/reports/2013/seismicity_2013.pdf

мире. В 2025 году он также демонстрирует повышенную сейсмическую активность, что может указывать на движение магмы под поверхностью.⁴²

Вся сейсмически наиболее активная зона расположена на границе Евразийской и Североамериканской плит. Наибольшее количество землетрясений концентрируется непосредственно вдоль разлома, что указывает на усиливающуюся сейсмическую активность в пределах краевых разломов Евразийской плиты.

⁴² https://www.volcanodiscovery.com/de/jan_mayen-earthquakes.html

3. Сейсмическая активность на окраинах Евразийской плиты в 2023–2025 годах

Повышенная и аномальная сейсмическая активность на окраинах Евразийской плиты наблюдается не только в 2025 году, но также в 2024 и 2023 годах. Представленные ниже графики на рисунках 27–39 на основе баз данных USGS и Volcano Discovery документируют выраженный и во многих случаях беспрецедентный рост числа землетрясений с магнитудой $\geq M4$ в нескольких ключевых регионах: Анатолийско-Эгейская область (Турция, 2023), Филиппины (2023), Япония — Исикава (2024), Тайвань (2024), Мьянма (2025) и разломная зона Камчатка–Курилы (2025). Эти увеличения значительно превышают долгосрочные средние значения, наблюдаемые с 1980-х годов, и включают не только основные мегаземлетрясения, но и исключительно сильные и продолжительные серии афтершоков.

Особого внимания заслуживает сопутствующая вулканическая активность на окраинах Евразийской плиты, в частности эруптивный цикл на полуострове Рейкьянес в Исландии (2023–2024) и сейсмовулканическая активация в области Эгейской плиты, включая Санторини (2025). Временное и пространственное совпадение этих явлений с повышенной сейсмичностью в зонах окраин плит указывает на состояние повышенного регионального и даже трансрегионального напряжения вдоль всей границы Евразийской плиты.

Графические данные указывают на аномальную интенсивность и синхронизацию сейсмических и вулканических процессов в последние годы. Результаты поддерживают гипотезу о том, что текущий период представляет собой исключительную фазу в динамике окраин Евразийской плиты, требующую повышенного внимания, более детального физического моделирования переноса напряжений и непрерывного мониторинга с точки зрения как сейсмического, так и вулканического риска.

Некоторые графики в данной работе не охватывают весь период до 2025 года, а заканчиваются на один или два года раньше. Причиной является фокусировка на конкретных годах, в которых произошли значительные мегаземлетрясения, с целью более наглядного отображения изменений общего числа землетрясений в соответствующем году. Основное внимание уделяется годовым суммарным значениям числа землетрясений, включая афтершоки, которые в этих случаях достигали уровней, значительно превышающих долгосрочные средние значения, зафиксированные с 1980 года. Сравнение с предыдущими периодами также показывает, что даже при возникновении сильных землетрясений сопоставимой магнитуды в прошлом общее число зарегистрированных событий в тех же регионах, как правило, было ниже.

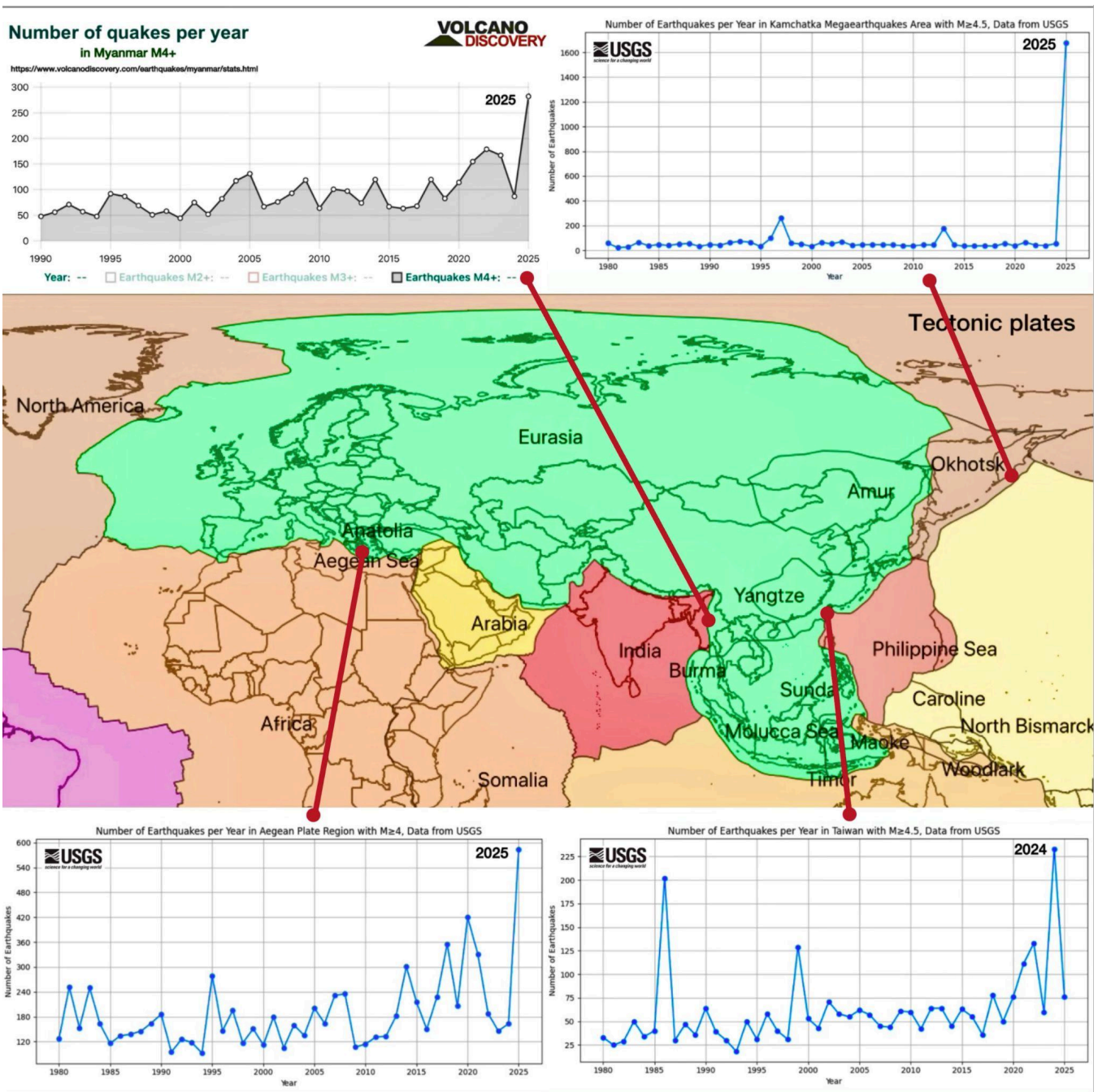


Рис. 27: Сейсмическая активность на окраинах Евразийской плиты, включая Охотскую плиту, в 2024–2025 годах, источники данных: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>, <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html>

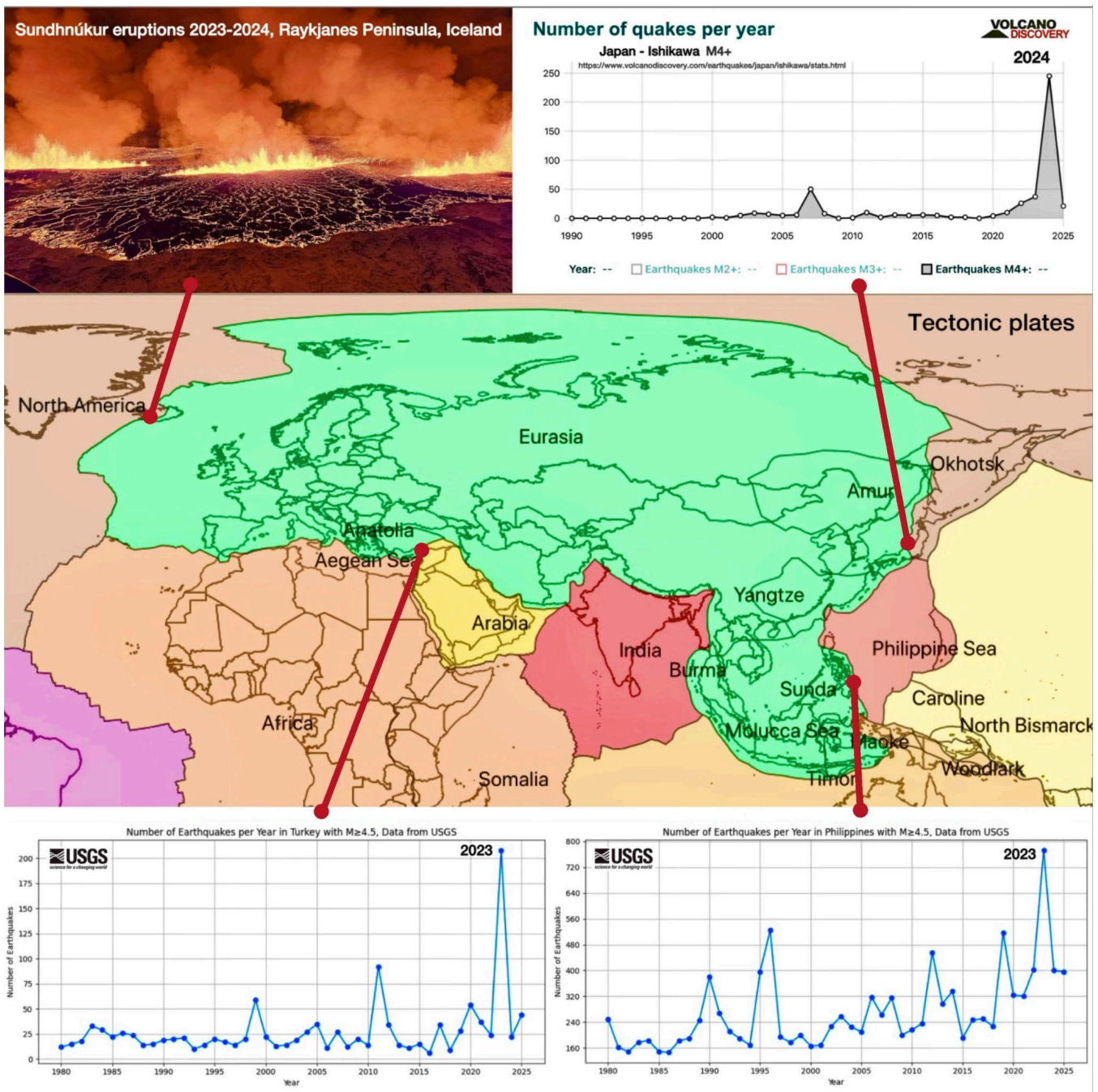


Рис. 28: Сейсмическая активность, связанная с вулканизмом на окраинах Евразийской плиты, включая Охотскую плиту, в 2023–2024 годах, источники данных: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>, <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/japan/ishikawa/stats.html>

Аномальная сейсмическая активность в Мьянме, на Камчатке и на Эгейской плите в 2025 году, представленная в виде графиков на рисунке, подробно описана в предыдущих главах (рис. 6–15, 18–21).

Тайвань

3 апреля 2024 года восточное побережье Тайваня подверглось сильному землетрясению с магнитудой $M 7,4$.⁴³ Одновременно в 2024 году на Тайване была зафиксирована рекордная

⁴³ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000m9g4/executive>

сейсмическая активность с начала точного сейсмического мониторинга.⁴⁴ Самый сильный афтершок с магнитудой $M 6,5$ произошёл через 13 минут после главного толчка, что указывает на значительную сейсмическую активность в регионе.⁴⁵ Землетрясение было настолько энергетически мощным, что вызвало также необычные волны в ионосфере.⁴⁶

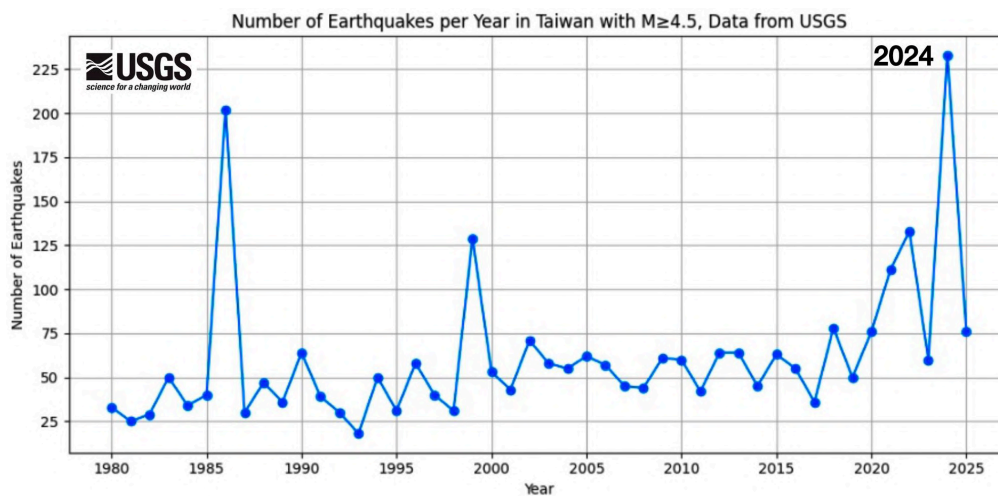


Рис. 29: Количество землетрясений с $M \geq 4,5$ в районе Тайваня, данные: USGS

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

Graph was created using data from the USGS catalog in Python. The region of Taiwan is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 119.0°E–123.5°E longitude and 21.5°N–25.5°N latitude.

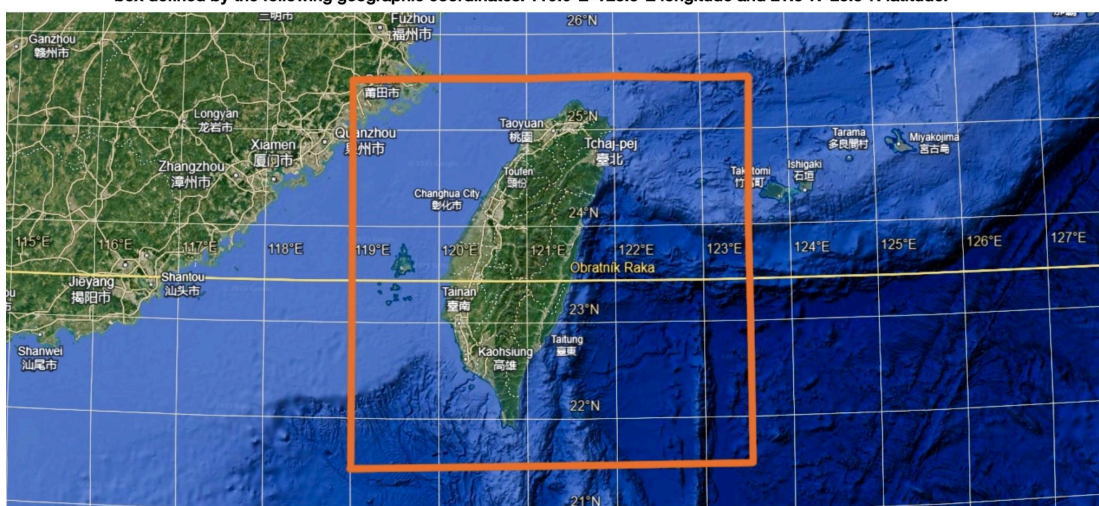


Рис. 30: Анализируемая зона района Тайваня, источник: Google Earth, собственная обработка

Как видно на рисунках 29–30, на основе данных каталога USGS очевидно, что сейсмическая активность на Тайване в 2024 году значительно возросла. Этот рост тесно связан с сильным землетрясением магнитудой $M 7,4$, которое запустило чрезвычайно обширную последовательность афтершоков. Общее число землетрясений с магнитудой $M \geq 4,5$ в 2024 году достигло самых высоких значений за весь период наблюдений с 1980 года, при этом значительно превысив даже показатели 1999 года, когда остров был поражён ещё более сильным землетрясением $M 7,7$ (Чи-Чи) в западной части центрального Тайваня.⁴⁷ В то время как после

⁴⁴

<https://watchers.news/2024/12/07/taiwan-logs-record-seismic-activty-with-42-quakes-surpassing-magnitude-5-5/>

⁴⁵ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277246702400054X>

⁴⁶ <https://www.mdpi.com/2072-4292/17/7/1241>

⁴⁷ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0009eq0/executive>

землетрясения 1999 года годовое число событий $M \geq 4,5$ составляло около 130, в 2024 году это число превысило 225 событий. График таким образом наглядно демонстрирует, что хотя главный толчок в 2024 году был несколько слабее, чем в 1999 году, последующая сейсмическая реакция была существенно более интенсивной, что указывает на исключительно повышенную сейсмическую активность в последнее время.

Повышенная сейсмическая активность на графике (рис. 29) заметна также в 1986 году, когда Тайвань поразило столь же сильное землетрясение на восточном побережье острова с магнитудой около $M 7,4$.⁴⁸ Этот толчок сопровождался значительным ростом числа событий $M \geq 4,5$, однако по сравнению с 2024 годом данный показатель оставался ниже. Из графика следует, что в 1986 году годовое число землетрясений с магнитудой $M 4,5$ и выше составляло около 200 событий, тогда как в 2024 году этот показатель значительно превысил отметку 225. Оба землетрясения произошли в одной и той же локализации вблизи города Хуалянь, при этом землетрясение 2024 года имело большую глубину гипоцентра (40 км) по сравнению с 34 км у землетрясения 1986 года.

График количества землетрясений с магнитудой $M \geq 4,5$ в районе Тайваня по базе данных USGS на рисунке 29 показывает с 1980-х годов чёткий и долгосрочный восходящий тренд сейсмической активности. В то время как в 1980-е годы годовые показатели в основном находились на уровне нескольких десятков событий, с рубежа 1990-х годов и после 2000 года наблюдается устойчивый рост среднего годового значения, которое постепенно смещается к более высоким десяткам и даже превышает сотню землетрясений в год. В последнее десятилетие дополнительно появляются выраженные максимумы, что указывает на последовательное увеличение числа таких сильных землетрясений.

Япония

В новогодний день 2024 года полуостров Ното был поражён землетрясением $M 7,5$ в зоне, где подобные по силе толчки не ожидалось. Это одно из крупнейших внутриплитных землетрясений в Японии. Сейсмические рои здесь продолжались в течение трёх лет, и это первое землетрясение магнитуды $M 7$ в рамках роевой активности с 1919 года.⁴⁹

График на рисунке 31 показывает чрезвычайный рост сейсмической активности в Японии, в префектуре Исикава, за 2024 год; на рисунке 32 представлена локализация землетрясений с $M4+$ в Японии, в префектуре Исикава, за 2024 год.⁵⁰

База данных VolcanoDiscovery была выбрана для анализа сейсмической активности в данной области главным образом потому, что она содержала наибольшее количество зарегистрированных землетрясений по сравнению с базами данных USGS и ISC. В некоторые годы количество зарегистрированных событий в этой базе данных было даже примерно вдвое больше.

⁴⁸ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0003009/executive>

⁴⁹ <https://academic.oup.com/gji/article/240/2/1048/7915983>

⁵⁰ <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/japan/ishikawa/stats.html>

Number of quakes per year

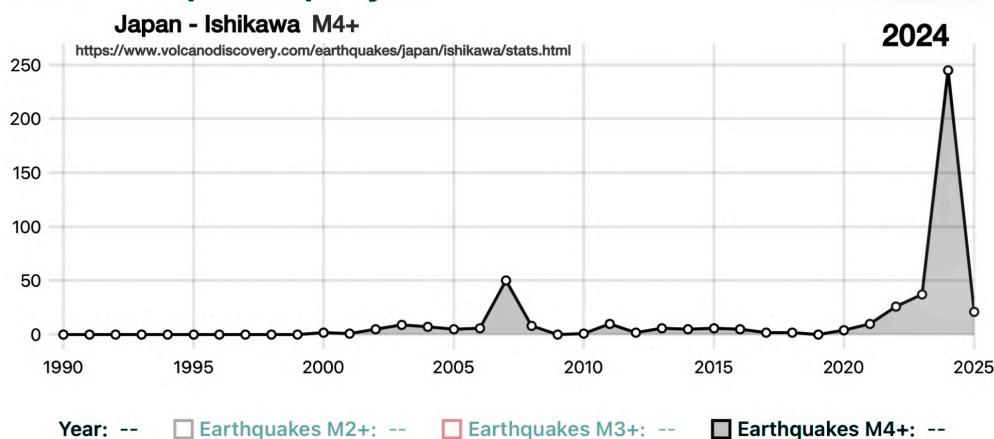


Рис. 31: Количество землетрясений с $M \geq 4$ в Японии, префектура Исихава, с 1990 года. Источник: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/japan/ishikawa/stats.html>

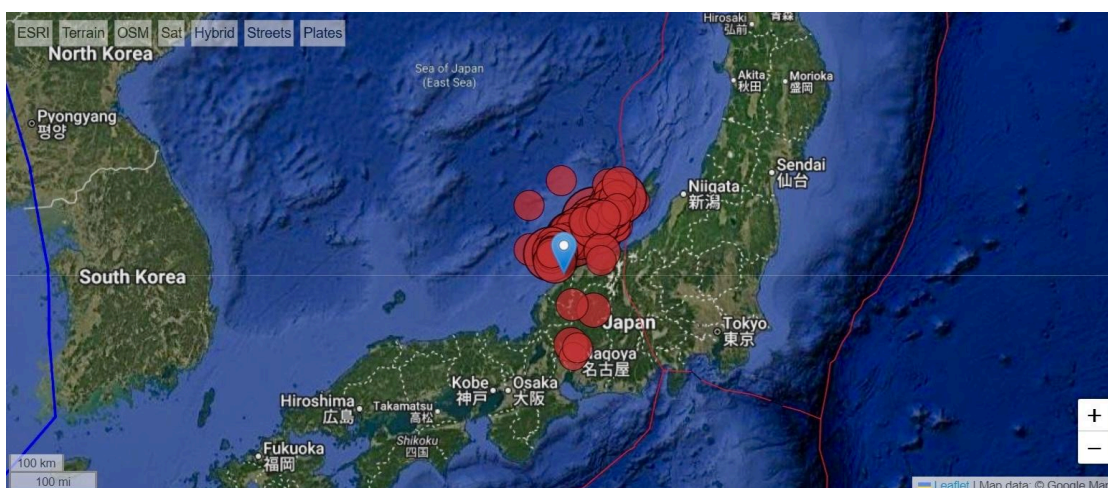


Рис. 32: Локализация землетрясений с $M4+$ в Японии, префектура Исихава, за 2024 год. Источник: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/japan/ishikawa/stats.html>

Полуостров Ното расположен вне основных разломных границ Японии, в зоне внутренних деформаций между Охотской плитой и Амурским блоком (часть более широкой Евразийской плиты). Именно поэтому столь крупные землетрясения здесь происходят крайне редко. Большинство самых сильных японских землетрясений возникает на окраинах плит — прежде всего в разломных зонах Тихоокеанской и Филиппинской плит. Землетрясение $M 7,5-7,6$ от 1 января 2024 года является поэтому исключительным внутриплитным землетрясением, произошедшим в районе, где на протяжении длительного времени не ожидалось толчки такой магнитуды, несмотря на продолжающуюся роевую активность. Это самое сильное землетрясение, поразившее префектуру Исихава с 1885 года.⁵¹

Кроме того, 8 декабря 2025 года произошло землетрясение с магнитудой $M 7,6$ у побережья региона Тохоку в префектуре Аомори. Оба этих события относятся к самым сильным землетрясениям, зарегистрированным на территории Японии с 2011 года (Тохоку $M 9,0-9,1$)⁵², и произошли в относительно коротком временном интервале, при этом каждое из них затронуло различные части страны. Тот факт, что два самых сильных сейсмических события за более чем

⁵¹ <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/earthquake-lifts-the-noto-peninsula-152350/>

⁵² <https://www.nippon.com/ja/features/h20002/>

десятилетие после мегаземлетрясения Тохоку возникли в различных тектонических средах Японии, указывает на сохраняющуюся и пространственно распространённую сейсмическую активность в пределах Японского архипелага.

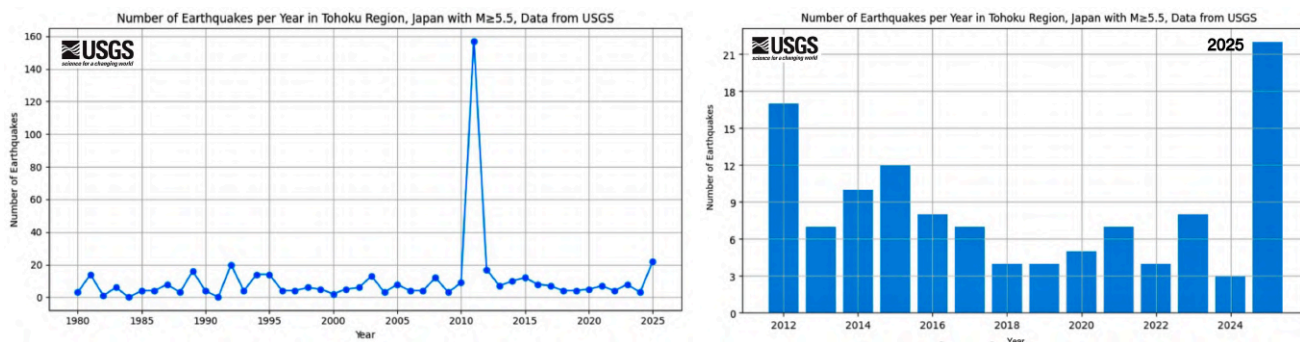


Рис. 33: Количество землетрясений с $M \geq 5,5$ в Японии в регионе Тохоку с 1980 года (слева) и с 2012 года (справа), источник данных: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. Tohoku Region is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 139.5°E–144.0°E longitude and 37.0°N–42.0°N latitude.

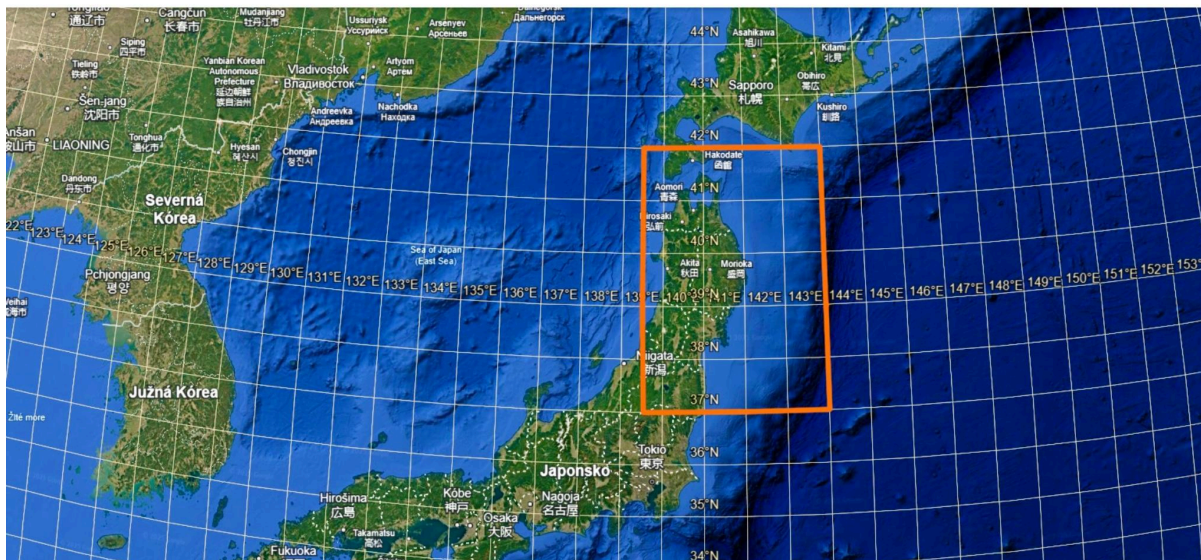


Рис. 34: Анализируемая зона в Японии, регион Тохоку, источник: Google Earth, собственная обработка

Графики на рисунке 33 отображают долгосрочную динамику сейсмической активности в регионе Тохоку для землетрясений с магнитудой $M \geq 5,5$ и ясно указывают на исключительный характер текущего года. Абсолютный максимум во временном ряду приходится на 2011 год, который стал прямым следствием мегаземлетрясения в Тохоку ($M 9,0$) и его обширной последовательности афтершоков. После этого периода сейсмичность значительно снизилась и в последующие годы находилась на относительно стабильном, низком уровне с лишь незначительными колебаниями. Пороговое значение магнитуды $M \geq 5,5$ было выбрано потому, что землетрясения такой величины представляют собой верхнюю границу категории умеренных землетрясений. Этот порог также обеспечивает достаточное количество событий для статистического анализа, исключая при этом большое количество более слабых афтершоков, характерных для крупных мегаземлетрясений, таких как землетрясение в Тохоку 2011 года. Рисунок 34 показывает границы анализируемой зоны на карте.

Однако текущий год демонстрирует наибольшее количество сильных толчков ($M \geq 5,5$) со времени завершения основной фазы афтершоков после 2011 года. Как показывает детализированная столбчатая диаграмма последних лет (рис. 33 справа), это выраженный рост

по сравнению с предыдущим десятилетием, не имеющий аналогов ни после 2011 года, ни до него. Повышенная сейсмичность указывает на повторную активизацию напряжённых процессов в зоне разлома между Тихоокеанской и Охотской плитами, а также в связанных разломных системах северо-восточной Японии. Хотя речь не идёт о мегаземлетрясении, сопоставимом с 2011 годом, масштаб и частота сильных событий делают текущий год наиболее сейсмически выраженным периодом в регионе за более чем десятилетие.

Исландия

Исландия — остров, сформированный вулканическими процессами на Срединно-Атлантическом хребте, — является синонимом вулканической активности. Тем не менее вулканологическое сообщество было удивлено активностью в области, которая на протяжении столетий считалась неактивной.

С конца 2023 года полуостров Рейкьянес на юго-западе Исландии начал переживать вулканическое пробуждение. После примерно 800 лет относительного покоя эта зона стала местом повторяющихся извержений.⁵³ В 2023–2024 годах произошла серия извержений, которые затронули населённый пункт Гриндавик и поставили под угрозу геотермальную электростанцию Свартсенги, а также знаменитую Голубую лагуну.

2025 год принёс продолжение и даже усиление этой активности. Вулканологи зафиксировали, что магматическая система под полуостровом подпитывается из глубоких источников, что указывает на возможность продолжения активности на протяжении десятилетий или даже столетий.⁵⁴



Рис. 35: Sundhnúkur eruptions 2023–2024, полуостров Рейкьянес, Исландия, источник: https://en.wikipedia.org/wiki/2023%E2%80%932024_Sundhn%C3%BAkur_eruptions

⁵³

<https://guidetoiceland.is/best-of-iceland/volcanic-eruptions-on-the-reykjanes-peninsula-in-iceland-a-complete-time-line-2021-2024>

⁵⁴ <https://en.vedur.is/about-imo/news/a-magma-intrusion-has-started-on-sundhnuksgigarod-crater-row>

<https://phys.org/news/2024-06-iceland-volcano-eruptions-decades.html>

<https://www.smithsonianmag.com/smart-news/hidden-underground-magma-pools-fueled-icelands-volcanic-eruptions-study-suggests-180984818/>

Извержение 16 июля 2025 года на Сундхнуксгигар (Рейкьянес) открыло трещину длиной приблизительно 700–1 000 метров; лава растекалась (Рис. 35), были эвакуированы жители и туристические зоны, такие как Blue Lagoon.⁵⁵ Подъём поверхности на 2–3 см в районе Свартсенги в июле–августе 2025 года является признаком непрерывной аккумуляции магмы.⁵⁶

Исландия расположена на Срединно-Атлантическом хребте — месте, где Североамериканская и Евразийская плиты расходятся со скоростью примерно 2 сантиметра в год. Одновременно остров находится над исландским магматическим плюмом, который поставляет дополнительное количество магмы. Такое сочетание делает Исландию одной из самых активных вулканических территорий в мире.

Реактивация полуострова Рейкьянес после почти тысячелетнего покоя является важным сигналом. Она показывает, что даже кажущиеся неактивными вулканические системы могут неожиданно ожить, зачастую при минимальном предварительном предупреждении. Для Исландии, страны с населением всего около 380 000 человек, эта ситуация представляет серьёзные вызовы — не только с точки зрения безопасности, но и для экономики, зависящей от туризма и геотермальной энергии.

Турция

В феврале 2023 года произошла пара очень сильных землетрясений магнитудой М 7,8 и М 7,5 (USGS), которые затронули обширную систему разломов в Восточной Анатолии. Эти толчки были самыми мощными, которые Турция испытала с 1939 года.⁵⁷

Однако отличие от землетрясения 1939 года заключается в том, что данное событие было «дуплетом» — двойным землетрясением. Подобные случаи чрезвычайно сильных землетрясений, происходящих в течение нескольких часов, встречаются крайне редко; случай Турции 2023 года относится к самым редким и экстремальным дуплетам, которые известны науке.

Более того, событие 6 февраля 2023 года в Турции можно рассматривать как исключительную многократную последовательность крупных землетрясений, представляющую собой чрезвычайно редкий «каскадный» сценарий в глобальной сейсмологии. В течение примерно 9 часов последовательно произошли два главных толчка с моментными магнитудами М 7,8 (глубина очага 8,6 км) и М 7,5 (глубина очага 7 км), при этом между ними произошло ещё одно исключительно сильное афтершоковое землетрясение магнитудой М 6,6.⁵⁸ Этот афтершок, эпицентр которого находился в районе Нурдагы в провинции Газиантеп, по своей силе превышает обычное определение афтершока и ещё больше подчёркивает исключительность всей последовательности, поскольку такая концентрация очень сильных землетрясений за столь короткий промежуток времени является на глобальном уровне чрезвычайно редкой.

Ещё одной особенностью является то, что разрыв при этом землетрясении распространялся по нескольким сегментам и местами достигал сверхсдвиговой (supershear) скорости. Сверхсдвиговые землетрясения крайне редки и относятся к наиболее разрушительным типам

⁵⁵ <https://www.washingtonpost.com/world/2025/07/16/iceland-volcano-eruption-blue-lagoon/>

⁵⁶ <https://volcano.si.edu/showreport.cfm?doi=GVP.WVAR20250730-371020>

⁵⁷

<https://www.rcce-collective.net/wp-content/documents-repo/Earthquake/Resources/Situation/EarthquakeGZT-FlashUpdate-FIN.pdf>

⁵⁸ <https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-024-01865-5>

разрывов. Энергия при этом высвобождается значительно более резко и вызывает существенно более сильные сотрясения, чем при обычных землетрясениях.⁵⁹

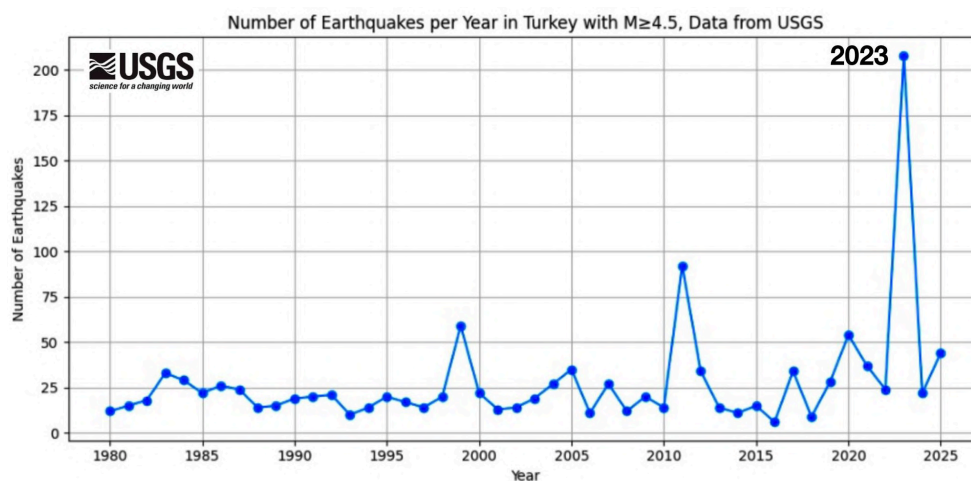


Рис. 36: Количество землетрясений с $M \geq 4,5$ в Турции с 1980 года, источник данных: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. The region of Turkey is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 26.5°E–44.0°E longitude and 36.0°N–42.0°N latitude.



Рис. 37: Анализируемая зона в районе Турции, источник изображения: Google Earth, собственная обработка

График на рисунке 36 подчёркивает исключительный характер сейсмической последовательности на востоке и юго-востоке Турции в 2023 году по сравнению с историческими сильными землетрясениями в стране. Последующая афтершоковая активность была чрезвычайно масштабной — в течение недель и месяцев было зарегистрировано более 200 землетрясений с магнитудой $M \geq 4,5$, включая десятки толчков магнитудой $M 5–M 6$, тогда как обычно за год в Турции происходит менее 25 таких землетрясений. Рисунок 37 показывает границы анализируемой зоны на карте.

⁵⁹ <https://arxiv.org/abs/2302.07214>

По сравнению с другими значительными турецкими землетрясениями, такими как землетрясение в Измите в августе 1999 года (M 7,6), за которым последовало землетрясение в Дюздже в ноябре 1999 года (M 7,2), или землетрясение в Ване в октябре 2011 года (M 7,2)⁶⁰, 2023 год представляет собой заметное отклонение. Хотя эти события достигали магнитуд более M 7 и имели разрушительные последствия, их афтершоковые последовательности имели более классический характер с существенно меньшим числом толчков M 4,5+ и более быстрым затуханием активности. Таким образом, сейсмическая последовательность 2023 года указывает на сложный, многосегментный разрыв и каскадную передачу напряжения вдоль Восточно-Анатолийского разлома, что делает её одной из самых необычных и энергетически мощных афтершоковых последовательностей, зафиксированных в Турции в современной сейсмологической истории.

Филиппины

Минданао — в декабре 2023 года юг Филиппин был поражён землетрясением магнитудой примерно M 7,6 в разломной зоне вблизи острова Минданао. Это землетрясение было самым сильным на Филиппинах за последние 33 года, однако необычным было то, что оно сопровождалось множеством сильных афтершоков (график в правом нижнем углу изображения).⁶¹

Четыре афтершока с магнитудами M 6,3–6,9 произошли уже через несколько часов после главного толчка, при этом по меньшей мере два из них демонстрировали выраженное отклонение от ожидаемого по закону Бата, поскольку разница магнитуд между главным землетрясением и наиболее сильными афтершоками была существенно меньше типичного значения ~1,2.⁶²

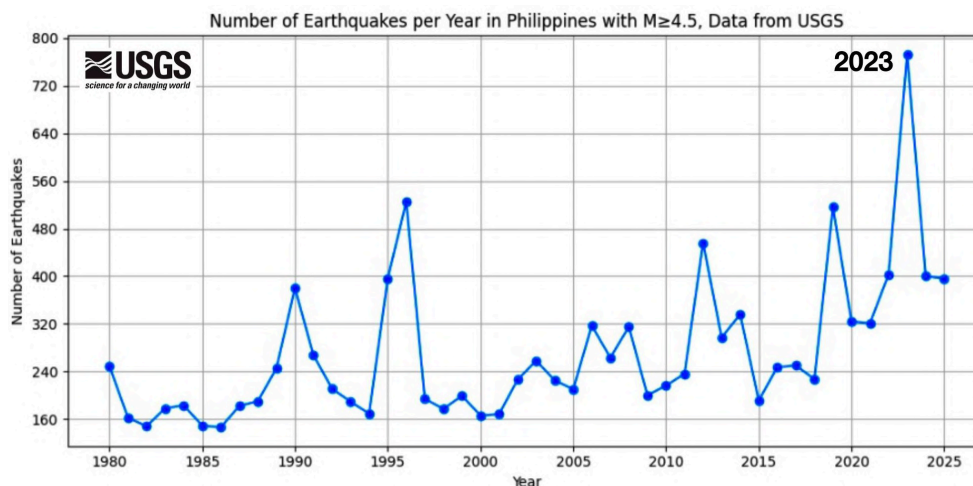


Рис. 38: Количество землетрясений с $M \geq 4,5$ в районе Филиппин с 1980 года, источник данных: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

⁶⁰ <https://www.aa.com.tr/en/turkiye/last-123-years-largest-earthquakes-in-turkiye/2836533>

⁶¹

<https://temblor.net/temblor/major-earthquake-strikes-the-philippines-followed-by-unusually-large-aftershocks-15758/>

⁶² <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php?year=2023>

Graph was created using data from the USGS catalog in Python. The region of Philippines is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 116.0°E–127.5°E longitude and 4.5°N–21.0°N latitude.



Рис. 39: Анализируемая зона в районе Филиппин, источник изображения: Google Earth, собственная обработка

На основе данных USGS и графика количества землетрясений с $M \geq 4,5$ с 1980-х годов (рис. 38) интересно сравнить два крупнейших сейсмических события на Филиппинах за последние 45 лет: землетрясение $M 7,7$ в 1990 году (Лусон)⁶³ и землетрясение $M 7,6$ в 2023 году (Минданао). В 1990 году произошло одно из самых сильных и разрушительных землетрясений в истории страны, однако общее число зарегистрированных землетрясений в этом году, согласно графику, было лишь умеренно повышенным по сравнению с соседними годами (порядка нескольких сотен событий $M \geq 4,5$).

Напротив, 2023 год, в котором произошло землетрясение $M 7,6$, демонстрирует по данным базы USGS значительно более высокий общий уровень сейсмической активности — график показывает наибольшую годовую сумму с 1980-х годов, что указывает на интенсивную и длительную афтершоковую активность. Иными словами, хотя землетрясение 1990 года было сильнее, чем событие 2023 года, оно сопровождалось значительно меньшим числом афтершоков средней магнитуды, которые уже тогда были технически хорошо детектируемы. Этот контраст является необычным и может указывать на различия в механизме разрыва разломов, распределении напряжений в земной коре или способе высвобождения сейсмической энергии между двумя событиями.

Похожий, хотя и значительно более слабый эффект наблюдается и в середине 1990-х годов, когда график фиксирует заметный скачок в 1995–1996 годах. Этот рост связан с серией сильных филиппинских землетрясений магнитудой около $M 7$. Однако на этом фоне 2023 год выделяется особенно — не только абсолютным числом толчков, но и масштабом и продолжительностью сейсмической реакции, что указывает на чрезвычайно эффективную передачу напряжения в рамках сложной тектонической системы Филиппин.

Из графика базы данных USGS ясно видно, что с начала 1990-х годов, а ещё более выражено примерно с 2000 года, наблюдается постепенный рост годового числа зарегистрированных землетрясений магнитудой $M \geq 4,5$ на Филиппинах. Если в 1980-х годах годовые значения в основном находились на уровне 150–200 событий, то после 2000 года обычными стали значения 250–350, а в последнее десятилетие появляются и выраженные максимумы, особенно около 2012, 2019 и 2023 годов. Этот тренд указывает на повышенную сейсмическую активность в регионе. Рисунок 39 показывает границы анализируемой зоны на карте.

⁶³ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0004bxs/executive>

4. Активизация других разломов

Восточно-Африканский рифт: десятикратный рост активности

Восточно-Африканский рифт — это место, где африканский континент буквально раскалывается на две части. Эта гигантская тектоническая система простирается от Ливана через Красное море, Эфиопию, Кению, Танзанию вплоть до Мозамбика — на расстояние около 6000 километров.

В 2025 году в районе Восточно-Африканского рифта был зафиксирован беспрецедентный рост сейсмической активности. В то время как обычное годовое количество землетрясений магнитудой $M \geq 4,5$ в районе Восточно-Африканского рифта обычно составляет менее 15, в 2025 году их было зафиксировано более 100 (Рис. 40 - 41).

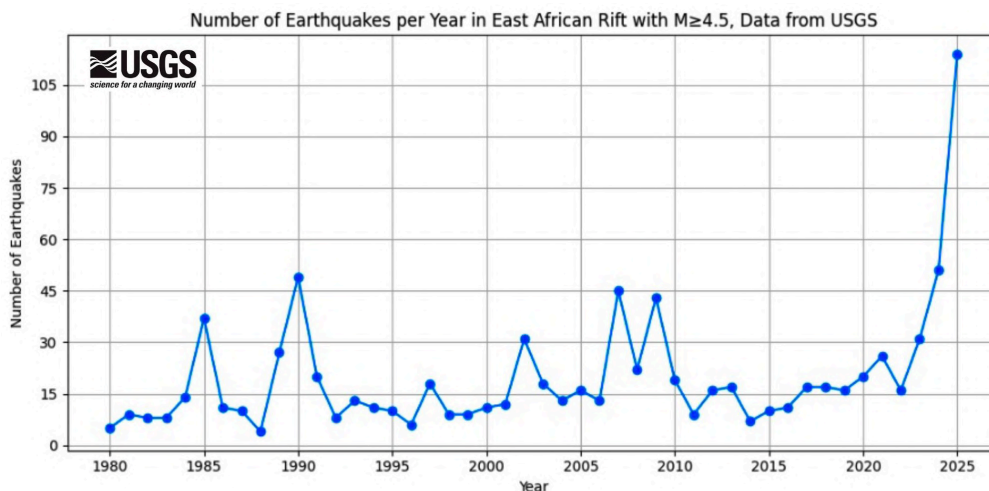


Рис. 40: Количество землетрясений с $M \geq 4,5$ в районе Восточно-Африканского рифта с 1980 года, источник данных: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. The East African Rift is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 28.0°E–42.0°E longitude and 15.0°S–12.0°N latitude.



Рис. 41: Анализируемая зона Восточно-Африканского рифта, источник изображения: Google Earth, собственная обработка

Большинство этих толчков затронуло Эфиопию в начале года, однако регион по-прежнему остаётся активным. Согласно сообщениям, в этом году пострадали примерно 100 000 человек, около 70 000 человек были эвакуированы.⁶⁴

Удивительным было наблюдение 2005 года, когда в эфиопском регионе Афар всего за несколько дней раскрылась трещина длиной 60 км и шириной 2 м. Это было беспрецедентное событие — до того времени никогда не фиксировалось, чтобы столь масштабное геологическое изменение произошло за столь короткий промежуток времени, и подобное считалось невозможным.⁶⁵

В сентябре 2005 года в этом районе началась серия землетрясений, кульминацией которой стало извержение вулкана Даббаху. В течение нескольких дней магма сформировала огромную интрузию (подповерхностную инъекцию магмы) в земную кору, что привело к образованию 60-километровой трещины. Этот процесс, который в нормальных условиях должен был бы продолжаться столетия или даже тысячелетия, произошёл всего за несколько дней.

Пробуждающиеся вулканы

С тех пор в регионе активизировалось несколько вулканов, которые считались потухшими:

- **Набро в Эритрее** — извержение в 2011 году после более чем 10 000 лет покоя, без каких-либо предварительных признаков, которые могли бы послужить предупреждением, стало неожиданностью для геологов. Извержение началось 12 июня 2011 года и стало первым зафиксированным извержением этого вулкана в историческое время. Пепловый столб достигал высоты до 13 километров и затронул обширные территории, включая Эритрею, Эфиопию и Судан.⁶⁶
- **Даббаху в Эфиопии** — единственное известное извержение произошло в 2005 году после мощного сейсмического роя. Именно это извержение было связано с образованием 60-километровой трещины.⁶⁷
- **Дофан и Фентале в Эфиопии** — начали проявлять признаки активации только в этом году (2025) после серии землетрясений. Эти вулканы, считавшиеся неактивными или спящими, демонстрируют повышенную сейсмическую активность, деформации поверхности и газовые выбросы.⁶⁸
- **Вулкан Хайли-Губби в Эфиопии** — пробудился 23.11.2025 года после 12 000 лет покоя (во всём голоцене не зафиксировано ни одного его извержения). Он неожиданно взорвался и сформировал мощный пепловый столб высотой около 10 км над землёй. Специалисты сочли этот взрыв крайне необычным явлением.⁶⁹

⁶⁴ <https://reliefweb.int/report/ethiopia/ethiopia-earthquake-2025-dref-operation-mdret037>

⁶⁵ <https://www.nature.com/articles/nature04978>

⁶⁶ <https://earthobservatory.nasa.gov/images/event/50989>

⁶⁷ <https://www.volcanodiscovery.com/dabbahu.html>

⁶⁸ <https://www.volcanodiscovery.com/dofen.html>

<https://www.volcanodiscovery.com/fantale.html>

<https://link.springer.com/article/10.1007/s00445-025-01884-3>

⁶⁹

<https://www.ndtv.com/world-news/why-volcano-hayli-gubbi-erupted-after-12-000-years-what-experts-said-969490>

<https://www.cbsnews.com/news/volcano-erupts-first-time-12000-years-hayli-gubbi-ethiopia/>

В Эфиопии, где рифт проявляет наибольшую активность, геологи зафиксировали интенсивные сейсмические рои и повышенную вулканическую активность. Вулкан Эрта-Але, на котором расположено одно из немногих постоянных лавовых озёр в мире, демонстрирует повышенную активность. В январе 2025 года произошло значительное усиление лавовых потоков, которые впервые примерно за 20 лет вышли за пределы кальдеры и достигли исторических стоянок в регионе — что является ясным признаком усиления извержательной активности.⁷⁰ В июле 2025 года был зафиксирован кратковременный, но интенсивный взрыв и плотные выбросы пепла, что сигнализирует о переходе к очередной фазе активности, выходящей за рамки его обычного более спокойного состояния.⁷¹

В этом году также была зарегистрирована тепловая аномалия на вулканическом комплексе Ол-Доиньо-Ленгаи на севере Танзании — единственном действующем вулкане, производящем натрокарбонатитовую лаву (лаву, богатую натрием и калием вместо кремнезёма), которая холоднее и менее вязкая, чем типичная базальтовая лава. В 2025 году спутниковые снимки Sentinel зафиксировали тепловую аномалию над кратером, указывающую на повышенную тепловую активность или возможный прорыв горячего материала близко к поверхности — явление, которое не является обычным для этой области в такой интенсивности.⁷²

Всё указывает на то, что под Африкой в последнее время значительно активизировался мощный магматический плюм, выталкивающий вверх новые объёмы магмы и пробуждающий давно спящие вулканы.

Срединно-Атлантический хребет

График на рисунке 42 показывает развитие числа землетрясений с магнитудой $M \geq 4,5$ в области Срединно-Атлантического хребта в период 1980–2025 гг. Срединно-Атлантический хребет представляет собой чрезвычайно обширную систему срединно-океанических хребтов, протягивающуюся через Атлантический океан, где литосферные плиты расходятся и происходит формирование новой океанической коры. Иногда о нём говорят как о самой длинной вулканической системе на Земле длиной более 16 000 км⁷³.

Именно в таких районах земная кора наиболее тонкая и напрямую связана с процессами, происходящими в земном мантии. В результате эта часть Земли может более чувствительно реагировать на изменения в поступлении магмы, тепловом потоке или динамике мантийных течений.

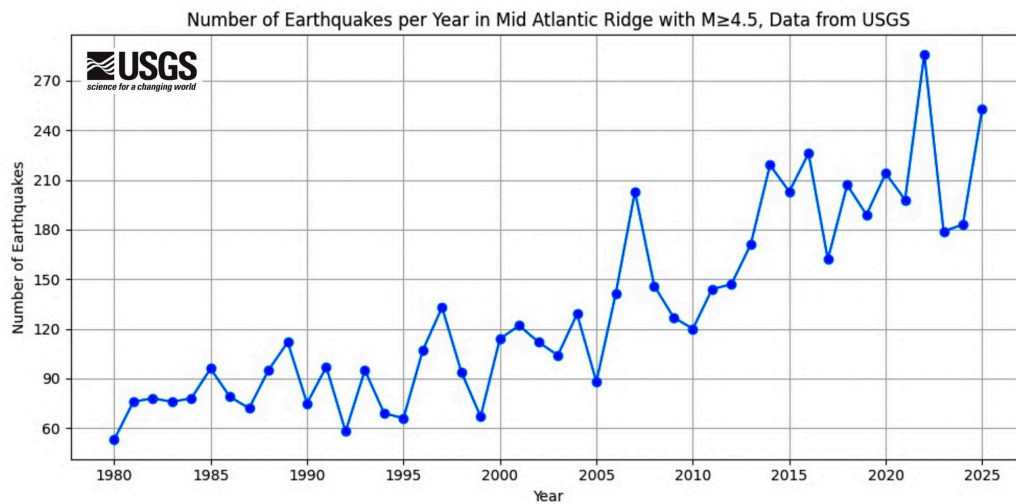
⁷⁰

<https://watchers.news/2025/01/17/lava-surge-at-erta-ale-volcano-reaches-historic-camp-for-first-time-in-20-years-ethiopia/>

⁷¹ <https://watchers.news/2025/07/15/erta-ale-volcano-eruption-dense-ash-emission-ethiopia-july-2025/>

⁷² <https://www.volcanoes.de/2025/06/14/ol-doinyo-lengai-thermal-anomaly-suggests-lava-overflow/>

⁷³ <https://whc.unesco.org/en/tentativelists/6231/>



Обр. 42: Количество землетрясений с $M \geq 4,5$ на Срединно-Атлантическом хребте, источник данных: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

The graphs were created with data from the ISC and Geofon Catalog using Python. The Mid-Atlantic Ridge is represented as a bounding box with the following geographic coordinates: 45.0°W – 10.0°W longitude and 50.0°S – 50.0°N latitude.



Рис. 43: Анализируемая зона Срединно-Атлантического хребта, источники: Google Earth, собственная обработка (слева), https://www.researchgate.net/figure/Map-of-the-mid-Atlantic-ridge-Heezen-B-Tharp-M-1968_fig3_341592959

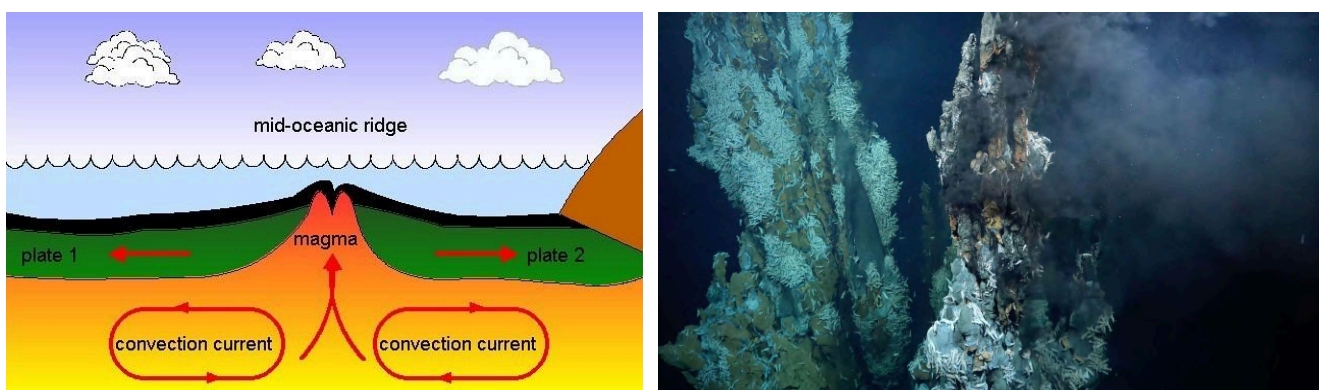


Рис. 44: Слева: схема срединно-океанического хребта в области, где магма поднимается, охлаждается и образует новую кору, источник: <https://www.flickr.com/photos/114042825@N07/11877403915>
 Справа: высокотемпературное гидротермальное поле источников, обнаруженное на подводной горе Puy des Folles на Срединно-Атлантическом хребте на глубине примерно 2 000 метров, источник: <https://oceanexplorer.noaa.gov/expedition/23lost-cities/>

Из графика на рисунке 42 отчётливо виден долгосрочный рост числа зарегистрированных землетрясений, особенно после 2000 года. Значительные межгодовые колебания указывают на реальные эпизоды повышенной активности. Наиболее выраженный рост около 2007 года и вновь в 2014, 2016, 2022 и 2025 годах по времени совпадает с периодами, когда на различных участках Срединно-Атлантического хребта были задокументированы более сильные землетрясения (M 6–M 7) и последующие серии афтершоков. В таких случаях годовое количество событий увеличивается не из-за одного изолированного землетрясения, а вследствие последовательностей толчков, распределённых во времени и пространстве. Рисунок 43 показывает границы анализируемой зоны на карте.

Юго-восточный Индийский хребет

График на рис. 45 отражает динамику количества землетрясений с магнитудой $M \geq 4,5$ на юго-восточном участке Индийского океанического хребта за период с 1980 по 2025 год на основе данных Геологической службы США. Уже на первый взгляд очевидна долгосрочная тенденция к росту: в то время как в начале рассматриваемого периода количество землетрясений колебалось примерно на уровне 15–25 событий в год, в последние годы оно достигает значений около 90–120 событий в год. Этот рост не является линейным, а проходит в несколько этапов, причем более заметные увеличения наблюдаются, в частности, после 2000 года с максимумом в 2024 году и вторым по величине максимумом в 2025 году. Характерны также кратковременные спады (например, в конце 90-х годов или около 2008 года), за которыми следует возвращение к более высокому уровню активности, что указывает на пульсирующий характер деформации океанической коры.

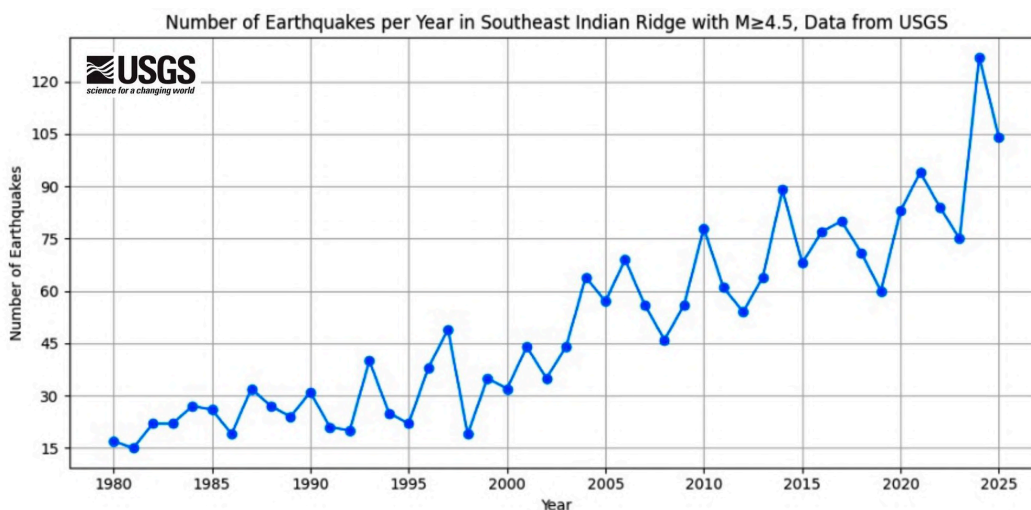


Рис. 45: Количество землетрясений с $M \geq 4,5$ на Юго-Восточном Индийском хребте, источник данных: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. The region of Southeast Indian Ridge is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 65.0°E-150.0°E longitude and 60.0°S-35.0°S latitude.

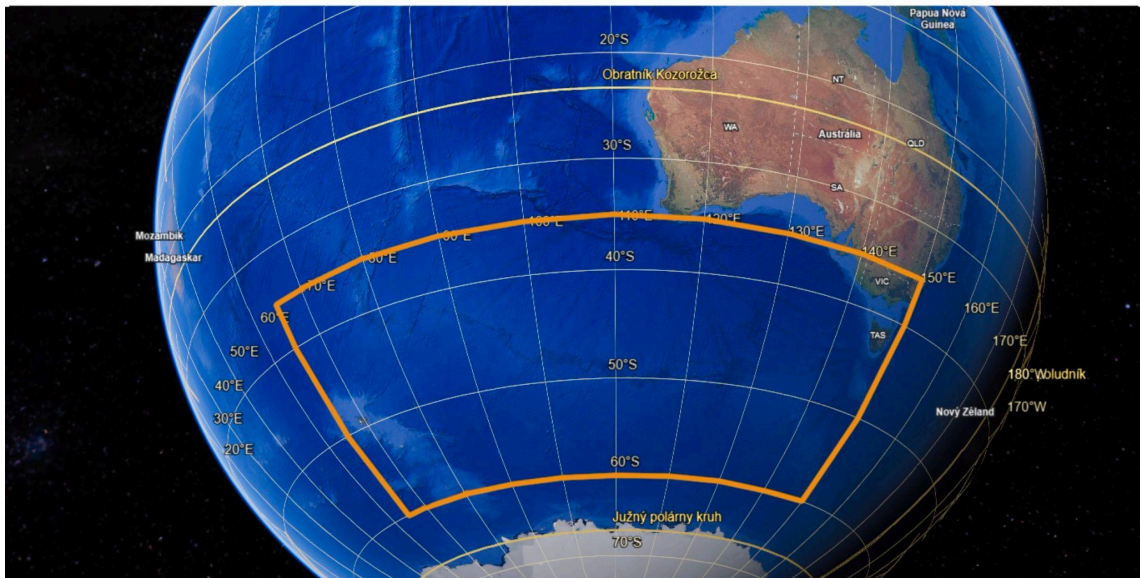


Рис. 46: Анализируемая зона Юго-Восточного Индийского хребта, источники: Google Earth, собственная обработка

Юго-восточный Индийский хребет, подобно Срединно-Атлантическому хребту, представляет собой дивергентную границу литосферных плит, где образуется новая океаническая кора. Здесь также речь идет о динамичной среде, в которой земная кора тонкая, разломанная и напрямую связана с процессами в верхней мантии, поэтому сейсмическая активность здесь чувствительно реагирует на изменения напряжения или магматические импульсы.

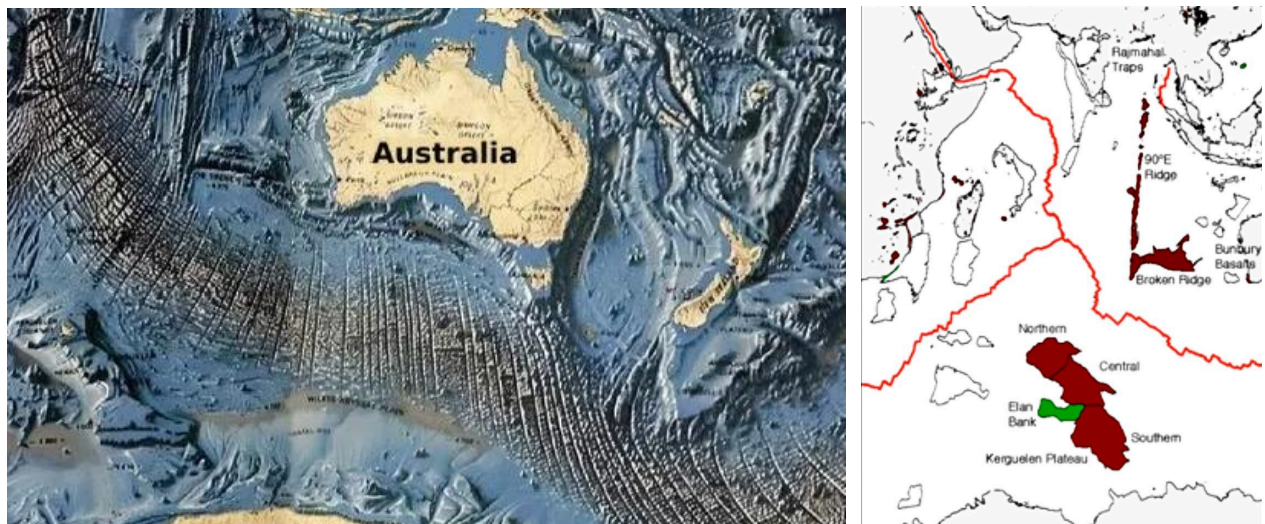


Рис. 47: Анализируемая зона Юго-Восточного Индийского хребта, источник:

<https://www.geologyin.com/2025/02/oceanic-crust.html>

Это важная часть глобальной системы океанических хребтов, опоясывающей всю Землю. Хребет имеет длину почти 6000 км и соединяет два важных тектонических узла – тройной узел Родригеса в Индийском океане и тройной узел Маккуори в Тихом океане. Кроме того, Юго-Восточный Индийский хребет находится под влиянием «горячей точки» Кергелен,

расположенной к западу от хребта, которая вызывает локально повышенную вулканическую активность и влияет на форму и развитие океанского дна (рис. 47).⁷⁴

Дрейк-пролив: пробуждение антарктической зоны

Дрейк-пролив (Drake Passage) между Южной Америкой и Антарктидой известен как одно из самых опасных морей в мире из-за сильных течений и волн. Геологически же этот район является местом встречи двух океанических плит — Антарктической и Южноамериканской (конкретно Плита Скотия).

В 2025 году район пролива Дрейка был исключительно сейсмически активным. Здесь произошло целых 5 землетрясений с магнитудой 6 и выше, хотя в среднем в этой области происходит одно такое землетрясение в год (рис. 48). Кроме того, последнее землетрясение с магнитудой выше M7 здесь было зарегистрировано более 100 лет назад, однако в 2025 году здесь произошли три таких события (рис. 50): землетрясение M7,4 2 мая 2025 года, M7,5 22 августа 2025 года⁷⁵ и землетрясение M7,6 10 октября 2025 года⁷⁶.

При изучении каталога USGS за 1998 год было установлено, что область антарктического Тихого океана имела порог полноты магнитуды 5,3, поэтому для сравнения сейсмической активности в этой области была выбрана магнитуда $M \geq 6$.⁷⁷

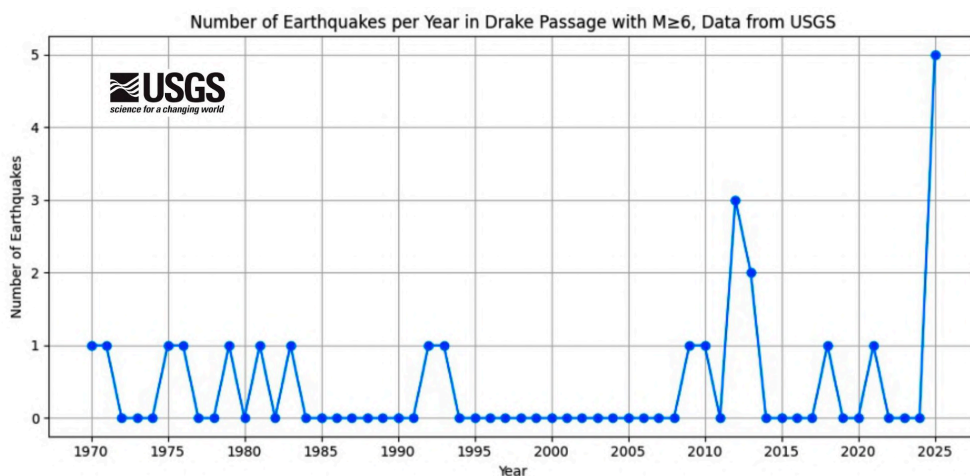


Рис. 48: Количество землетрясений с $M \geq 6$ в районе пролива Дрейка с 1970 года, источник данных: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

⁷⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Southeast_Indian_Ridge

⁷⁵ <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/22087250/2025-08-22/02h16/magnitude7-Drake-Passage.html>

⁷⁶

<https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/22261987/2025-10-10/20h29/magnitude7-Antarctica-Drake-Passage.html>

⁷⁷ <https://ds.iris.edu/news/IRISnewsletter/volume2000no1/page-02-04.htm>

The graphs were created using data from the USGS and ISC catalog in Python. Drake Passage is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 75.0°W–50.0°W longitude and 65.0°S–53.0°S latitude.

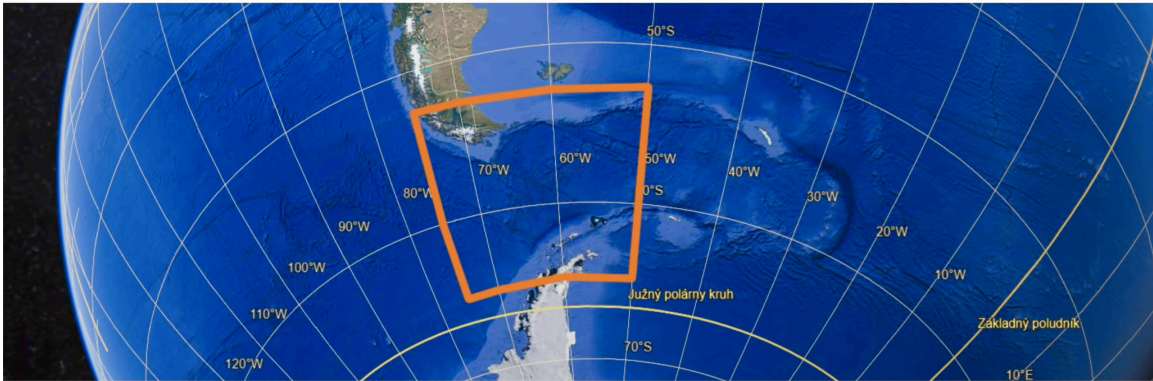


Рис. 49: Анализируемая зона района пролива Дрейка, источник: Google Earth, собственная обработка

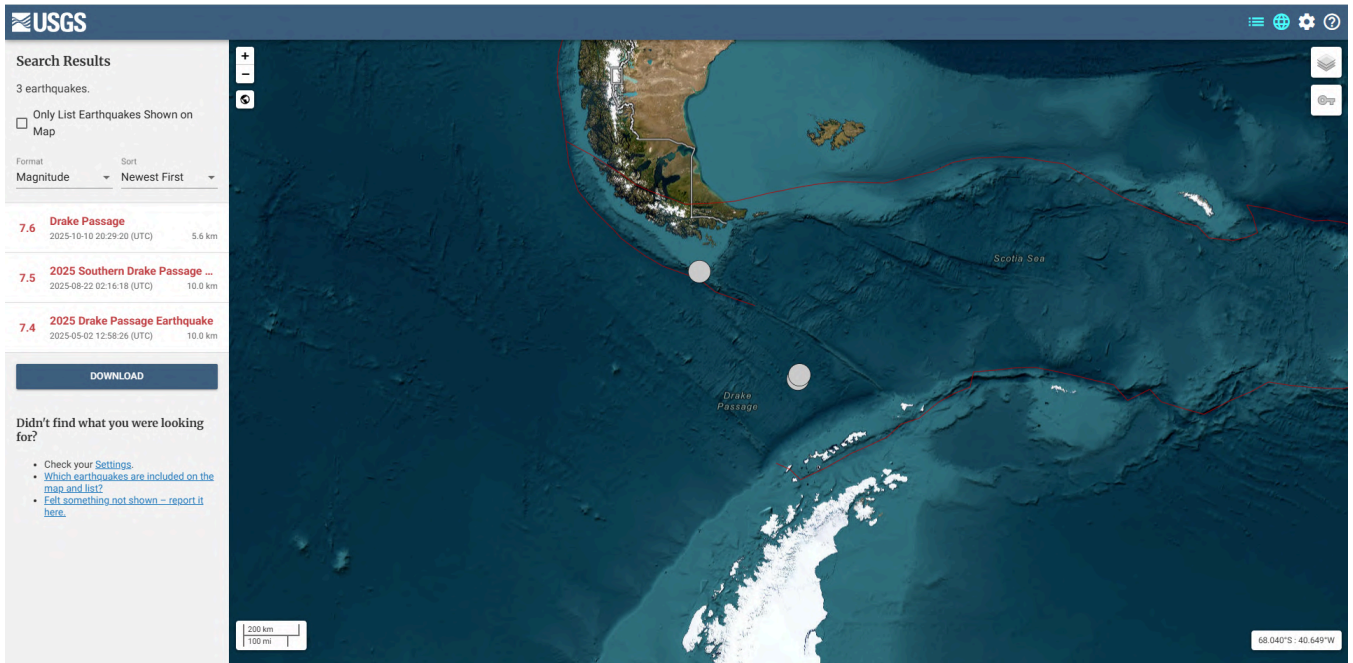


Рис. 50: Землетрясения с магнитудой выше М 7 в 2025 году в районе пролива Дрейка, источник:

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/?extent=-68.12248,-97.64648&extent=-47.98992,-27.33398&range=search&baseLayer=satellite&timeZone=utc&search=%7B%22name%22:%22Search%20Results%22,%22params%22:%7B%22starttime%22:%222025-01-01%2000:00:00%22,%22endtime%22:%222026-01-01%2023:59:59%22,%22maxlatitude%22:-53.%22minlatitude%22:-65.%22maxlongitude%22:-50.%22minlongitude%22:-75.%22minmagnitude%22:7,%22orderby%22:%22time%22%7D%7D>

Сейсмическая активность в этой области значительно превышает долгосрочный средний уровень, и регион находится в фазе исключительного сейсмического оживления.

Антарктида: 140 вулканов под льдом

Дрейк-пролив расположен у Западной Антарктиды — региона, где подо льдом скрывается 140 вулканов, что делает его одним из крупнейших вулканических систем на Земле. Так как это самый узкий пролив вокруг Антарктиды, его форма и положение значительно влияют на циркуляцию воды вокруг континента, глобальную океанскую циркуляцию и климат.

Исторический сейсмический рой в проливе Брансфилд (2020–2021)

В близком проливе Брансфилд в 2020–2021 годах произошёл один из крупнейших сейсмических роев в истории:⁷⁸

- Более 85 000 землетрясений за шесть месяцев
- Эпицентр у подводного вулкана Orca Seamount, ранее считавшегося неактивным
- Движение земной коры на острове Короля Георга до 11 см

По мнению учёных, это было следствием роста магматической активности и перемещения магмы в верхние слои коры — вероятно, до частичного высвобождения магмы.

Канада: пробуждение разлома Тинтина после 12 000 лет тишины

В то время как внимание геологического сообщества сосредоточено на известных сейсмических зонах, таких как Каскадия, Сан-Андреас или японские разломы, в 2025 году в центр внимания попала гораздо менее известная, но потенциально столь же опасная структура — разлом Тинтина в Северной Канаде и на Аляске.

Разлом Тинтина — массивная сдвиговая разломная линия, которая проходит через северо-западную Канаду (территория Юкон) и продолжается на Аляску, общей протяжённостью около 1000 километров. Хотя геологи знали об этом разломе десятилетиями, только недавно стало ясно его реальное сейсмическое потенциал.

В прорывном исследовании, опубликованном в журнале *Geophysical Research Letters* в январе 2025 года, учёные из Университета Британской Колумбии, Университета штата Аризона и других учреждений реконструировали сейсмическую историю разлома Тинтина с помощью палеосейсмологических методов — анализа осадков, деформаций рельефа и геологических записей прошлых землетрясений.⁷⁹

Ключевой вывод исследования вызывает беспокойство: разлом Тинтина был тихим более 12 000 лет. Последнее крупное землетрясение на этом разломе произошло в конце последнего ледникового периода, примерно 12 400 лет назад.

Для сравнения: большинство крупных разломов имеют «период возвращения» между крупными землетрясениями в пределах сотен или тысяч лет. Зона субдукции Каскадии имеет интервал примерно 300–500 лет. Разлом Сан-Андреас в Южной Калифорнии — около 150–200 лет на некоторых сегментах. 12 000 лет — это крайне долгий период, достаточно, чтобы накопилось огромное количество тектонического напряжения. Землетрясение на разломе могло бы превысить M 7,5 и вызвать масштабные разрушения инфраструктуры⁸⁰.

⁷⁸ <https://www.nature.com/articles/s43247-022-00418-5>

⁷⁹ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2025GL116050>

⁸⁰ <https://scitechdaily.com/scientists-warn-tintina-fault-could-unleash-major-earthquake/>

Сейсмотектонический пояс Тянь-Шань

Пояс Тянь-Шань является частью более широкой коллизионной зоны Центральной Азии. Эта горная система представляет собой общий тектонический элемент юго-восточного Казахстана, Киргизии и западного Китая. Тянь-Шань отличается высокой сейсмической активностью из-за деформации земной коры, возникающей в результате столкновения Индийской и Евразийской литосферных плит. Хотя основная коллизионная граница находится южнее, деформационные напряжения передаются на сотни километров к северу и вызывают активные движения и частые землетрясения даже во внутренних районах Евразии.

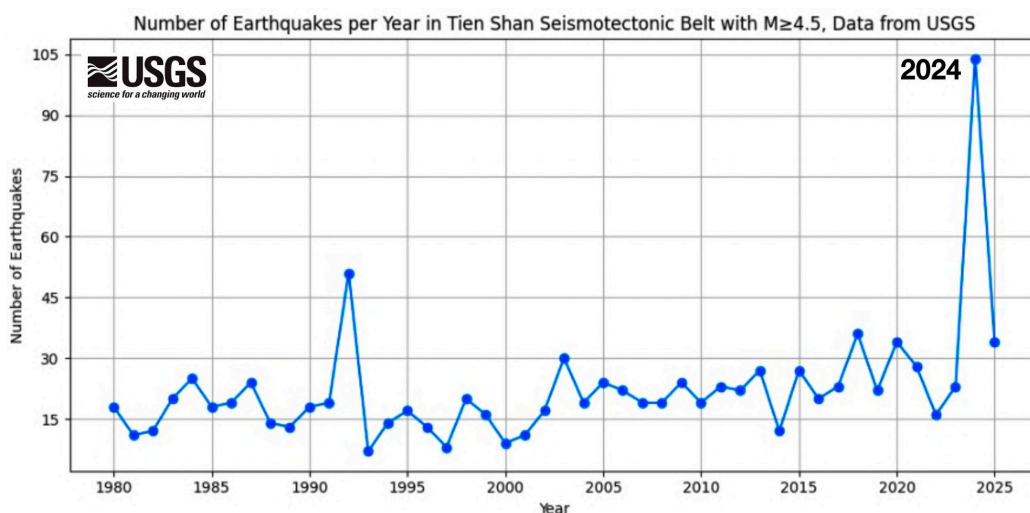


Рис. 51: Количество землетрясений с $M \geq 4,5$ в районе сейсмотектонического пояса Тянь-Шань с 1980 года, источник данных: USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

The graph was created using data from the USGS catalog in Python. The region of Tien Shan seismotectonic belt is represented as a bounding box defined by the following geographic coordinates: 67.0°E–88.0°E longitude and 40.0°N–46.5°N latitude.

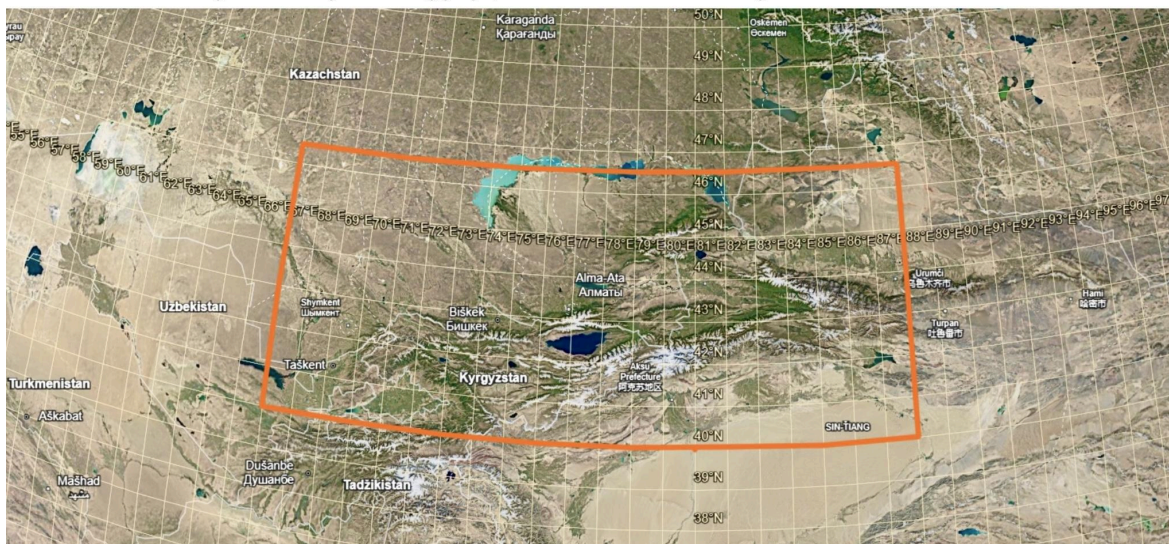


Рис. 52: Анализируемая зона сейсмотектонического пояса Тянь-Шань, источник: Google Earth, собственная обработка

График на Рис. 51 для анализируемой области (Рис. 52) отображает динамику числа землетрясений с магнитудой $M \geq 4,5$ в сейсмотектоническом поясе Тянь-Шань с начала 1980-х годов до 2025 года на основе данных каталога USGS. Анализируемая зона включает юго-восточный Казахстан, Киргизию и западный Синьцзян в Китае и представляет собой активно деформированный внутриконтинентальный ороген (горную зону, формируемую тектоническими процессами) в рамках коллизионной зоны между Индийской и Евразийской плитой.

Из графика заметен долгосрочный умеренный рост числа зарегистрированных землетрясений, особенно с рубежа тысячелетий. Наряду с этим трендом видны выраженные краткосрочные колебания, соответствующие сильным основным толчкам и их последующим афтершоковым последовательностям.

Одним из наиболее заметных сейсмических годов в анализируемом периоде является 1992 год, когда 19 августа произошло сильное землетрясение в бассейне Суусамыр в северном Тянь-Шане, Киргизия. Это землетрясение достигло магнитуды около $M 7,3$ (по некоторым данным до $M 7,5$), имело гипоцентр на глубине примерно 17–27 км. Оно относится к числу сильнейших землетрясений, зарегистрированных в регионе Тянь-Шань в современную эпоху, и его эффекты ощущались в Киргизии, Казахстане, Узбекистане и западном Китае. В графике 1992 год отображается как значительный рост числа землетрясений, что является типичным следствием обширной афтершоковой активности после сильного основного толчка.

Тем не менее, особенно примечателен 2024 год, который в анализируемом временном ряде показывает наибольшее число землетрясений с магнитудой $M \geq 4,5$ с начала 80-х годов. В этом году в рамках того же тектонического сегмента произошло очень сильное землетрясение с магнитудой около $M 7,0$. Хотя его магнитуда была ниже, чем у землетрясения в Суусамыре в 1992 году, оно характеризовалось чрезвычайно богатой афтершоковой последовательностью с большим числом толчков в диапазоне магнитуд $M 4,5$ и выше. Именно эта необычно интенсивная афтершоковая активность является основной причиной экстремально высокого числа зарегистрированных землетрясений в 2024 году, что делает этот год сейсмически самым активным за весь рассматриваемый период.

5. Огненное кольцо: глобальная активация

Тихоокеанское огненное кольцо (Ring of Fire) — это полоса вулканов и тектонических разломов, окружающая Тихий океан подковообразно (Рис. 53). Этот район является домом примерно для 75 % всех активных и спящих вулканов на Земле (около 450 вулканов) и местом, где происходит примерно 90 % всех землетрясений.



Рис. 53: Огненное кольцо, источник: <https://www.britannica.com/place/Ring-of-Fire>

Огненное кольцо простирается от западного побережья Южной и Северной Америки через Аляску, Камчатку, Японию, Филиппины, Индонезию до Антарктиды — общая длина около 40 000 километров.

За последние годы различные сегменты Огненного кольца демонстрируют повышенную сейсмическую активность, о чём свидетельствует данный отчёт.

Южная Америка

Комплекс Laguna del Maule в центральной части Чили в 2025 году стал предметом повышенного внимания геологов из-за интенсивной сейсмической активности. С начала года регулярно фиксируются вулcano-тектонические землетрясения, включая, например, 160 толчков за два часа во время одного из эпизодов в апреле 2025 года, что сигнализирует о движении внутренних структур и проникновении магмы, вызывающих напряжения в земной коре.⁸¹

В июле и августе 2025 года активность ещё больше возросла. Официальные чилийские службы Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) совместно с Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) объявили для Лагуна-дель-Мауэле

⁸¹ <https://www.paislobo.cl/2025/04/reportan-160-sismos-en-dos-horas-en-el.html>

технический уровень тревоги «жёлтый», то есть повышенное наблюдение, на основании тысяч зарегистрированных землетрясений и постоянных деформаций поверхности.⁸²

Согласно еженедельному отчёту Smithsonian / USGS, в июле было зафиксировано более 11 000 вулcano-тектонических землетрясений, одновременно отмечался быстрый рост деформаций поверхности, что доказывает, что система нестабильна и магма, вероятно, продолжает движение и интрузию под вулканом.⁸³

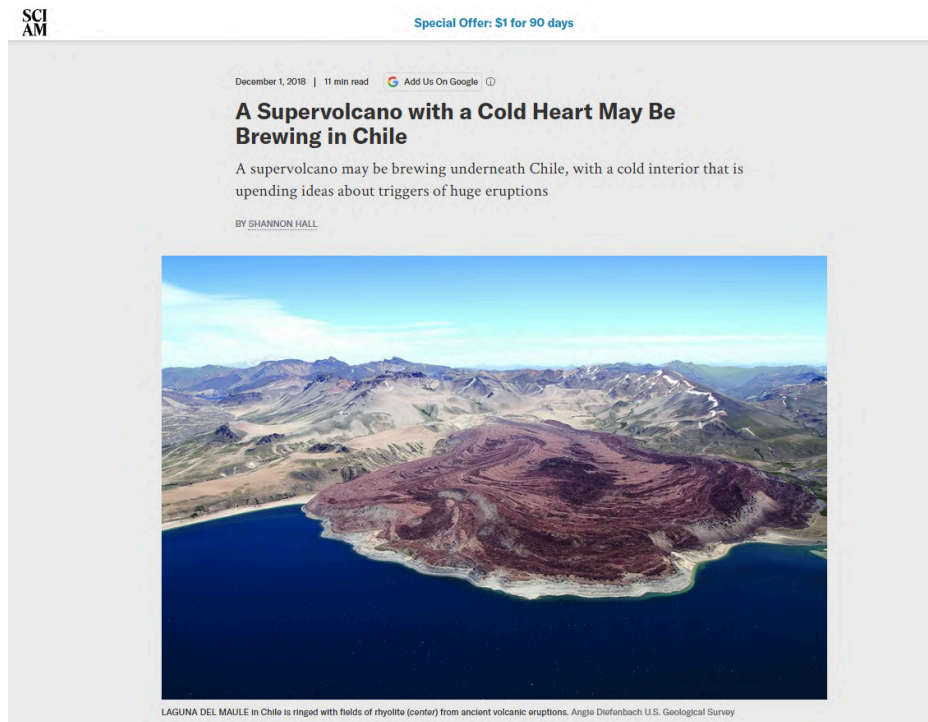


Рис. 54: «В Чили может готовиться извержение супервулкана», источник:

<https://www.scientificamerican.com/article/a-supervolcano-with-a-cold-heart-may-be-brewing-in-chile/>

Долгосрочные измерения показывают, что район был и остаётся одной из самых быстро «раздувающихся» вулканических зон в мире, что является результатом накопления магмы под поверхностью и истории крупных извержений в голоцене. Первоначальные медийные и научные обсуждения о том, что Лагуна-дель-Мауэле может быть «супервулканом», ссылаются на огромное количество накопленной магмы под кальдерой, которое при резкой эксплозии теоретически могло бы вызвать экстремально крупные извержения (Рис. 54).⁸⁴

⁸²

<https://web.senapred.cl/2025/08/06/sernageomin-decreta-alerta-tecnica-amarilla-para-el-complejo-volcanico-laguna-del-maule/>

⁸³ <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=357061>

⁸⁴ <https://www.scientificamerican.com/article/a-supervolcano-with-a-cold-heart-may-be-brewing-in-chile/>

<https://www.independent.co.uk/news/world/americas/chile-andes-earthquake-laguna-del-maule-volcano-b2732340.html>

Северная Америка: Каскадия

В северо-западной части США и Канады расположены Каскадные горы — вулканическая дуга, в которой находится около 120 вулканов. Этот пояс включает известные вулканы, такие как Маунт-Сент-Хеленс, Маунт-Рейнир, Маунт-Худ и Маунт-Шаста.

Маунт-Рейнир: крупнейший сейсмический рой в истории

Маунт-Рейнир — активный стратовулкан, покрытый льдом, находящийся в 97 км к юго-востоку от Сиэтла, штат Вашингтон. Его последнее известное извержение произошло примерно 1000 лет назад, но по данным Национальной системы раннего предупреждения о вулканах USGS он считается вулканом с очень высоким риском на основании множества факторов, включая близость к населённым пунктам, собственности и инфраструктуре.⁸⁵

В июле 2025 года Маунт-Рейнир пережил беспрецедентное событие — крупнейший сейсмический рой, когда-либо зафиксированный на этом вулкане с начала современного мониторинга в 1980-х годах. Последний крупный рой на Маунт-Рейнир в 2009 году имел максимальную магнитуду M 2,5 и длился три дня. Новый рой превзошёл рой 2009 года по общему числу событий, частоте толчков и выделению энергии.⁸⁶

С 8 июля по 31 июля 2025 года было зарегистрировано в общей сложности 10 834 землетрясения. Активные фазы достигали 20–25 землетрясений в час, постепенно снижаясь до нескольких событий в час к концу июля. Самое сильное землетрясение в рое произошло 11 июля с магнитудой M 2,4. Глубина гипоцентра землетрясений составляла 1,5–6,5 км под поверхностью.⁸⁷ Рисунок 52 показывает количество зарегистрированных землетрясений с 8 по 18 июля 2025 года, а на рисунке 53 представлены отдельные магнитуды событий (Рис. 55–56).

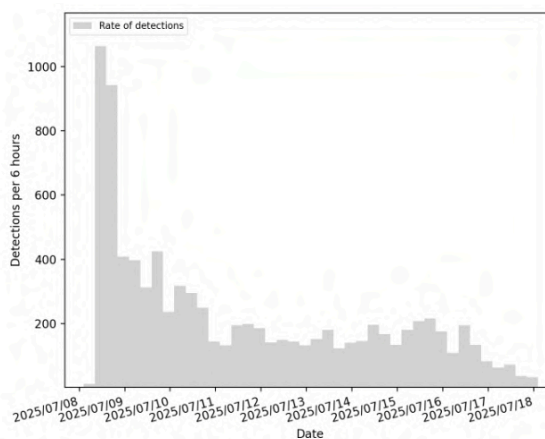


Рис. 55: График степени фиксации беспрецедентного сейсмического роя на Маунт-Рейнир с 8 по 18 июля 2025 года, источник: <https://pnsn.org/blog/mount-rainier-earthquake-swarm-of-july-2025>

⁸⁵ <https://volcanoes.usgs.gov/hans-public/volcano/wa6>

⁸⁶

<https://www.usgs.gov/observatories/cvo/news/monitoring-stations-detect-small-magnitude-earthquakes-mount-rainier>

⁸⁷ <https://pnsn.org/blog/2025/07/18/mount-rainier-earthquake-swarm-of-july-2025>

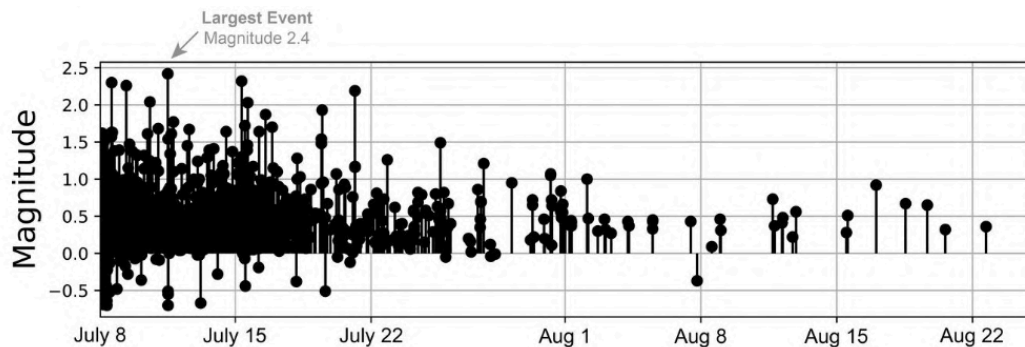


Рис. 56: График магнитуд землетрясений во время сейсмического роя с 8 июля по 25 августа 2025 года на Маунт-Рейнир, источник:

<https://www.usgs.gov/observatories/cvo/news/monitoring-stations-detect-small-magnitude-earthquakes-mount-rainier>

По словам Гарольда Тобина, профессора Университета Вашингтона, директора PNSN и государственного сейсмолога штата Вашингтон, сейсмический рой был вызван горячей водой глубоко в вулкане, которая инициировала движение вдоль существующих разломов.⁸⁸

Маунт-Рейнир известен средней частотой около 10 землетрясений в месяц, при этом рои случаются раз или два в год. Июльский рой 2025 года превзошёл все предыдущие записи и считается самым значительным в истории наблюдений за Маунт-Рейнир.

Маунт-Эдамс

Ещё более тревожная ситуация наблюдается на Маунт-Эдамс, втором по высоте вулкане штата Вашингтон.

Маунт-Эдамс обычно фиксирует одно небольшое землетрясение каждые 2–3 года. Однако с сентября 2024 по январь 2025 года было зарегистрировано 12 землетрясений — самое сильное достигло магнитуды М 2,0. «Это вулкан, который мы ожидаем активным следующим, и к которому мы хотим подготовиться», — сказал Уэс Теллен, геолог USGS.⁸⁹

Маунт-Сент-Хеленс

В прошлом году с февраля по июнь вулкан пережил примерно 350 землетрясений. Одно из землетрясений имело магнитуду М 2,0. Эта сейсмическая активность представляет собой наибольший краткосрочный рост числа землетрясений с момента последнего извержения вулкана в 2008 году. Учёные считают, что небольшие землетрясения под Маунт-Сент-Хеленс являются частью процесса «подзарядки», когда под вулканом накапливается магма в резервуаре на глубине около 4–10 км под уровнем моря.⁹⁰

⁸⁸ <https://www.dailyuw.com/article/earthquake-20250728>

⁸⁹ <https://www.fox13seattle.com/news/eruption-planning-mt-adams-helens>

⁹⁰ <https://www.kfyrtv.com/2024/06/23/magma-beneath-mount-st-helens-is-recharging-scientists-say/>

Реакция властей

В феврале 2025 года государственные чиновники собрались, чтобы обсудить действия в случае извержения Маунт-Эдамс или Маунт-Сент-Хеленс. Целью было создание нового координационного плана Mount Adams/Mount St. Helens Coordination Plan, который в последний раз обновлялся в 2014 году.⁹¹

Мегаразломная зона Каскадия: 300 лет накопленного напряжения

Хотя вулканы в зоне Каскадия демонстрируют повышенную активность в 2025 году, ещё большей угрозой является мегаразломная зона Каскадия, протянувшаяся от Северной Калифорнии до острова Ванкувер длиной около 1000 километров.

Вероятность мегакатастрофы: по данным USGS, существует 15% вероятность землетрясения примерно М 9 в мегаразломной зоне Каскадия в следующие 50 лет согласно модели времени прохождения Броуновского типа (учитывающей, что последнее крупное землетрясение произошло в 1700 году). Вероятность землетрясения М 8 в следующие 50 лет составляет 30 %.⁹²

Эта зона способна породить мегатрастовые землетрясения, подобные японскому Тохоку (2011, М 9,1) или чилийскому Вальдивия (1960, М 9,5). Такое землетрясение могло бы вызвать разрушительное цунами, затронувшее всё побережье Вашингтона, Орегона и Северной Калифорнии, где проживают миллионы людей.⁹³

В октябре 2025 года было опубликовано новое исследование Орегонского государственного университета, указывающее на связь между мегаразломной зоной Каскадия и разломом Сан-Андреас, что может означать, что одно массивное землетрясение может спровоцировать другое.⁹⁴

⁹¹ <https://mil.wa.gov/news/what-to-do-about-mount-st-helens-and-mount-adams>

⁹² <https://pubs.usgs.gov/fs/2025/3050/fs20253050.pdf>

⁹³

<https://scitechdaily.com/the-west-coast-is-at-risk-new-megathrust-fault-research-indicates-that-the-next-big-earthquake-could-be-imminent/>

⁹⁴ <https://www.axios.com/local/portland/2025/10/15/cascadia-san-andreas-fault-connection-earthquake>

6. Пробуждающиеся супервулканы

Campi Flegrei – исторический год активности

Италия, расположенная на границе Евразийской и Африканской плит, является домом для некоторых из самых известных и опасных вулканов Европы.

Campi Flegrei — это обширная вулканическая кальдера, расположенная к западу от Неаполя, одного из самых густонаселённых городов Европы (Рис. 57). Эта 13-километровая кальдера является домом примерно для 360 000 человек, а в её непосредственной близости проживает ещё несколько миллионов. В 2025 году в этом районе происходит нечто беспрецедентное — все мониторинговые параметры достигают исторических максимумов и указывают на то, что супервулкан действительно пробуждается.

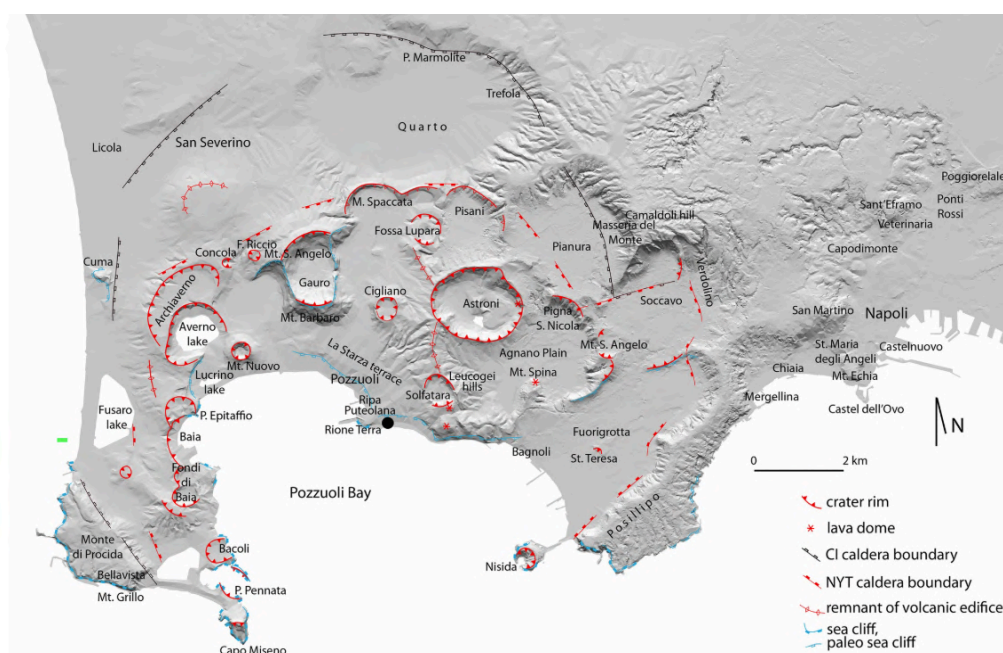


Рис. 57: Карта кальдеры Campi Flegrei, источник: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00445-021-01503-x>

Campi Flegrei не является типичным вулканом в форме конуса, это огромная обрушившаяся область — кальдера, которая образовалась после катастрофических извержений примерно 39 000 и 15 000 лет назад. Эти извержения имели глобальные климатические последствия.

Старшее извержение, известное как Кампанское игнимбритовое извержение (39 000 лет назад), выбросило около 430–680 км³ вулканического материала⁹⁵ — это крупнейшее извержение в Европе за последние 200 000 лет. Пепел этого извержения распространился на огромные расстояния, обнаружен на расстоянии до 2500 км от источника⁹⁶ и вызвал резкое похолодание в Европе примерно на 7°С⁹⁷, что, по мнению многих специалистов, способствовало вымиранию неандертальцев⁹⁸.

⁹⁵ <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2020.543399/full>

⁹⁶ <https://link.springer.com/article/10.1007/s00445-021-01503-x>

⁹⁷ <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4756320/>

⁹⁸ <https://www.sciencedaily.com/releases/2015/03/150320112332.htm>

Младшее крупное извержение, известное как Неаполитанский жёлтый туф (12 000–15 000 лет назад), выбросило около 40–50 км³ вулканического материала. Тефровый осадок (пепел и пемза) покрыл большую часть Италии, пепел был обнаружен также в Чёрном море.

В последний раз небольшое извержение произошло в 1538 году, когда образовался холм Монте-Нуово (Новая гора) — конус высотой 123 метра, который сформировался за одну неделю в сентябре 1538 года. Хотя это извержение было небольшим по сравнению с мегаизвержениями, оно унесло около 24 жизни и практически уничтожило весь город Позцуоли.

Campi Flegrei часто классифицируют как супервулкан — огромную геологическую систему, способную к извержениям с глобальными последствиями.

2025 год: рекордная сейсмическая активность

2025 год стал рекордным по сейсмической активности в Campi Flegrei. INGV (Итальянский национальный институт геофизики и вулканологии) локализовал здесь более 5150 землетрясений, что превышает 4900 событий предыдущего года.⁹⁹

И речь идёт не только о количественном росте (Рис. 58). С каждым годом увеличивается не только число землетрясений, но и их магнитуда — а значит, и общая энергия, выделяемая при них. Ситуация ни в коем случае не успокаивается. Напротив, она становится всё более напряжённой, и риск катастрофических событий растёт.

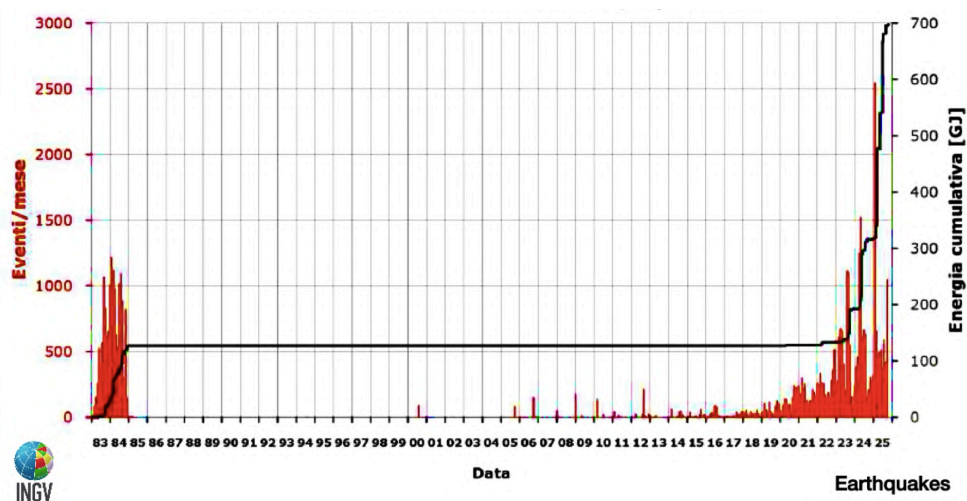


Рис. 58: Беспрецедентная сейсмическая активность по числу землетрясений в окрестностях Campi Flegrei, источник: <https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

2025 год также принес рекордное количество более сильных землетрясений. До 5 толчков с магнитудой выше M 4,0 произошло прямо в кальдере, при этом вблизи Неаполя произошло ещё 2 землетрясения с магнитудой выше M 4,0.¹⁰⁰

Самые сильные землетрясения в истории наблюдений Campi Flegrei:

⁹⁹ <https://www.vulkane.net/blogmobil/campi-flegrei-erdbebenschwarm-am-11-oktober/>

¹⁰⁰ <https://www.terremotiflegrei.it/filtro.php?from=2025-01-01&to=2025-11-03&minmag=4>
<https://www.volcanodiscovery.com/campi-flegrei-earthquakes/archive/2025.html>

- 30 июня 2025: M 4,6
- 13 марта 2025: M 4,6
- 13 мая 2025: M 4,4

Эти значения представляют собой крупнейшие землетрясения, когда-либо зарегистрированные в современной истории инструментальных наблюдений.¹⁰¹ Для сравнения, до 2023 года землетрясения с магнитудой выше M 3,0 происходили крайне редко (Рис. 59).

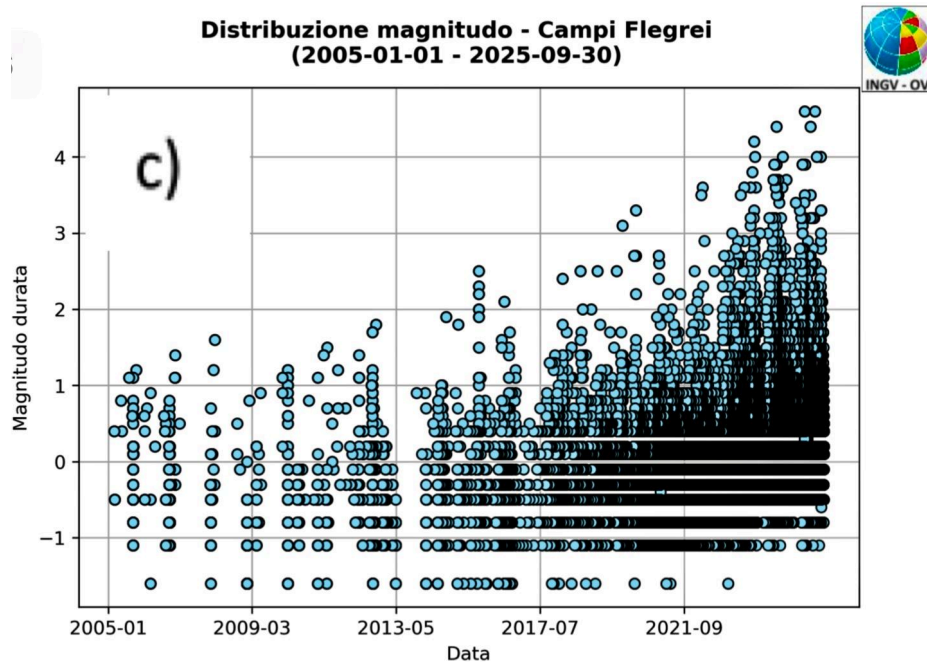


Рис. 59: Беспрецедентная сейсмическая активность по интенсивности землетрясений в окрестностях Campi Flegrei, ИСТОЧНИК:

<https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

Брадисеизм: постоянное поднятие кальдеры

Кальдера Campi Flegrei непрерывно поднимается с 2005 года (Рис. 60) — в настоящее время примерно на 15 миллиметров в месяц. Этот феномен вызван накоплением газов и магмы под поверхностью.¹⁰²

¹⁰¹ <https://www.nature.com/articles/s43247-025-02604-7>

¹⁰² <https://newsroom24.it/notizia/2025/10/02/campi-flegrei-lasfalto-bolle-arrivano-i-tecnici-dellingv>

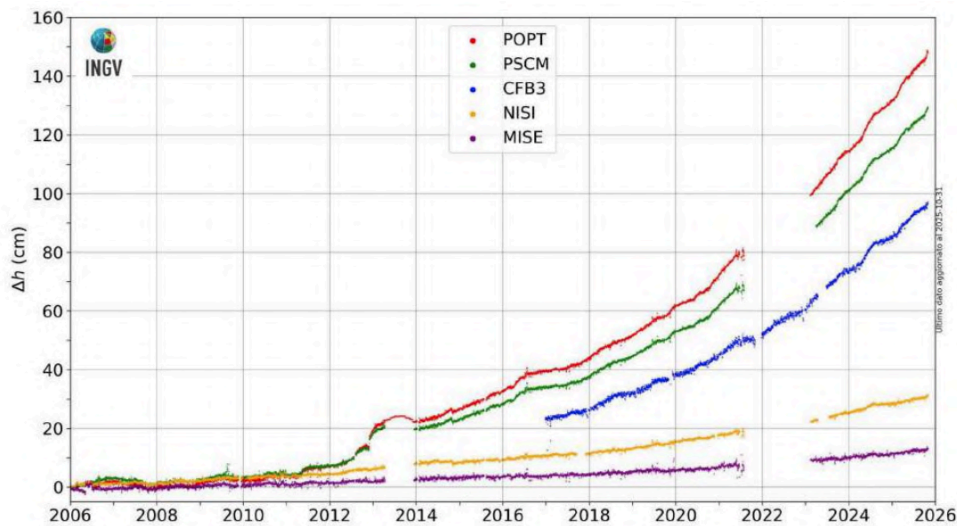


Рис. 60: Беспрецедентное поднятие кальдеры Campi Flegrei, источник:

<https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

В прошлом значительные поднятия поверхности (десятки метров) предшествовали крупным извержениям. Согласно исследованию, опубликованному в Nature Communications Earth & Environment (2023), поверхностная кора ослаблена, а её эластичность снижена десятилетиями повторяющихся циклов инфляции и дефляции (брадисеизм).¹⁰³

Как пишут учёные: «Магматической эрекции могут в этот раз предшествовать более слабые сигналы, например, более низкая скорость сейсмичности или меньшее количество подъёма почвы». Этот сценарий напоминает кальдеру Рабаул (Папуа — Новая Гвинея) в 1994 году, когда извержение произошло после значительно слабых предупредительных сигналов по сравнению с сигналами десятилетней давности. В 1983–1985 годах в Рабауле наблюдалась массивная инфляция и тысячи землетрясений, но извержения не произошло. Когда же в 1994 году извержение действительно началось, предупредительные сигналы были гораздо слабее — но извержение было разрушительным.

Для Campi Flegrei это означает, что нельзя полагаться на драматические предупредительные сигналы. Извержение может произойти даже при меньшем подъёме почвы, чем в прошлом.

Рекордные температуры фумарол: 165°C

В августе 2025 года директор неаполитанского отделения INGV Мауро Ди Вито сообщил, что температура главной фумаролы в районе Сольфатары достигла 165°C — самой высокой величины, когда-либо зафиксированной.¹⁰⁴ В октябре температура достигала даже 168–170 °C (Рис. 61).

Сольфатара — один из самых активных районов Campi Flegrei: кратер с интенсивной фумарольной активностью (выход вулканических газов) и горячими грязевыми озёрами. Повышение температуры указывает на усиленный поток тепла из глубоких слоёв, что может

¹⁰³ <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00842-1>

¹⁰⁴

https://www.ilmattino.it/napoli/area_metropolitana/terremoto_campi_flegrei_di_vito_ingv_campi_flegrei_aumentat_a_emissione_gas_solfatara_diminuite_pisciarelli-9032201.html?refresh_ce

свидетельствовать о притоке новой магмы в систему или усилении гидротермальной циркуляции.

Для сравнения: температуры фумарол в Сольфатаре длительное время колебались около 95–110°C. Прыжок до 165°C представляет собой драматическое изменение.¹⁰⁵

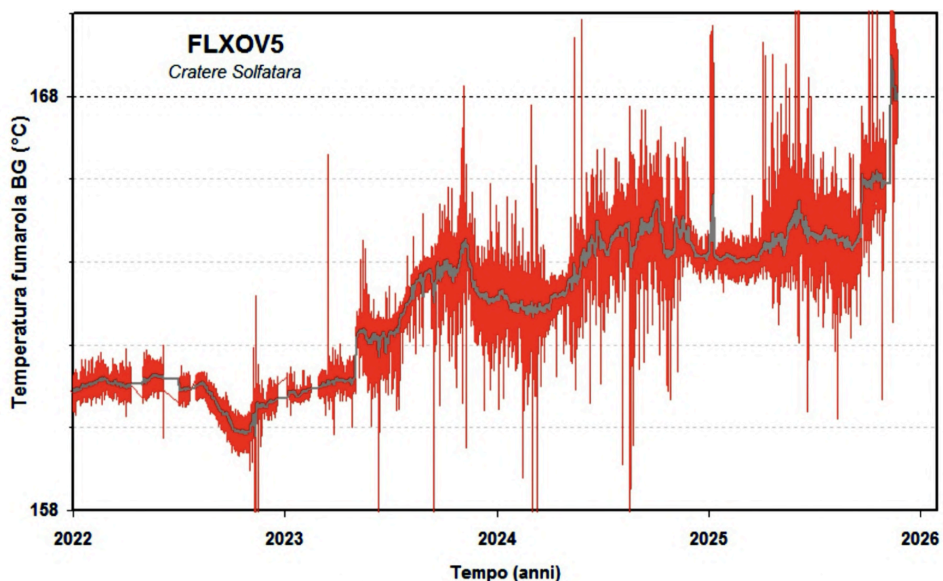


Рис. 61: Рекордные температуры фумарол, источник:

<https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

Таящийся асфальт и дым с дорог

Летом 2025 года местные жители с тревогой наблюдали тающий асфальт в окрестностях Сольфатары, где дорожное покрытие деформировалось и на его поверхности появлялись пузыри. Фотографии из района показывают асфальт, деформированный теплом, поднимающимся из земли (Рис. 62).¹⁰⁶

В октябре 2025 года из свежеположенного асфальта стал выходить сероватый дым, при этом в нём образовалась 30-сантиметровая дыра. Фотографии, опубликованные местными СМИ, показывают, как из-под дороги валит пар и газ.¹⁰⁷ Эти явления не просто курьез — это прямое доказательство того, что тепло и газы из глубоких слоёв достигают поверхности с необычной интенсивностью.

¹⁰⁵

<https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

¹⁰⁶

<https://www.fanpage.it/napoli/la-strada-dei-campi-flegrei-e-deformata-bolle-sullasfalto-alla-solfatara-i-tecnici-dell'ingv/>

¹⁰⁷

<https://www.ilfattovesuviano.it/2025/10/campi-flegrei-fuoriesce-fumo-dallasfalto/>
<https://napoli.zon.it/campi-flegrei-segnalata-fuoriuscita-di-fumo-dallasfalto/>

Via Antiniana, la strada deformata. A destra, la stessa zona vista con la termocamera di Solfatara News

Campi Flegrei

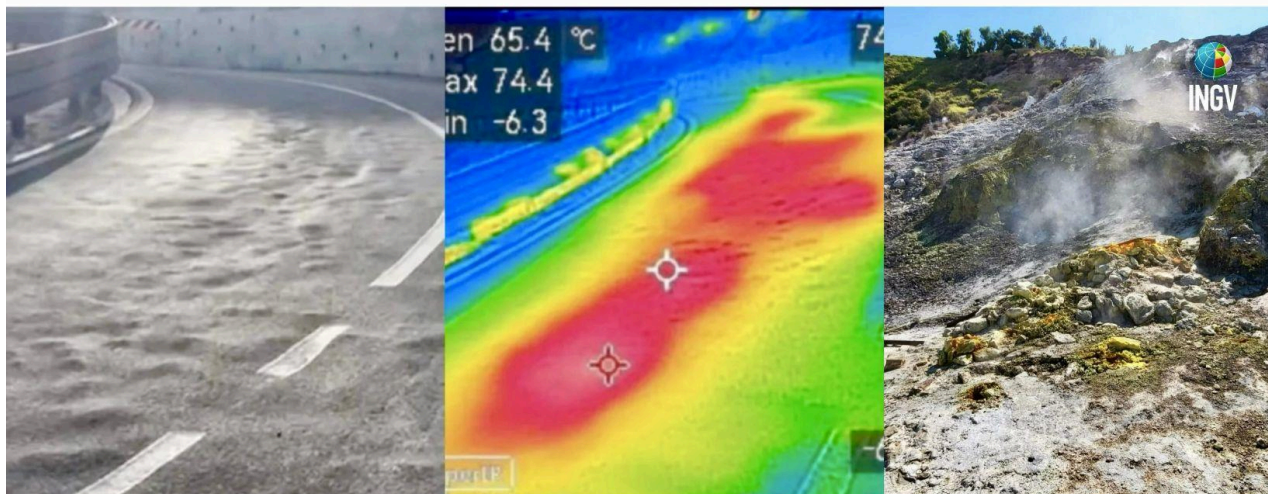


Рис. 62: Таяние асфальта и выходящие газы, источники:

<https://www.fanpage.it/napoli/la-strada-dei-campi-flegrei-e-deformata-bolle-sullasfalto-alla-solfatara-i-tecnici-dellingv/>, <https://napoli.zon.it/campi-flegrei-segnalata-fuoriuscita-di-fumo-dallasfalto/>

Эмиссии CO₂: 5500 тонн в день

Эмиссии CO₂ (углекислого газа) в районе Campi Flegrei резко растут. В ноябре 2025 года в районе Сольфатара было зафиксировано до 5500 тонн CO₂ в день (Рис. 63).¹⁰⁸

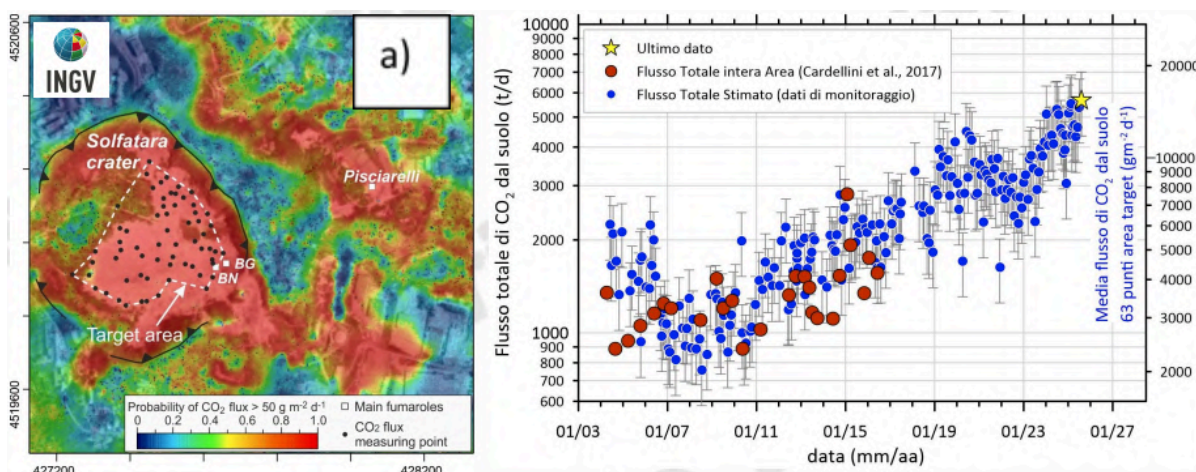


Рис. 63: Эмиссии CO₂ в кальдере достигли рекордных значений — 5500 т/день. Источник:

<https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file>

Синтез: все индикаторы указывают на пробуждение

Таблица всех ключевых параметров в 2025 году:

Параметр	Стоимость на 2025 год	Исторический максимум	Тренд
Количество землетрясений	5150+	Записывать	↑ Растет
Самое сильное землетрясение	M4.6	Записывать	↑ Растет
Количество землетрясений магнитудой M4+	5 в кальдере + 2 в окрестностях	Записывать	↑ Растет
Скорость подъема	15-20 мм/месяц	Близко к рекорду	↑ Растет
Общий объем подъемов тяжестей с 2005 года	>1 метр	Близко к рекорду	↑ Растет
температура фумаролы	165°C	Записывать	↑ Растет
выбросы CO ₂	5500 тонн/день	Записывать	↑ Растет
Поверхностные проявления	Расплавленный асфальт, дым с дорог	Очень сильно	↑ Ситуация ухудшается

Всё указывает на то, что супервулкан Campi Flegrei действительно пробуждается.

Campi Flegrei: перед малым или большим извержением?

Исследование, опубликованное в журнале *Science Advances*, проанализировало химический и минералогический состав магмы прошлых извержений Campi Flegrei. Диаграмма на Рис. 64 показывает температуру и насыщенность магмы водой во время подготовки отдельных извержений — она указывает, насколько горячей должна была быть магма, чтобы сформировались наблюдаемые минералы.¹⁰⁹

¹⁰⁹ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aat9401>

Fig. 4 Variations of temperature and water content.
 Time paths of equilibrium temperature (°C) and magma water content (wt %) estimated for the studied units
 Source: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aat9401>

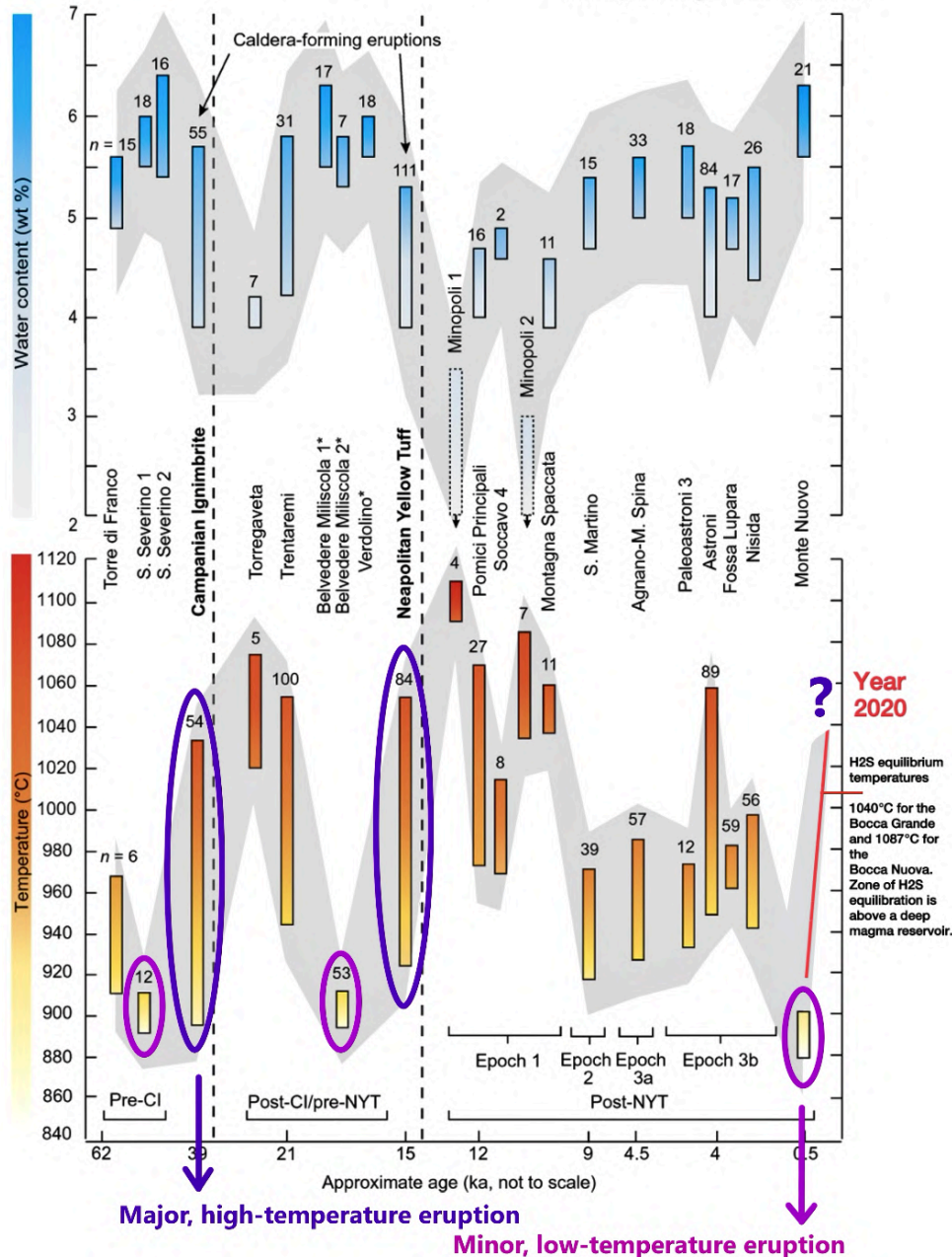


Рис. 64: Температура магмы и содержание воды в прошлых извержениях Campi Flegrei, источник: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aat9401>

На диаграмме видно чёткое закономерность: перед крупными извержениями (Neapolitan Yellow Tuff 15 000 лет назад и Кампанское игнимбритовое извержение 39 000 лет назад), когда температура магмы достигала примерно 1050°C, всегда предшествовало небольшое извержение с низкой температурой магмы, очень похожее на извержение Монте-Нуово 1538 года.

Доктор Форни обнаружил, что химический состав извержения Монте-Нуово 1538 года схож с более древними активностями, когда вулкан постепенно формировал кальдеры. Наличие двух кальдер указывает на то, что Campi Flegrei, вероятно, завершил хотя бы один цикл. Если эта закономерность сохраняется, химический состав указывает на то, что «мы можем находиться в начале нового цикла», — отметил доктор Форни.¹¹⁰

¹¹⁰ <https://www.nytimes.com/2018/11/14/science/volcano-eruption-italy.html#>

Другими словами: извержение Монте-Нуово в 1538 году могло быть не изолированным небольшим событием, а первым шагом в новом цикле, который исторически приводил к мегаизвержениям.

Рекордные температуры в глубоком резервуаре: 1040°C+

Ещё более тревожны последние данные о температурах в глубокой магматической системе. Исследование, опубликованное в журнале *Solid Earth* (2025), отслеживало газовые геоиндикаторы и геофизические данные для района Сольфатара и выявило настораживающие изменения.¹¹¹

В то время как более мелкий слой флюидной системы оставался относительно стабильным, глубокий резервуар (6,5–7,5 км под поверхностью) претерпел в период с 1984 по 2022 год «заметный и прогрессивный» рост температуры и давления:

- 1984: примерно 650°C
- 2020: 1010–1040°C (максимально до 1087°C)

Это означает повышение на 360–390°C за 36 лет — геологически крайне быстрый процесс (Рис. 65).

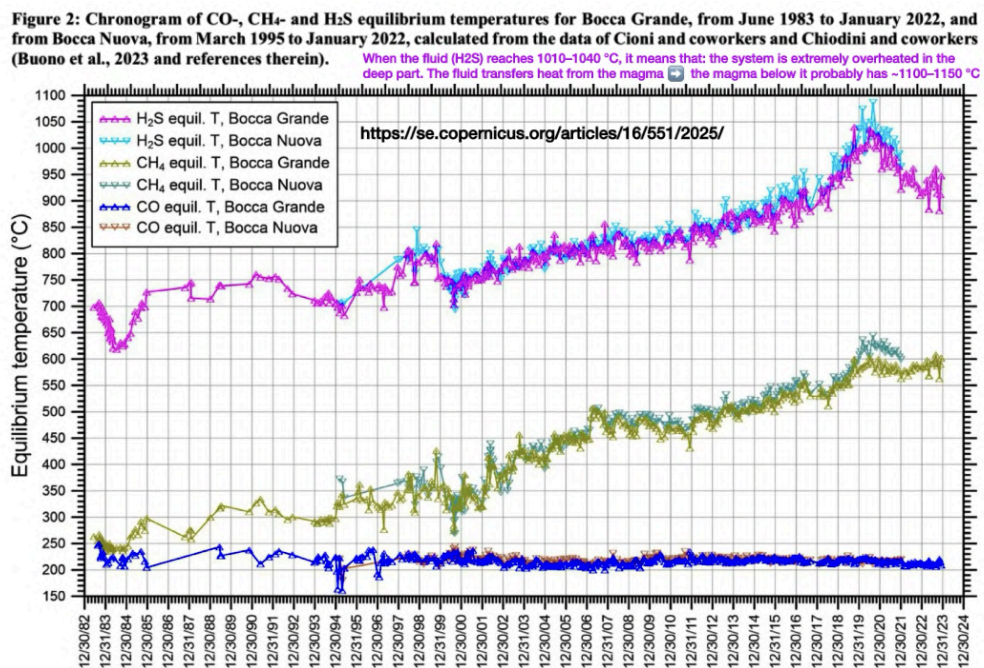


Рис. 65: Рост температуры газовых геоиндикаторов, розовая линия: H₂S (глубокий резервуар магмы), источник: <https://se.copernicus.org/articles/16/551/2025/>

Авторы исследования на основе расчётных данных также отмечают, что температура магмы в глубоком резервуаре должна быть выше, чем температура флюидной системы (сверхкритические газы/жидкости). Оценка текущей температуры магмы в глубоком резервуаре может достигать 1100–1150°C.

¹¹¹ <https://se.copernicus.org/articles/16/551/2025/>

Это означает, что сегодняшняя глубокая магма, вероятно, горячее большинства исторических магм на предизверженных стадиях (Рис. 66).

Вулканолог INGV Мастролоренцо в этом году заявил: «Суперизвержение уже давно задерживается».¹¹²

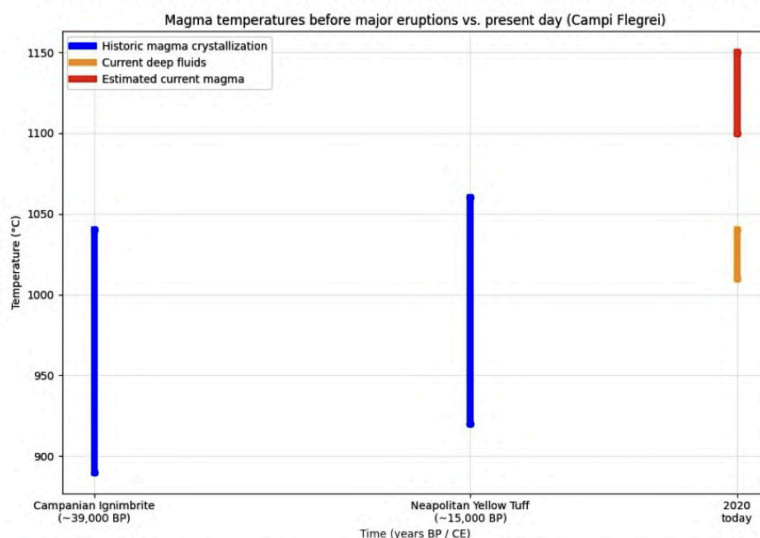


Рис. 66: Температура магмы перед крупными извержениями и текущая температура магмы в Campi Flegrei. График создан на основе данных научных публикаций:

<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aat9401>, <https://se.copernicus.org/articles/16/551/2025/>

Что означало бы суперизвержение Campi Flegrei?

Последствия на разных расстояниях:

Прямая зона взрыва (0–100 км)

- Полная девальвация — разрушительные пирокластические потоки (разогретые газы, пепел и камни) мгновенно уничтожили бы всё вокруг.
- Землетрясения и оползни могли бы изменить географию всего региона.
- Сильные взрывы разрушили бы инфраструктуру и вызвали гигантские ударные волны.

Ближняя зона (100–500 км)

- Падение пепла может достигать нескольких метров, вызывая обрушение зданий.
- Токсичные газы (диоксид серы, фтористый водород) могут вызвать серьезные проблемы со здоровьем, включая повреждение лёгких и отравления.
- Загрязнение воды — кислотные дожди могли бы загрязнить запасы питьевой воды.

¹¹² <https://themunicheye.com/supervolcano-near-naples-eruption-threat-13549>

Средняя зона (500–1500 км)

- Сильное выпадение пепла (от нескольких сантиметров до десятков см) нарушило бы транспорт и вызвало дыхательные проблемы у людей и животных.
- Блокировка солнечного света привела бы к временному похолоданию и нарушению сельского хозяйства.
- Авиация была бы парализована, пепел повреждает двигатели самолётов.

Глобальный эффект (более 1500 км)

- Глобальное похолодание — пепел и газы могут охладить планету на 2–5°C на несколько лет.
- Потеря урожая — снижение солнечного излучения уменьшит фотосинтез и может вызвать экономический кризис.
- Повышенная кислотность океанов из-за оксидов серы в атмосфере.

Sakurajima и кальдера супервулкана Aira

Sakurajima расположена в кальдере супервулкана Aira на острове Кюсю и считается одним из самых активных вулканов не только в Японии, но и в мире. Она возникла 13 000 лет назад мощным извержением. Активность постепенно увеличивалась в последние тысячелетия, однако до сих пор не было извержения такой величины, как 13 000 лет назад¹¹³. Скорость поступления магмы в мелкую магматическую камеру увеличилась за последние примерно 500 лет¹¹⁴.

С точки зрения относительно современной истории важно отметить извержение 1914 года, которое существенно изменило остров, соединяя лавовым потоком северный выступ острова с материком.¹¹⁵

В последние годы в районе вулкана Sakurajima наблюдается повышенная сейсмическая активность, проявляющаяся увеличением числа слабых и средних землетрясений (M 2+). График на Рис. 67 показывает, что в последние годы — особенно в 2025 году — количество событий низкой магнитуды значительно превышает долгосрочное среднее с 80-х годов. Такая повышенная сейсмичность и непрерывающаяся интенсивная извержная активность указывают на активные перемещения магмы и изменения давления в мелкой магматической системе.

¹¹³

https://www.researchgate.net/publication/365734586_Long-term_change_of_the_eruption_activities_of_Sakurajima_volcano_Japan_inferred_from_the_fallout_tephra_deposits

https://qbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/sakurajima/text/eng/exp01-2e.html#

¹¹⁴

https://www.researchgate.net/publication/377509384_Increase_in_magma_supply_to_Sakurajima_volcano%27s_Japan_shallow_magma_chamber_over_the_past_500_years

¹¹⁵

https://www.researchgate.net/publication/320043455_The_1914_Taisho_eruption_of_Sakurajima_volcano_stratigraphy_and_dynamics_of_the_largest_explosive_event_in_Japan_during_the_twentieth_century

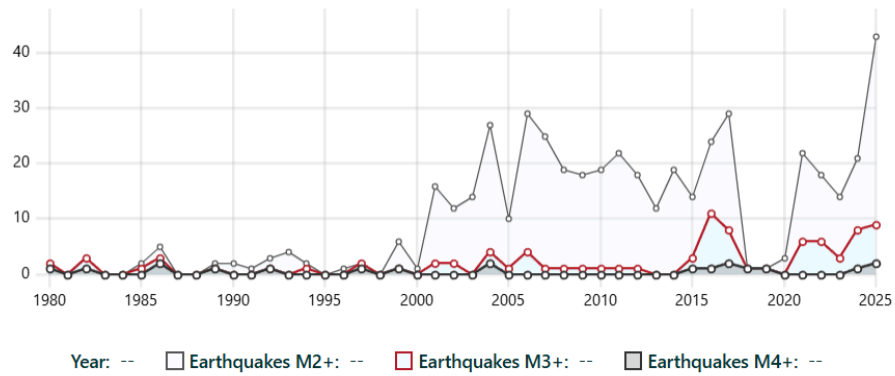


Рис. 67: Повышающаяся сейсмическая активность в районе вулкана Sakurajima (кальдера Aira). Примечание: в 2018–2020 годах землетрясения отсутствуют в базе данных сайта VolcanoDiscovery для всей Японии. Источник: <https://www.volcanodiscovery.com/sakurajima-earthquakes.html>

Хотя Sakurajima почти непрерывно извергается с 1955 года¹¹⁶, её изверженная активность в последние годы увеличивается (Рис. 68). Наибольшие показатели активности были в 2010–2015 годах¹¹⁷, хотя и в 2025 году активность не прекращалась (361 извержение)¹¹⁸.

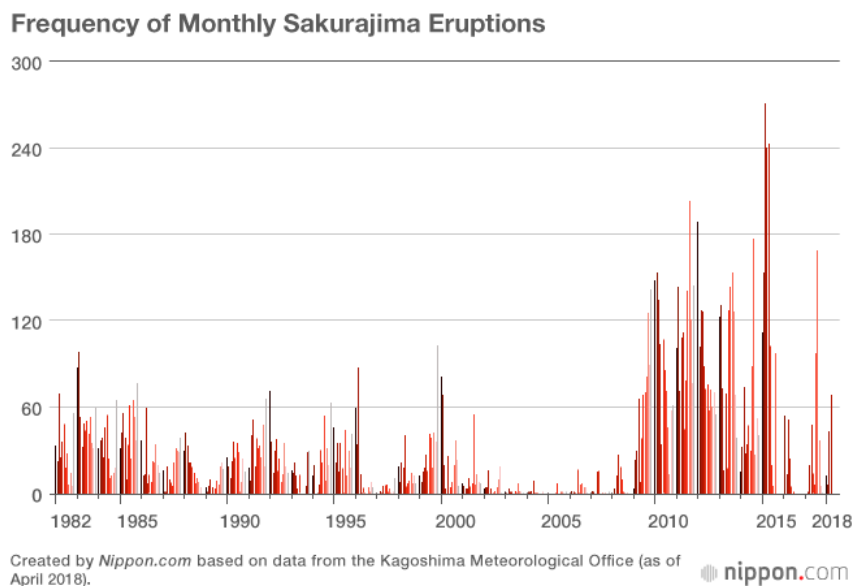


Рис. 68: Частота извержений вулкана Sakurajima, источник: <https://www.nippon.com/en/features/h00194/>

С точки зрения деформации поверхности на сайте города Кагосима (управляющего районом вулкана) указано, что с извержения 1914 года наблюдается подъём земли (Рис. 69) — доказательство накопления магмы под вулканом.¹¹⁹

¹¹⁶ <https://www.offthetrackjapan.com/sakurajima/>

¹¹⁷ <https://www.nippon.com/en/features/h00194/>

¹¹⁸ https://www.data.jma.go.jp/kagoshima/vol/data/skr_erp_num.html

¹¹⁹ <https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/leadingcity/current.html>

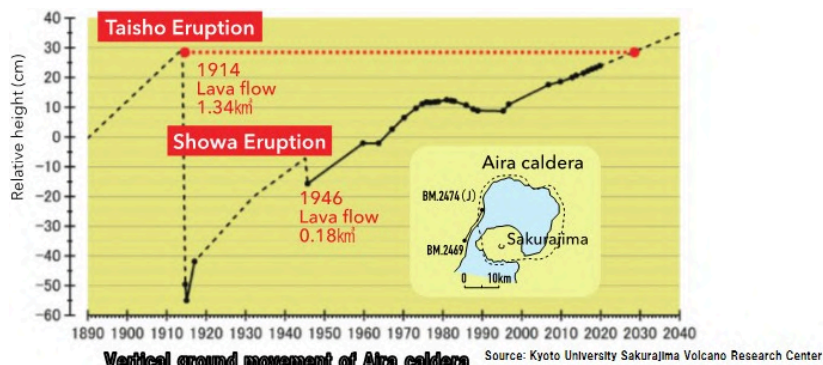


Рис. 69: Подъём земли в кальдере Aira с 1890 года, источник: <https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/leadingcity/current.html>

Ещё 10 лет назад JMA и вулканологи предупреждали, что Sakurajima «может вести к крупному извержению» — анализ деформаций и сейсмической активности того периода был интерпретирован как возможный значительный взрыв в будущем¹²⁰. С тех пор сохраняется изверженная активность и продолжает усиливаться сейсмическая активность в районе Sakurajima, являющегося частью кальдерной системы супервулкана Aira.

Германия: Laacher See

Laacher See — это вулканическое озеро в немецкой федеральной земле Рейнланд-Пфальц, примерно в 24 км к северо-западу от Кобленца. Озеро заполняет кальдеру, которая образовалась при массивном извержении около 12 900 лет назад. Это извержение, достигшее VEI 6, выбросило примерно 20 кубических километров вулканического материала и охватило большую часть Центральной Европы.¹²¹

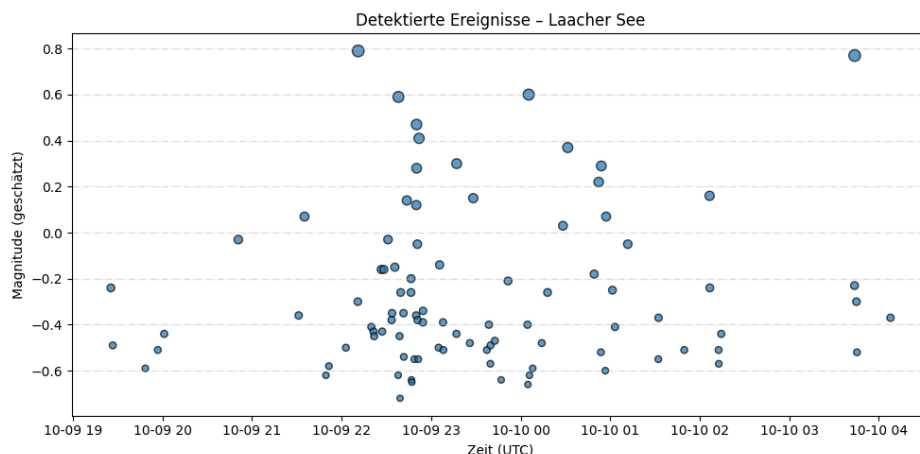


Рис. 70: Беспрецедентно интенсивный сейсмический рой в районе Laacher See 9–10 октября 2025 года, источник: <https://erdbebennews.de/2025/10/erdbebenschwarm-am-laacher-see/>

В пятницу, 10 октября 2025 года, был зафиксирован беспрецедентно интенсивный рой мелких землетрясений — самый сильный за 20-летний период наблюдений (Рис. 70). По данным

¹²⁰ <https://www.wired.com/2015/08/sakurajima-japan-might-headed-towards-large-eruption/>

¹²¹ <https://ejm.copernicus.org/articles/37/385/2025/>

немецких сейсмологических служб: «В районе озера ранее наблюдались небольшие толчки и локальные рои, но активность такого масштаба абсолютно беспрецедентна».¹²²

Кроме того, 31 октября 2025 года произошло землетрясение магнитудой примерно М 2,7–2,9 около 10 км от кальдеры у Кобленца.¹²³

Согласно последним исследованиям, под Laacher See существуют конкретные сейсмические и геофизические сигналы, указывающие на сложное поведение жидкостей и магмы на глубине. Микросейсмичность и моментный анализ слабых толчков показывают, что многие землетрясения в регионе связаны с тектонической активацией разломов и избыточным давлением флюидных фаз, что может быть связано с продолжающимися процессами в магматической системе под вулканом.¹²⁴

Опубликованное исследование сейсмологов и геофизиков также показывает, что под Laacher See происходит постепенное пополнение магмы, то есть медленный приток магматических флюидов. Изучаемые низкочастотные землетрясения происходят в слоях примерно от 10 до 40 км глубины и интерпретируются как сигнал миграции магматических жидкостей и газов вверх.¹²⁵

Геодезические измерения выявили значительные деформации поверхности, которые могут быть связаны с динамикой подстилающей магматической системы. Мониторинговые сети GNSS зафиксировали кратковременную вертикальную деформацию, при которой некоторые станции показали подъём до примерно 39 мм в течение одного дня (5 декабря 2022 года) на северной стороне Laacher See по сравнению с предыдущим днём, что может указывать на локальные изменения давления в коре или системные процессы, связанные с магматическими флюидами.¹²⁶ Такой масштаб подъёма земной поверхности у вулканов обычно накапливается в течение нескольких лет, а не в течение одного дня.

Кроме того, по сравнению с окружающей территорией под Laacher See наблюдается повышенное выделение CO₂, которое выходит из магматической системы вдоль разломов и трещин. CO₂ выделяется прямо в озере и на сухих берегах, при этом годовой поток CO₂ оценивается в диапазоне 5000–12 800 тонн в год, что считается признаком продолжающейся вулканической активности и утечки газовой фазы из магматического источника под вулканом.¹²⁷

¹²² <https://erdbebennews.de/2025/10/erdbebenschwarm-am-laacher-see/>

¹²³

<https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/quake-info/22334958/quake-felt-Oct-31-2025-Near-Koblenz-Rheinland-Pfalz-Germany.html>

¹²⁴ <https://academic.oup.com/gji/article/244/2/ggaf475/8340366?login=false>

¹²⁵

<https://www.gfz.de/en/press/news/details/deep-low-frequency-earthquakes-indicate-migration-of-magmatic-fluids-beneath-laacher-see-volcano-eifel-germany>

¹²⁶

https://files.igs.org/pub/resource/pubs/workshop/2024/IGSWs-2024-PS0504-Deng-Deformation_Monitoring_on_Laacher_See_Volcano_by_GNSS.pdf

¹²⁷ <https://academic.oup.com/gji/article/216/3/2025/5257845?login=false>

SCIENCE
Volcano in Germany recharging with new magma

Conor Dillon
 02/06/2019

Above, a pristine blue lake filled with boaters and swimmers. Below, magma bubbles and swells. What sounds like a Hollywood plot is in fact based on new research by geophysicists in Germany.



image: mago/westend61

DW: Lake Laach, which is very close to where I'm sitting right now [40 kilometers, or 25 miles from Bonn, Germany] — there are deep earthquakes showing that magma is rising beneath this lake. That sounds ... scary. What's happening?

Is Germany's Active Volcano Awakening?

Posted May 16, 2019 By Martin Armstrong | 2 minutes read

SPREAD THE LOVE



View of the caldera volcano

Most people have never heard of a volcano in Germany. Well, the caldera of Laacher See was formed after the Laacher volcano that erupted between 12,900 and 11,200 years ago. Everything collapsed into the empty magma chamber below only two or three days after the eruption, forming what is now a lake. The estimated Volcanic Explosivity Index value was that of 6, which means that this eruption was 250 times larger than the eruption of Mount St. Helens back in 1980. Remains of this eruption can be found all over Europe and is often used for dating sediments. A number of unique minerals, like Haasyn, can be found in the region, and quarries to mine the stone as a building material.

Рис. 71: «Вулкан в Германии заряжается новой магмой» и «Пробуждается ли активный вулкан в Германии?», источники: <https://www.dw.com/en/the-lake-laach-volcano-in-germany-is-recharging-with-fresh-magma/a-47384295>, <https://www.armstrongeconomics.com/international-news/nature/germanys-active-volcano-awakening/>

Эти совокупные доказательства — повышенные слабые землетрясения, включая событие М 2,7 в 2025 году, низкочастотные сейсмические сигналы, связанные с миграцией магматических флюидов, и постоянные выбросы CO₂ — свидетельствуют о том, что Laacher See, хотя не извергался более 12 000 лет, является геологически активной системой, в которой происходят внутренние процессы пополнения магмы и изменения давления. Его повышенная активность, зафиксированная в последние годы, вызывает вопросы о возможном пробуждении этой системы после тысячелетий покоя (Рис. 71).¹²⁸

¹²⁸ <https://www.armstrongeconomics.com/international-news/nature/germanys-active-volcano-awakening/>

7. Глобальный рост вулканической активности

Следующий график на Рис. 72 показывает дней с зафиксированной вулканической активностью на планете по отдельным годам на основе базы данных Smithsonian Institution – Global Volcanism Program (GVP). Эта метрика представляет собой временно интегрированный индикатор глобальной вулканической активности, который включает количество извержений, их продолжительность, а также одновременную активность нескольких вулканов, и подходит для сравнения уровня зафиксированной активности между отдельными годами.

С 1968 года Глобальная программа вулканизма (GVP) непрерывно собирает глобальные исторические и современные данные о вулканической активности, которые составляют основу базы данных «Вулканы мира» и связанных с ней онлайн-баз данных. Эта система включает записи об извержениях, типах вулканов и их активности за последние примерно 10 000 лет, что делает ее одним из самых полных источников информации о вулканизме в мире.¹²⁹

GVP также интегрирует внешние данные, включая спутниковые измерения, например данные о концентрациях диоксида серы (SO₂)¹³⁰ или наблюдения за изменениями цвета деревьев со спутников NASA¹³¹. Сотрудничество между Смитсоновским институтом и NASA таким образом вносит значительный вклад в более точное мониторинг и понимание глобальной вулканической активности, при этом современные спутниковые технологии позволяют отслеживать извержения практически в режиме реального времени даже в отдаленных районах мира.

История систематического мониторинга глобальной вулканической активности с использованием спутниковых систем (посредством детекции тепловых аномалий) восходит к 1970-м годам, когда датчики AVHRR (Advanced Very-High-Resolution Radiometer) были размещены на спутниках NOAA. В 1999–2002 годах запуск системы MODIS на спутнике Terra в 1999 году, а затем и на спутнике Aqua в 2002 году означал улучшение глобального мониторинга вулканов, поскольку они обеспечили ежедневные тепловые снимки с глобальным покрытием.¹³²

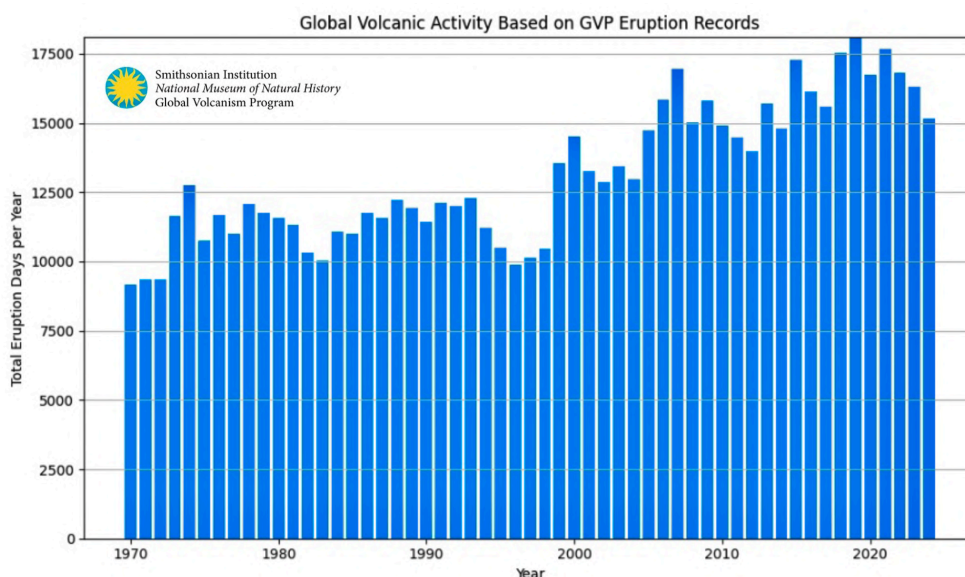


Рис. 72: Глобальный рост вулканической активности в мире, график создан на Python с использованием данных Global Volcanism Program, Smithsonian Institution: https://volcano.si.edu/gvp_votw.cfm

¹²⁹ <https://fsm-data.sprep.org/dataset/volcanoes-world-global-volcanism-program>

¹³⁰

<https://data.nasa.gov/dataset/multi-satellite-air-quality-sulfur-dioxide-so2-database-long-term-l4-global-v2-msaqs02l4-a-d5d7e>

¹³¹ <https://www.weforum.org/videos/nasa-volcanic-eruptions/>

¹³² https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Very-High-Resolution_Radiometer

График показывает годовую сумму дней, в течение которых на всей планете наблюдалась вулканическая изверженная активность, согласно данным Global Volcanism Program (GVP) с 1970 по 2024 год. С середины 1970-х годов заметен долгосрочный рост, который, однако, состоит из нескольких резких скачков, после которых активность стабилизируется на более высоком уровне. Важно различать артефакты мониторинга и вероятные реальные эпизоды повышенной глобальной активности.

Первый выраженный рост в 1973–1974 годах происходит ещё до эпохи современного спутникового мониторинга. В этот период база данных GVP уже систематически собирала глобальную информацию об извержениях через наземные обсерватории и отчёты, но без единого дистанционного контроля. Этот скачок поэтому нельзя объяснить техническим улучшением детекции и он, скорее, отражает действительно высокий уровень одновременно происходящих извержений на нескольких вулканах.

Аналогично, подъёмы в 2005–2007 годах, 2015 году и в 2018–2019 годах происходят уже в период, когда глобальная спутниковая детекция извержений (MODIS, OMI, позднее VIIRS) является достаточно точной — на уровне ± 1 дня¹³³. В эти годы объяснение, что речь идёт лишь об улучшении наблюдений, уже не является релевантным — скачки вверх с высокой вероятностью отражают реальные периоды увеличенного числа одновременно активных вулканов и более продолжительных извержений.

Исключением является 1999 год, где уместна осторожность. Этот рост по времени совпадает с запуском спутника Terra (MODIS), который означал улучшение глобального и систематического мониторинга тепловой активности. Поэтому возможно, что именно в этот момент в данных проявляется сочетание реальной активности и скачкообразного улучшения детекции, особенно в случае удалённых и длительно активных вулканов. Однако после 2000 года кривая ведёт себя более последовательно, и последующие значительные подъёмы уже нельзя просто приписать технологическим изменениям. В целом график указывает на то, что глобальная вулканическая активность развивается не линейно, а эпизодически, причём некоторые из этих эпизодов — особенно после 2005 года — вероятно представляют собой реальное глобальное усиление вулканической деятельности, а не просто более качественное наблюдение одного и того же явления.

¹³³ <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/sensing-remote-volcanoes/>

8. Оценка доступных данных, методик и физических взаимосвязей

Как следует из данной работы, в последние десятилетия в глобальных сейсмологических базах данных наблюдается рост числа зарегистрированных землетрясений средней магнитуды, примерно в диапазоне от $M 4$ до $M 5$.

Какие данные заслуживают наибольшего внимания

С точки зрения интерпретации данных важно сосредоточиться именно на диапазоне магнитуд $M 4,0$ – $M 5,0$. Ведь если бы существовал ранний сигнал глобального изменения сейсмического режима, он, скорее всего, проявился бы именно в этом диапазоне. Речь идет не о микросейсмичности, а о событиях, связанных с реальным высвобождением напряжения в земной коре. В то же время это достаточно многочисленная группа событий, которая позволяет проводить надежное статистическое наблюдение, а также магнитуды, чувствительные к более тонким изменениям поля напряжений и более глубоким геодинамическим процессам. По этой причине глобальные тенденции в диапазоне $M 4$ – $M 5$ после 2000 года можно считать релевантным индикатором – не как доказательство принципиального изменения, а как потенциальный ранний сигнал, заслуживающий систематического внимания.

Региональные аномалии и глубинные процессы

Помимо статистических тенденций важно учитывать и более широкий физический контекст. В последние годы в различных частях мира наблюдается повышенная активность сейсмических роев, например, в таких районах, как Кампи Флегреи или Санторини. В то же время существуют доказательства долгосрочных изменений в магматических системах, а также появляются новые данные о динамике глубинных слоев планеты, включая вариации вращения земного ядра и взаимодействие между ядром и мантией, которые могут проявляться, например, в виде изменений магнитного поля или смещения магнитного полюса. Обсуждаются также возможные импульсы тепла и материала в земной мантии. Эти явления не противоречат современным научным знаниям, однако пока не интегрированы в единую глобальную модель. Поэтому важно различать, что что-то «не существует», и то, что это пока недостаточно изучено или однозначно доказано.

Закон Гутенберга–Рихтера

Интерпретацию тенденций сейсмичности целесообразно рассматривать также в рамках закона Гутенберга–Рихтера, который описывает зависимость между магнитудой землетрясений и их частотой. Этот закон гласит, что с ростом магнитуды количество событий экспоненциально уменьшается — как правило, примерно в десять раз при увеличении магнитуды на одну ступень.

Базовая формулировка

Закон Гутенберга–Рихтера описывает соотношение между магнитудой землетрясений и их числом:

$$\log_{10} N = a - bM$$

где:

N = число землетрясений с магнитудой $\geq M$,

a = сейсмическая активность области (общая «продуктивность»),

$b \approx 1$ (обычно в пределах 0,8–1,2) — соотношение между малыми и крупными событиями.

Практическое значение: при увеличении магнитуды на 1 число землетрясений уменьшается примерно в 10 раз.

Почему это потенциально тревожно

Если верно, что число землетрясений $M \geq 4$ глобально и реально растёт и параметр b остаётся стабильным, тогда в более долгосрочной перспективе неизбежно должен увеличиваться и число $M \geq 5$, затем $M \geq 6$ и в конечном итоге $M \geq 7$. Иными словами, крупные землетрясения не могут «отсутствовать вечно», если система действительно становится более активной на низких магнитудах.

С учетом современного уровня знаний можно сформулировать несколько осторожных выводов. Появляется все больше признаков, которые невозможно просто объяснить каким-то одним фактором, особенно если одновременно учитывать статистические тенденции в средних магнитудах, региональные аномалии и данные о глубоких геодинамических процессах. Региональные и внутрипланетные процессы указывают на то, что сейсмичность может иметь и другие триггеры, помимо движения литосферных плит. Диапазон магнитуд $M \geq 4$ – $M \geq 5$ представляет собой релевантный уровень, на котором возможные глобальные изменения могут проявиться в первую очередь.

Сегодня научно некорректно игнорировать одновременное наличие статистических трендов в средних магнитудах, региональных сейсмических роев и глубинных геодинамических изменений. Речь идёт о ситуации, которую лучше всего описать как предпарадигматическую фазу: нечто, что ещё не стало консенсусом, но уже не может быть списано на случайность без дальнейшего исследования.

9. Ограничения чисто тектонического толкования и необходимость более широкого контекста

Проведённый до настоящего момента анализ был сосредоточен на развитии сейсмической и вулканической активности на глобальном и региональном уровнях с акцентом на сопоставление временных трендов в рамках методически сопоставимых наборов данных. Такой подход позволяет выявлять аномалии и изменения в поведении отдельных систем, однако одновременно неизбежно сталкивается с пределами чисто локального или регионального толкования.

Хотя плитная тектоника является устоявшейся и успешной концептуальной основой для объяснения пространственного распределения землетрясений и вулканов, само по себе существование тектонических границ ещё не объясняет временную синхронизацию повышенной активности в нескольких, взаимно удалённых регионах. Точно так же она не объясняет, почему в определённые периоды наблюдается одновременный рост как сейсмической, так и вулканической активности, включая повышенную частоту сейсмических роев и изменения в поведении магматических систем.

Эти наблюдения сами по себе не являются доказательством существования глобального управляющего механизма, однако они создают обоснованное пространство для вопроса о том, не является ли повышенная сейсмическая и вулканическая активность проявлением более широкого планетарного контекста, в рамках которого локальные тектонические процессы реагируют на более медленные, более глубокие и более глобальные изменения в динамике Земли.

Целью следующей главы поэтому не является замена существующих тектонических моделей, а расширение аналитического подхода за счёт дополнительных глобальных параметров, которые могут — прямо или косвенно — быть связаны с наблюдаемыми явлениями. В этом контексте релевантными представляются вопросы, касающиеся долгосрочных изменений вращения Земли, динамики системы ядро–мантия, эволюции геомагнитного поля и движения северного магнитного полюса, которые в следующей главе будут рассмотрены как возможные проявления более глубокой динамической реорганизации планеты.

10. Другие глобальные геодинамические изменения системы Земли

Изменения вращения Земли и длины суток (LOD)

Длина суток (LOD) представляет собой чувствительный параметр вращения Земли, который систематически мониторируется Международной службой вращения Земли и систем отсчёта (IERS) с начала 1960-х годов. Официальные графики IERS показывают, что вращение Земли не является постоянным, а демонстрирует как краткосрочные, так и среднесрочные отклонения от эталонного значения 86 400 секунд (Рис. 73).

Примерно с 2020 года неоднократно фиксировались дни короче средней продолжительности дня на единицы миллисекунд. Современные измерения, основанные на атомных часах, подтверждают, что в последние годы произошла серия рекордно коротких суток, причём некоторые из них относятся к самым коротким за всю историю точных измерений вращения Земли. Этот феномен примечателен прежде всего тем, что долгосрочный геологический тренд вращения Земли является противоположным — постепенным замедлением, обусловленным приливным воздействием Луны.¹³⁴

Внезапное и повторяющееся ускорение вращения Земли в контексте этого долгосрочного, физически хорошо обоснованного тренда замедления указывает на действие дополнительной энергии или импульса в рамках земной системы. Такое поведение нельзя объяснить как случайную флуктуацию вокруг состояния равновесия, а скорее как проявление динамических процессов, которые временно изменяют распределение момента импульса между отдельными компонентами планеты. Ускорение вращения таким образом указывает на активный обмен энергией между ядром, мантией, океанами и атмосферой, а также, возможно, на влияние более глубоких внутрипланетарных механизмов, нарушающих ожидаемый тренд постепенного замедления.

Эти наблюдения подчёркивают, что вращение Земли является высокодинамичным параметром и может служить чувствительным индикатором протекающих глубинных геофизических процессов. Изменения LOD тем самым приобретают значение не только как технически измеряемый показатель, но и как часть более широкой картины современной энергетической и динамической трансформации земной системы.

134

<https://www.forbes.com/sites/jamiecartereurope/2022/07/28/earth-is-suddenly-spinning-faster-why-our-planet-just-recorded-its-shortest-day-since-records-began/>

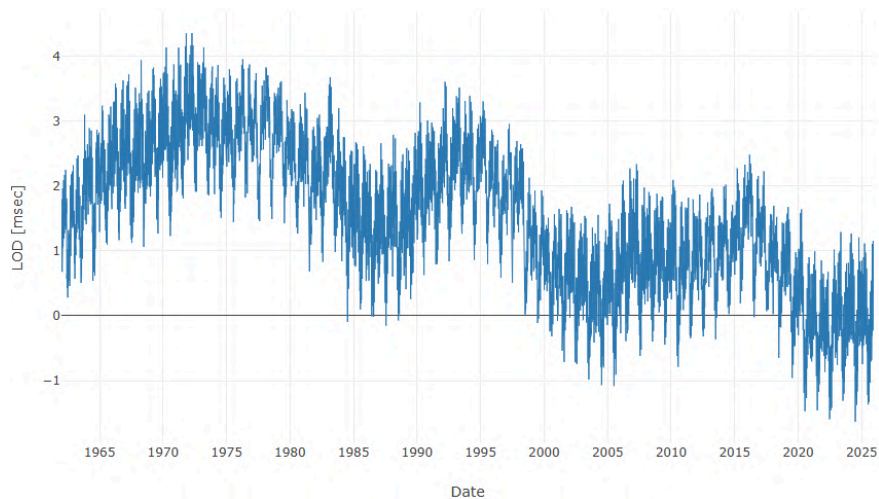


Рис. 73: Изменение длины суток в миллисекундах, источник:
https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

Динамика ядро–мантия и её долгосрочные изменения

Глубинная геодинамика Земли формируется сложным взаимодействием между её внутренними слоями, прежде всего между твёрдым внутренним ядром, жидким внешним ядром и мантией. Эти слои не образуют жёсткую систему, а динамически взаимосвязаны посредством гравитационных, электромагнитных и механических связей. Одним из ключевых наблюдаемых явлений последних лет являются вариации относительного вращения внутреннего ядра Земли по отношению к мантии и поверхности планеты, подтверждённые современной сейсмологической аналитикой повторяющихся сейсмических сигналов.

Недавние исследования, основанные на долгосрочных сейсмических данных, предоставили убедительные доказательства того, что внутреннее ядро Земли в прошлом вращалось немного быстрее, чем остальная часть планеты (так называемая суперротация), однако в последние десятилетия произошла заметная смена этого тренда. Анализы указывают на то, что примерно в течение последнего десятилетия относительное вращение внутреннего ядра замедлилось, что свидетельствует об изменениях в механической и электромагнитной связи между ядром и окружающими его слоями.¹³⁵

Эти изменения тесно связаны с динамикой жидкого внешнего ядра, которое играет ключевую роль в передаче момента импульса между отдельными слоями Земли и одновременно является областью генерации геомагнитного поля посредством геодинамо.

Анализ магнитных данных высокого разрешения, полученных в рамках спутниковой миссии Swarm Европейского космического агентства, выявил существование узкого и значительно усиленного потока жидкого железа во внешнем ядре, локализованного под северными высокими широтами. Этот поток, часто обозначаемый как «core flow jet», ускорился в период 2000–2016 годов примерно в три раза, при этом его скорость достигала значений порядка 40 км в год (Рис. 74). Для сравнения, типичные крупномасштабные течения во внешнем ядре имеют скорость порядка всего 10–20 км в год. Наблюдаемый поток, таким образом, является не только значительно более быстрым, чем обычные течения, но и представляет собой локализованную и временно динамичную структуру, которая развивалась в течение нескольких десятилетий — что

135

<https://www.natureworldnews.com/articles/62027/20240617/earths-rotation-confirmed-slowed-down-inner-core-appears-reversing-backtracking.htm>

с точки зрения глубинной геодинамики Земли является исключительно коротким временным интервалом.¹³⁶

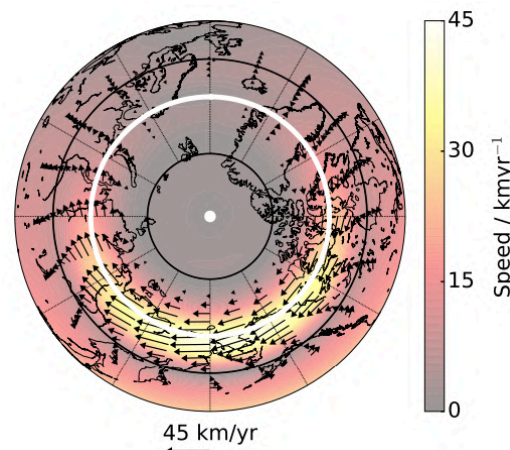


Рис. 74: Изменение скорости движения жидкого металла в ядре, ответственного за генерацию магнитного поля по наблюдениям со спутников Swarm, источник: <https://www.nature.com/articles/ngeo2859>

Эти спутниковые наблюдения предоставляют независимое доказательство протекающих динамических процессов во внешнем ядре, которые имеют как пространственную, так и временную структуру и развиваются в масштабах от лет до десятилетий. В сочетании с сейсмологическими доказательствами изменения вращения внутреннего ядра они формируют согласованную картину Земли как системы, в которой глубинные процессы претерпевают измеримые изменения в относительно короткие временные интервалы с точки зрения геофизики.

Существуют веские указания на то, что все эти изменения в поверхностных явлениях, таких как сейсмичность или вулканизм, могут быть проявлением более глубокой динамической реорганизации планеты, полный масштаб которой ещё не до конца понят. Этот подход создаёт легитимную основу для дальнейшего изучения более широких планетарных взаимосвязей.

Движение северного магнитного полюса

Северный магнитный полюс не совпадает с географическим северным полюсом. Географический полюс — это положение на поверхности Земли, определяемое осью вращения. В отличие от него, магнитный полюс представляет собой точку, в которой магнитные силовые линии выходят из поверхности перпендикулярно, и он изменяется во времени, поскольку формируется движением проводящего жидкого железа и никеля во внешнем ядре Земли.

Исторически северный магнитный полюс медленно перемещался по Канадской Арктике, однако с середины XX века это движение значительно ускорилось. До 1990 года он смещался лишь на несколько десятков километров в год (примерно 10–15 км/год), но с 1990-х годов его скорость возросла до десятков километров в год. В 2000-е годы средняя скорость достигала около 50–60 км/год, что представляет собой резкое ускорение по сравнению с предыдущими десятилетиями, причём направление движения сместилось от Канады в сторону Сибири. В 2019 году это

¹³⁶ <https://www.nature.com/articles/ngeo2859>
https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/108112/1/accepted_version.pdf

движение стало настолько быстрым, что модель геомагнитного поля World Magnetic Model (WMM) пришлось обновить на год раньше запланированного срока, поскольку прежние прогнозы перестали быть достаточно точными для навигационных систем.¹³⁷

В исследовании, опубликованном 31 января 2020 года в блоге *Graphically Speaking*, автор Роберт Эллисон (PhD) из Университета штата Северная Каролина проанализировал данные Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA), касающиеся положения северного магнитного полюса (Рис. 75 и 76 слева). NOAA собирает эти данные в виде координат северного магнитного полюса на основе моделей International Geomagnetic Reference Field (IGRF) и долгосрочных измерений, отслеживающих ежегодные изменения положения полюса.

Эллисон использовал эти данные для расчёта годовой траектории северного магнитного полюса и пришёл к выводу, что в 2019 году скорость его смещения заметно возросла по сравнению с предыдущим трендом. Согласно его анализу, полюс перемещался примерно на 25,3 мили в год (40,7 км/год) в предыдущий период, а в 2019 году это смещение увеличилось примерно до 48,3 мили в год (77,7 км/год).

Этот драматический рост скорости был не просто визуальной курьёзностью, но имел и практические последствия для геофизического моделирования и навигационных систем, поскольку World Magnetic Model (WMM) — глобальная модель магнитного поля, используемая в навигации, — была вынужденно обновлена раньше ожидаемого срока из-за быстрых изменений положения магнитного полюса¹³⁸, обусловленных изменениями в динамике геомагнитного поля в жидком внешнем ядре планеты¹³⁹. В этом же году была зафиксирована и самая высокая вулканическая активность на планете, как показано на графике выше в данной работе. В 2019 году вулкан Стромболи пережил один из самых мощных эруптивных кризисов за последние сто лет¹⁴⁰. Два пароксизмальных взрыва прервали «нормальную» умеренную взрывную активность.

В 2019 году существенные изменения начались и в недрах кальдеры Кампи-Флегреи. Измерения показали, что горячие газы и магма начали перемещаться вверх, нарушая обычную циркуляцию горячих подземных флюидов. Иными словами, внутренняя «трубопроводная система» вулкана стала вести себя иначе, чем ранее.¹⁴¹

В 2019 году также был зафиксирован значительный рой землетрясений на супервулкане Таупо (Новая Зеландия). Учёные после анализа землетрясений и деформаций поверхности указали, что сейсмическая активность была вызвана новым притоком магмы в магматический резервуар.¹⁴²

¹³⁷

<https://www.smithsonianmag.com/smart-news/earths-magnetic-north-pole-is-shifting-toward-siberia-and-raising-questions-about-unusual-movement-180985892/>

¹³⁸ <https://www.ncei.noaa.gov/news/world-magnetic-model-out-cycle-release>

¹³⁹

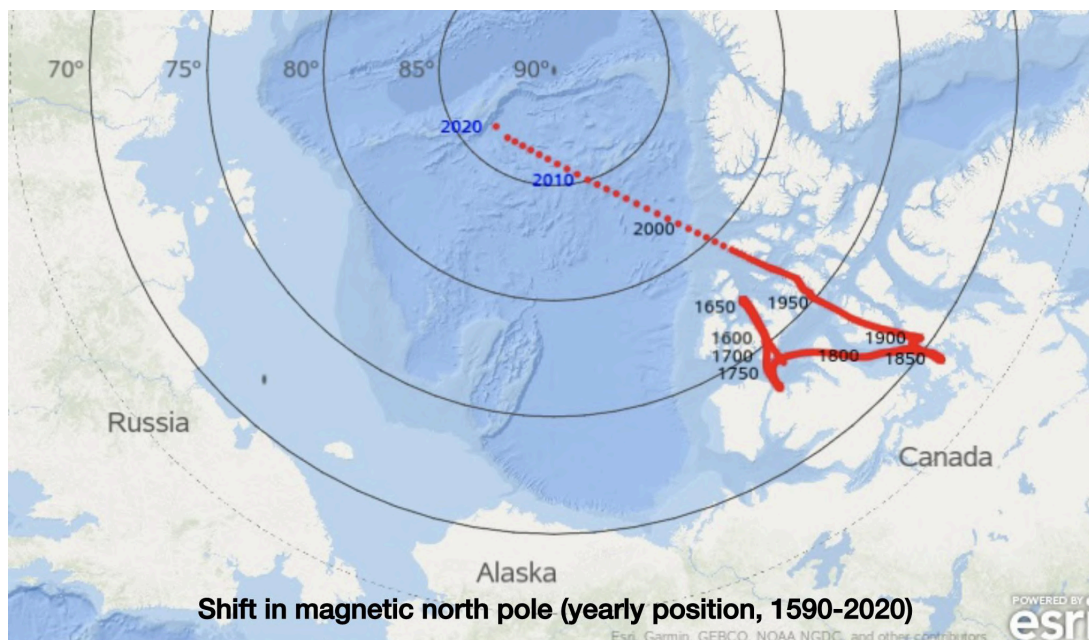
<https://www.npr.org/2019/02/04/691471616/as-magnetic-north-pole-zooms-toward-siberia-scientists-update-world-magnetic-mod>

¹⁴⁰ <https://www.nature.com/articles/s41467-021-24420-1>

¹⁴¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X24001778>

¹⁴² <https://earthsky.org/earth/taupo-supervolcano-needs-monitoring/>

<https://www.geonet.org.nz/vabs/6WkpJjHluMfBLGRAymiQjX>



Data source: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/GeomagneticPoles.shtml>

Рис. 75: Движение северного магнитного полюса; на карте видно выраженное ускорение полюса в 2019 году, источник: <https://blogs.sas.com/content/graphicallspeaking/2020/01/31/magnetic-north-moved-50-miles-last-year-lets-map-it/>

Сравнение исторических расчётов скорости смещения северного магнитного полюса, выполненных Робертом Эллисоном на основе годовых положений, опубликованных NOAA в 2020 году, с текущими официальными данными NOAA (2026) показывает расхождения в приводимых значениях (Рис. 76). В 2015–2019 годах почти все скорости, рассчитанные по более новым данным NOAA, выше значений, вычисленных Эллисоном, при этом различия составляют примерно от 2 до 9 км в год.

Shift in magnetic north pole (yearly position)			
Year	Latitude (degrees)	Longitude (degrees east)	Distance from previous year (miles)
2020	86.502	164.036	48.3
2019	86.448	175.346	25.3
2018	86.471	-178.755	26.4
2017	86.455	-172.587	27.6
2016	86.395	-166.290	28.7
2015	86.289	-160.025	29.8

199.659	86.305	2015.000
192.206	86.467	2016.000
184.522	86.562	2017.000
176.901	86.598	2018.000
169.615	86.568	2019.000
162.867	86.494	2020.000
156.786	86.400	2021.000
151.272	86.275	2022.000
146.334	86.126	2023.000
141.945	85.958	2024.000
138.057	85.778	2025.000

Рис. 76: Слева: современные данные о положении северного магнитного полюса (2026), источник: <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy>

Справа: данные о положении северного магнитного полюса на той же странице, доступные в 2020 году, источник: https://sascommunities.github.io/graphics-programming/robert/magnetic_north_pole.htm

Сравнение скорости смещения северного магнитного полюса (2015–2020)

Год	Allison — расчёт по положениям NOAA (км/год)	Современные данные NOAA (км/год)	Разница (км)
2015	47,9	50,4	+2,5
2016	46,2	55,2	+9,0
2017	44,4	53,0	+8,6
2018	42,5	50,7	+8,2
2019	40,7	48,4	+7,7
2020	77,7	46,1	-31,6

Наиболее выраженное расхождение наблюдается в 2020 году, когда расчёт Эллисона указывает на межгодовое смещение порядка 77,7 км, тогда как современные данные NOAA приводят значение около 46,1 км. Таким образом, разница превышает 30 км.

В 2020 году модель IGRF была обновлена уже во второй раз за короткий промежуток времени (впервые — в конце 2019 года), и это обновление остаётся заметным и на момент данной аналитики. Геофизики, создающие глобальные математические модели магнитного поля Земли, распределили резкое изменение более плавно во времени: траектория была «выпрямлена», а межгодовые скачки уменьшены.

Несмотря на эти различия, оба подхода последовательно показывают, что динамика северного магнитного полюса с 1990-х годов претерпела существенные изменения, с периодом ускоренного движения во втором десятилетии XXI века. Эти наблюдения указывают на то, что процессы, протекающие в земном ядре и управляющие эволюцией геомагнитного поля, демонстрируют значимые изменения.

Это движение является следствием изменений в геодинамике Земли — прежде всего изменений в течениях жидкого металла во внешнем ядре, где генерируется магнитное поле. Изменения напряжённости магнитного поля под различными регионами (например, ослабление над Канадой и усиление в районе Сибири) могут «выталкивать» магнитный полюс в сторону Сибири.

Эволюция геомагнитного поля и его ослабление

Геомагнитное поле Земли представляет собой ключевой глобальный защитный механизм, который защищает планету от заряженных частиц солнечного ветра и космического излучения (Рис. 77). Оно генерируется движением электрически проводящего жидкого металла во внешнем ядре Земли, и его характеристики естественным образом изменяются со временем. Однако долгосрочные измерения показывают, что за последние два столетия произошло глобальное ослабление общей интенсивности геомагнитного поля примерно на 10–15 %, что представляет собой значительное изменение в масштабах геологического времени.

Интересным аспектом является неконсистентность значений, которые в разные периоды сообщались общественности профессиональным сообществом. Например, в 2004 году статья в

National Geographic указывала, что общее магнитное поле Земли ослабло примерно на 10 % с начала систематических измерений¹⁴³. Однако после запуска спутниковой миссии Swarm Европейского космического агентства в 2013 году несколько источников, ссылавшихся на тогдашние новейшие данные ESA, говорили об ослаблении уже до 15 % за последние 200 лет¹⁴⁴. На официальных страницах ESA до сих пор присутствует заявление, опубликованное в 2021 году, согласно которому общий магнитный защитный щит Земли ослаб на целых 15 % всего за 150 лет¹⁴⁵. Эти 15 % уже относятся не только к силе, но и к защитной функции магнитного поля Земли. При этом учитывается не только величина поля, но и его геометрия и конфигурация, которые определяют, насколько хорошо поле защищает планету, то есть региональные слабые места, изменения в магнитосфере и магнитопаузе (на каком расстоянии от Земли простирается поле и насколько эффективно оно отклоняет солнечный ветер).

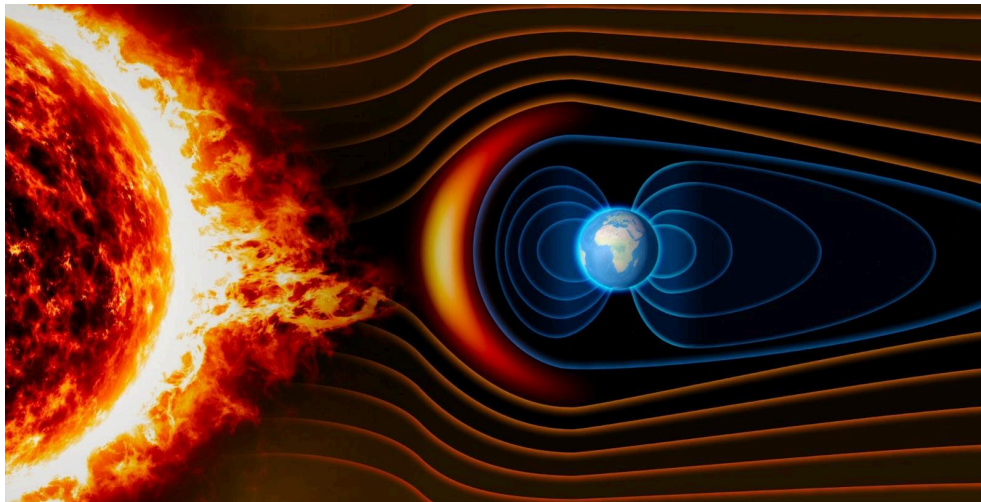


Рис. 77: Защитный магнитный щит нашей планеты, источник изображения:

<https://reasons.org/explore/blogs/todays-new-reason-to-believe/earths-magnetosphere-appears-designed-for-habitability>

В настоящее время в популяризаторских материалах чаще всего указывается значение ослабления магнитного поля в глобальном среднем всего на уровне 9 %. Эти данные обрабатываются моделью IGRF, которая представляет собой математическую модель основной составляющей поля (абстрактное и упрощённое представление поля) и не отражает всех региональных слабых мест. Таким образом:

- 9 % говорит об ослаблении магнитного поля как физической величины, то есть об ослаблении основной дипольной составляющей;
- 15 % говорит об ослаблении защитного эффекта поля (щита).

Парадокс, который здесь является ключевым (и часто упускается из виду): диполь ослабевает медленнее (IGRF ~10 %), но защитная способность поля ослабевает быстрее (ESA ~15 %), поскольку магнитный щит не пропорционален только величине диполя, но также его геометрии, высоте магнитопаузы и региональным «дырам» в поле. Иными словами, меньшее изменение диполя может вызвать большее изменение защитного эффекта.

¹⁴³ <https://www.nationalgeographic.com/science/article/earths-magnetic-field-is-fading>

¹⁴⁴ <https://www.pbs.org/newshour/nation/are-the-earths-poles-about-the-flip>

<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2545465/Forget-global-warming-worry-MAGNETOSPHERE-Earth-s-magnetic-field-collapsing-affect-climate-wipe-power-grids.htm>

¹⁴⁵ https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm/Our_protective_shield

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/08/Our_protective_shield

«Учёные уже знают, что магнитный север смещается. Раз в несколько сотен тысяч лет магнитные полюса меняются местами так, что компас указывает на юг вместо севера. Хотя изменения силы магнитного поля являются частью этого обычного цикла обращения полюсов, данные миссии Swarm показали, что поле начинает ослабевать быстрее, чем в прошлом. Ранее исследователи оценивали, что поле ослабевает примерно на 5 процентов за столетие, однако новые данные показали, что на самом деле поле ослабевает на 5 процентов за десятилетие, то есть в десять раз быстрее, чем предполагалось. Поэтому новые данные указывают на то, что вместо полного обращения примерно через 2 000 лет, как ожидалось, это может произойти раньше».
(Live Science¹⁴⁶)

Некоторые интерпретации спутниковых измерений указывают на то, что текущие изменения геомагнитного поля могут предвещать приближающийся разворот магнитных полюсов. Кроме того, сами геомагнитные отклонения уже сопровождаются заметным ослаблением магнитного поля Земли со всеми вытекающими из этого последствиями для биосферы. Данные миссий, таких как Swarm, показывают, что ослабление магнитного поля, которое защищает Землю от опасного излучения, происходит быстрее, чем предполагали более ранние модели: поле ослабевает быстрее, чем десятикратная оценка прошлого столетия, и поэтому следующий разворот — при котором северный и южный полюса поменяются местами — может произойти раньше, чем ожидалось первоначально.¹⁴⁷

Помимо глобального ослабления, внимание также сосредоточено на региональных аномалиях геомагнитного поля, прежде всего на Южно-Атлантической аномалии (South Atlantic Anomaly – SAA), где интенсивность поля значительно ниже глобального среднего значения (ослабление на 20–25 % за последние 200 лет¹⁴⁸). Эта область в последние десятилетия расширяется и демонстрирует динамические изменения, которые являются предметом интенсивных исследований, поскольку имеют практические последствия для спутниковых систем и космической техники.

Помимо Южно-Атлантической аномалии, в последние годы всё больше внимания уделяется и региональным изменениям геомагнитного поля в северном полушарии, особенно в районах Канады и Сибири. Уже в 2019 году анализы, основанные на спутниковых и наземных измерениях, указали на ускоренное смещение северного магнитного полюса из канадской Арктики в сторону Сибири. Этот сдвиг интерпретируется как проявление дисбаланса в течениях жидкого железа во внешнем ядре, где изменяется относительное влияние основных магнитных «лепестков» под Канадой и Сибирью.¹⁴⁹

Более новые исследования 2024–2025 годов, основанные преимущественно на данных спутниковой миссии Swarm, показывают, что эти изменения касаются не только положения магнитного полюса, но сопровождаются также локальными ослаблениями и реорганизацией интенсивности магнитного поля в высоких широтах северного полушария. Исследования указывают на формирование и усиление обширной области пониженной интенсивности поля, которая простирается от северной Канады через Арктику в направлении северной Сибири. Эту «слабую зону» нельзя напрямую сравнивать с Южно-Атлантической аномалией с точки зрения

¹⁴⁶ <https://www.livescience.com/46694-magnetic-field-weakens.html>

¹⁴⁷ <https://www.scientificamerican.com/article/earth-s-magnetic-field-flip-could-happen-sooner-than-expected/>
<https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-5334421/Earths-magnetic-poles-signs-FLIP.html#ixzz55tuzOSAx>

¹⁴⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/South_Atlantic_Anomaly

¹⁴⁹ <https://www.livescience.com/magnetic-north-pole-to-siberia.html>

абсолютной величины ослабления, однако её рост и пространственная непрерывность с геофизической точки зрения являются примечательными.¹⁵⁰

Согласно интерпретациям авторов, речь идёт о проявлении продолжающейся реорганизации течений во внешнем ядре, где изменяется распределение магнитного потока на границе ядра и мантии. Эти процессы могут протекать параллельно с глобальным ослаблением поля, но при этом формировать ярко выраженную асимметричную картину региональных аномалий, в которой северное и южное полушария демонстрируют различную динамику.

Эти региональные наблюдения в Канаде и Сибири дополняют образ Земли как планеты, геомагнитное поле которой изменяется не однородно, а посредством локальных усилений, ослаблений и перераспределений магнитных структур, тесно связанных с динамикой жидкого внешнего ядра. В сочетании с глобальным ослаблением поля, Южно-Атлантической аномалией и изменениями вращения внутреннего ядра они формируют согласованную, хотя и сложную картину происходящих глубинных процессов, полный смысл которых всё ещё постепенно раскрывается.

Одним из косвенных, но весьма показательных индикаторов постепенного ослабления магнитного поля Земли является увеличение частоты появления полярных сияний на необычно низких широтах, ближе к экватору, а также изменение их характера и интенсивности¹⁵¹. Если в прошлом в Центральной Европе наблюдались преимущественно лишь слабые красные отблески, то сегодня всё чаще фиксируются и зелёные, и розовые полярные сияния¹⁵². Красные полярные сияния возникают в очень высоких слоях атмосферы, примерно выше 200 км, где возбуждённые атомы кислорода излучают красный свет. Зелёные полярные сияния формируются на более низких высотах около 100–200 км, где энергетические частицы взаимодействуют с атомарным кислородом, тогда как розовые и фиолетовые оттенки возникают ещё ниже, как правило, ниже границы 100 км, при возбуждении молекулярного азота.¹⁵³

Тот факт, что сегодня мы наблюдаем зелёные и розовые полярные сияния на широтах, где ранее были редкостью даже слабые красные проявления, причём даже во время геомагнитных бурь меньшей интенсивности, указывает на то, что заряженные частицы Солнца проникают в атмосферу глубже, чем в прошлом. Этот сдвиг свидетельствует о снижении защитной способности магнитного поля Земли, которое уже не в состоянии столь эффективно отклонять энергетические частицы, тем самым создавая условия для более частого, более масштабного и цветново насыщенного проявления полярных сияний за пределами типичных авроральных зон.

¹⁵⁰

https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm/Swarm_reveals_growing_weak_spot_in_Earth_s_magnetic_field

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031920125001414?via%3Dihub>

<https://www.livescience.com/planet-earth/a-massive-weak-spot-in-earths-magnetic-field-is-growing-scientists-disc-over>

¹⁵¹

<https://science.nasa.gov/science-research/heliophysics/how-nasa-tracked-the-most-intense-solar-storm-in-decades/>

¹⁵²

<https://www.imeteo.sk/spravy/a-uz-fakt-nieco-nie-je-v-poriadku-polarna-ziara-ziskala-zelene-farby-co-je-u-nas-vzcnostou>

¹⁵³ <https://science.nasa.gov/sun/auroras/>

Рост наблюдений красных полярных сияний в необычно низких географических широтах

График на рис. 78 показывает количество ночей с наблюдаемым полярным сиянием в Центральной Европе, в Чешской Республике, в течение отдельных солнечных циклов (7–25-й цикл, годы 1830–2025). Данные основаны на архиве проверенных наблюдений¹⁵⁴ и выражают число ночей, в которые наблюдалось полярное сияние, — а не количество фотографий или сообщений в рамках одной ночи. Для более ранних исторических периодов источниками являются записи в хрониках различных населённых пунктов Чешской Республики или публикации в старых научных журналах.

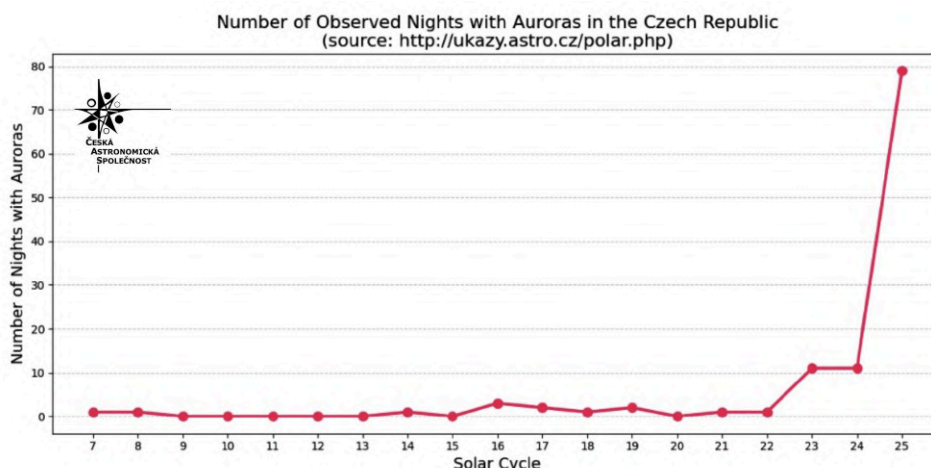


Рис. 78: Количество ночей с наблюдениями полярных сияний в Центральной Европе, Чешская Республика, источник данных: <http://ukazky.astro.cz/polar.php>

Резкий рост в 25-м солнечном цикле невозможно объяснить лишь улучшением техники или «большим количеством мобильных телефонов». Сопоставимые наблюдательные возможности существовали уже в предыдущих циклах — 24-м и 23-м (примерно с 2000 года), — однако число зафиксированных наблюдений тогда достигало лишь около 10 полярных сияний за цикл по сравнению почти с 80 в текущем цикле, который ещё не завершён. При этом доступные показатели солнечной активности указывают на то, что нынешний цикл физически не является существенно более мощным, чем некоторые циклы XX века (Рис. 79).¹⁵⁵

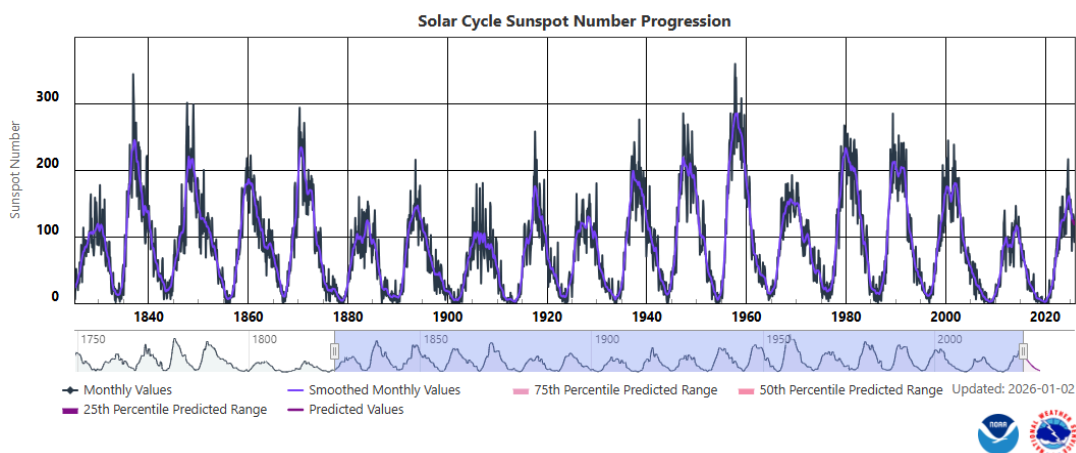


Рис. 79: Сила солнечных циклов (7–25-й цикл), измеренная числом солнечных пятен, источник: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

¹⁵⁴ <http://ukazky.astro.cz/polar.php>

¹⁵⁵ <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>

Важным фактором является также ослабление магнитного поля Земли, которое функционирует как защитный щит от заряженных высокоэнергетических частиц Солнца. Более слабая магнитная защита позволяет этим частицам проникать глубже в атмосферу и в более низкие географические широты, что может приводить к более частому появлению полярных сияний в Центральной Европе — даже без экстремально высокой солнечной активности.

Сравнение значительных геомагнитных бурь по силе (интенсивности) и по распространению полярных сияний

Следующая таблица сравнивает пять значительных геомагнитных событий (Halloween Storms 29–30.10.2003 — G5, Superstorm 20.11.2003 — G5, Mother's Day Storm 10.5.2024 — G5, Cannibal Storm 12.11.2025 — G4 и геомагнитную бурю 19.01.2026 — G4) с точки зрения их интенсивности и прежде всего масштабов распространения полярных сияний в обоих полушариях. Ключевыми физическими параметрами в таблице являются индекс Dst и компонент IMF Bz, которые позволяют объективно сравнить, насколько глубоко в низкие географические широты отдельные события смогли «продавить» авроральный овал.

Ранжирование геомагнитных бурь по масштабам распространения полярных сияний (по географическим широтам):

1. Mother's Day Storm — 10.05.2024 (G5)

Наиболее масштабное событие из всех сравниваемых. Полярные сияния наблюдались исключительно близко к экватору в обоих полушариях — в северном вплоть до Карибского региона (около 18° с. ш.), а в южном — в северной Австралии (около 19° ю. ш.). Распределение было очень сбалансированным между обоими полушариями, что делает это событие глобально наиболее выраженным авроральным явлением.

2. Cannibal Storm — 12.11.2025 (G4)

Несмотря на более низкую категорию бури, полярные сияния проникли очень близко к экватору. В северном полушарии они были зафиксированы вплоть до Мексики (примерно 23° с. ш.), а в южном — в Австралии около 29° ю. ш. По сравнению с историческими бурями, авроры имели более широкий географический охват, чем можно было бы ожидать при такой интенсивности.

3. Halloween Storms — 29–30.10.2003 (G5)

Речь идёт о чрезвычайно мощных геомагнитных бурях, которые произошли последовательно и объединились в одно интенсивное событие, продолжавшееся несколько дней и воздействовавшее на Землю. Они были вызваны двумя очень сильными солнечными вспышками, произошедшими в течение примерно 24 часов. Во время этого известного события авроры проникли глубоко в умеренные широты, однако не так близко к экватору, как при Cannibal Storm. В северном полушарии они были видны вплоть до южных районов США (около 30° с. ш.), в Центральной Европе — вплоть до Каталонии, а в южном полушарии — в Австралии примерно до 31° ю. ш.

4. Геомагнитная буря — 19.01.2026 (G4)

Это событие имело неравномерное развитие. В южном полушарии полярные сияния проникли очень далеко на север — вплоть до северной Австралии (около 20,5° ю. ш.), в то время как в северном полушарии они остались на более высоких широтах, преимущественно над южной Европой и югом США. Следует подчеркнуть, что солнечная вспышка, вызвавшая это событие,

была классифицирована как X1.9, что существенно слабее вспышек, приведших к другим геомагнитным событиям, упомянутым выше.

5. Супербуря — 20.11.2003 (G5)

Хотя это была очень сильная геомагнитная буря, распространение полярных сияний в глобальном масштабе оказалось наименее обширным. В северном полушарии они достигли южных районов США и Европы, однако в южном полушарии оставались преимущественно вблизи Антарктиды и не проникли в низкие географические широты.

Событие	Индекс Dst (нТ)	IMF Bz (мин.)	Полярные сияния в южном полушарии	Ссылка	Полярные сияния в северном полушарии	Ссылка
Штормы Хэллоуина 29–30.10.2003 - G5	-350 нТ	-54 нТ	Австралия вплоть до штата Новый Южный Уэльс (Кунабарабран, 31° ю. ш.)	https://www.sws.bom.gov.au/Educational/1/3/16	Европа вплоть до Австрии, Испании, Каталонии (Ллейда 41,5° с. ш.)	https://spaceweather.com/aurora/gallery_01oct03_page4.html
	-383 нТ	-35,5 нТ			США от Калифорнии до Техаса (Хьюстон 30° с. ш.) и до Флориды	https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/Service%20Assessment%20Sep%2007%202004.pdf
Супершторм 20.11.2003 - G5	-422 нТ	-53 нТ	Не в населённых районах, только вблизи Антарктиды	https://svs.gsfc.nasa.gov/2857/	Европа: Словения, Хорватия вплоть до Греции (Афины 38° с. ш.) , США вплоть до Джорджии (Атланта 34° с. ш.) и до Флориды	https://spaceweather.com/aurora/gallery_01nov03_page3.html
	https://www.spaceweatherlive.com/en/auroral-activity/top-50-geomagnetic-storms/html					
Шторм ко Дню матери 10.05.2024 - G5	-412 нТ	-50 нТ	Обширные авроры Австралии, наблюдавшиеся в Австралии вплоть до северного Квинсленда (Таунсвилл, 19° ю. ш.) , Новой Зеландии, Чили (Магальянес), Аргентине, Уругвае, на юге Бразилии , в Южно-Африканской Республике и Намибии	https://en.wikipedia.org/wiki/May_2024_solar_storms	Авроры видимы в США вплоть до Флорида-Кис, Мексике (полуостров Юкатан), Багамских островов, Ямайки, Пуэрто-Рико (18° с. ш.) , на Гавайях; в Европе на юг вплоть до Португалии, Испании, Сардинии, Алжира, Канарских островов (Ла-Пальма 28° с. ш.) ; в Азии, например, Турция, Индия, Япония, Китай	https://en.wikipedia.org/wiki/May_2024_solar_storms
	https://academic.oup.com/nsr/article/12/10/nwaf307/8220895?login=false					
«Каннибальный шторм» 12.11.2025 - G4	-238 нТ	-49,5 нТ	Обширные авроры Австралии на большей части Австралии и в Новой Зеландии вплоть до Квинсленда (Техас, 29° ю. ш.)	https://www.abc.net.au/news/2025-11-13/aurora-australis-in-photos-november-2025/106003620	Яркие зелёные авроры с красными, фиолетовыми и розовыми оттенками над большей частью США, достигающие Техаса, Джорджии и Флориды (Space Coast 28° с. ш.)	https://www.space.com/stargazing/auroras/severe-geomagnetic-storm-sparks-northern-lights-across-north-america-and-as-far-south-as-mexico-photos
					Мексика (Сакатекас 23° с. ш.)	https://watchers.news/2025/11/12/two-cmes-impact-earth-sparking-g4-severe-geomagnetic-storming-and-aurora-as-far-south-as-mexico/
	Северная Европа вплоть до Австрии, Венгрии	https://phys.org/news/2025-11-solar-storms-northern-unexpected.html				
	Испания (Каталония, Андалусия, Калар Альто 37° с. ш.)	https://www.caha.es/science-mainmenu-95/meteors-and-fireballs/impressive-and-beautiful-aurora-borealis-on-november-12th-2025 https://en.ara.cat/weather/new-historic-opportunity-to-see-the-northern-lights-in-catalonia_1_5559219.html				
19.1.2026 – G4	-119 нТ	-49 нТ	Обширные полярные сияния в Тасмании, Виктории, Южной Австралии, Новом Южном Уэльсе, Западной Австралии и Квинсленде (остров Хэмилтон, 20,5° ю. ш.)	https://www.abc.net.au/news/2026-01-21/spectacular-aurora-australis-seen-across-australia/106251474	Наблюдались над большей частью Европы вплоть до: Франции, Румынии, Швейцарии, Хорватии, Португалии (40° с. ш.) ; США: на юг до Алабамы, Джорджии, Нью-Мексико (Деминг 32° с. ш.) ; Азия: Китай	https://watchers.news/2026/01/20/cme-impact-causes-g4-severe-geomagnetic-storm-amazing-aurora-across-usa-and-europe/
	https://www.spaceweatherlive.com/en/auroral-activity/top-50-geomagnetic-storms/year/2026.html	https://www.spaceweatherlive.com/cs/archiv/2026/01/19/rsqa.html			https://www.space.com/stargazing/auroras/severe-g4-geomagnetic-storm-sparks-jaw-dropping-northern-lights-worldwide-photos	

Экстремальные геомагнитные события, такие как событие Кэррингтона 1859 года (оценочный Dst от -900 нТ¹⁵⁶ до -1750 нТ¹⁵⁷), которое считается самой интенсивной геомагнитной бурей в зафиксированной истории, способны были вызывать полярные сияния вплоть до тропических широт как в северном, так и в южном полушарии. В этом случае, однако, речь шла об исключительной ситуации, когда Землю поразила чрезвычайно мощная солнечная вспышка с оценочной интенсивностью вплоть до класса X50. Именно эта экстремальная энергия Солнца была ключевым фактором, позволившим столь значительное расширение аврорального овала в сторону экватора. Таким образом, это было не обычное явление, а следствие одной из самых сильных солнечных вспышек, когда-либо зарегистрированных.

NASA считает так называемую Mother's Day Storm самой мощной солнечной бурей, поразившей Землю за последние два десятилетия, при этом сопровождающие её полярные сияния относятся к числу самых интенсивных, наблюдавшихся примерно за последние 500 лет¹⁵⁸. Одновременно ряд наблюдений указывает на то, что в настоящее время даже менее энергетические солнечные и геомагнитные события способны вызывать появление полярных сияний в необычно низких географических широтах, ближе к экватору, чем это было принято в прошлом. Этот феномен, который ранее был характерен преимущественно для экстремальных солнечных бурь, указывает на повышенную чувствительность магнитосферы Земли и согласуется с долгосрочным трендом постепенного ослабления геомагнитного поля.

Потепление океанов и изменения в океанических течениях

Беспрецедентное потепление океанов в последние годы

Океаны Земли в последние годы нагреваются темпами, не имеющими аналогов в современной истории измерений. Согласно данным NOAA, Copernicus Marine Service и NASA, глобальные температуры поверхности океанов в 2023–2025 годах достигли исторических максимумов, при этом в течение нескольких месяцев подряд превышались долгосрочные рекорды.

¹⁵⁶ <https://www.usgs.gov/programs/geomagnetism/science/severe-magnetic-storm-january-6-2025>

¹⁵⁷ https://science.nasa.gov/science-research/planetary-science/23jul_superstorm/

¹⁵⁸

<https://science.nasa.gov/science-research/heliophysics/how-nasa-tracked-the-most-intense-solar-storm-in-decades/>

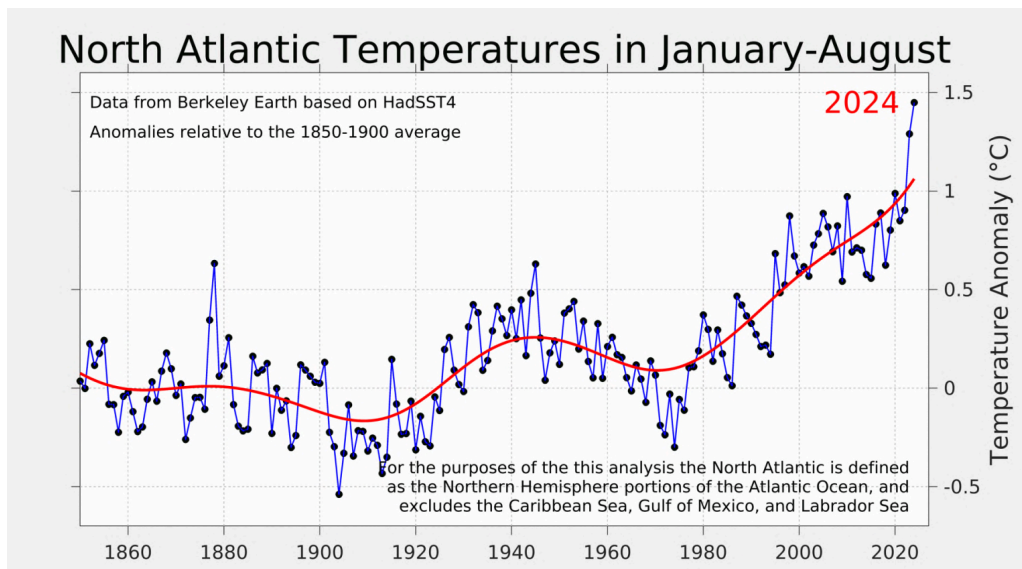


Рис. 80: Температуры в северной части Атлантического океана за период с января по август в 1850–2024 годах, источник: <https://berkeleyearth.org/august-2024-temperature-update/>

Особенно выраженным является потепление Северной Атлантики, где летом 2024 года были зафиксированы аномалии +1 °C до +1,5 °C относительно среднего уровня 1850–1900 годов, что в масштабах океанографии является экстремальным значением (Рис. 80)¹⁵⁹. При этом Северный Атлантический океан играет ключевую роль в глобальной циркуляции океанов и регулировании климата.

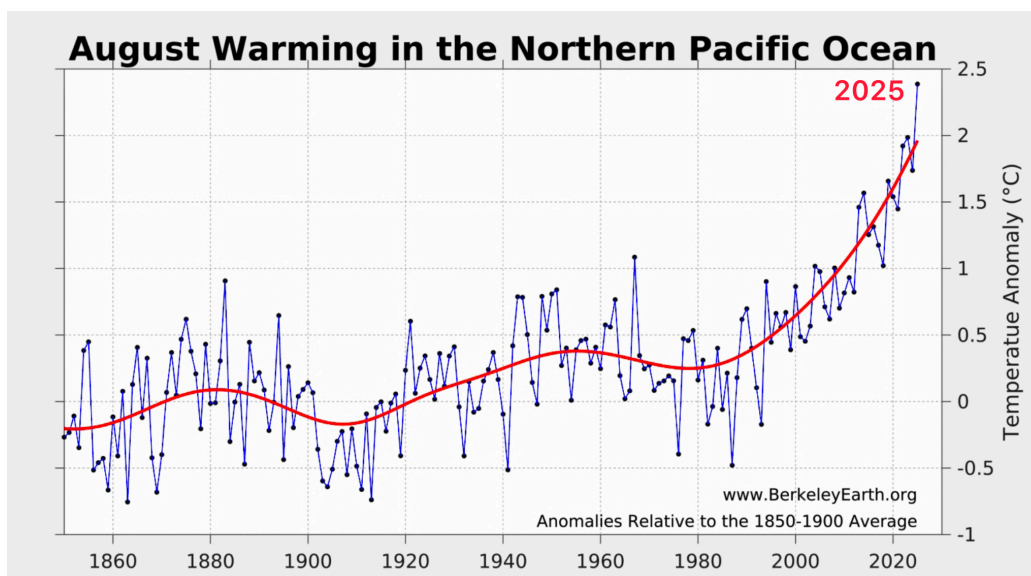


Рис. 81: Температуры в северной части Тихого океана в августе в 1850–2025 годах, источник: <https://berkeleyearth.org/august-2025-temperature-update/>

Температуры в северной части Тихого океана достигали исторических рекордов для любого месяца в первой половине 2025 года (Рис. 81) и демонстрировали температурные аномалии, более характерные для континентальных районов, чем для крупных океанических бассейнов. Это потепление продолжает долгосрочный тренд последних трёх десятилетий, который в

¹⁵⁹ <https://berkeleyearth.org/august-2024-temperature-update/>

последнее время заметно ускорился. Согласно Berkeley Earth, недавнее потепление в Северном Тихом океане происходит быстрее, чем предполагали модели для этого региона.¹⁶⁰

Ряд климатологов также указывает на то, что масштабы потепления океанов в последние годы превзошли не только исторические рекорды, но и ожидания климатических моделей. Учёный NASA Гэвин Шмидт в этой связи отметил, что развитие событий в 2023 году представляло собой не просто продолжение известного тренда, но включало и «дополнительный фактор», вызвавший дополнительное потепление. По его словам, этот дополнительный эффект значительно больше, чем учёные предполагали или пока способны удовлетворительно объяснить.¹⁶¹

Потепление океанов в глубине: менее заметное, но принципиально важное

Особенно тревожным аспектом текущего развития является тот факт, что океан нагревается не только на поверхности, но и на средних и больших глубинах. Исследование, реконструирующее температурное развитие Тихого океана за последние 10 000 лет, показывает, что средние глубины океанов за последние примерно 60 лет нагревались до 15 раз быстрее, чем в предыдущие тысячелетия.¹⁶²

Прямые доказательства глубоководного потепления представило и исследование района у побережья Уругвая, где на глубине около 4,5 км было зафиксировано повышение температуры воды на 0,02–0,04 °С. Хотя такая величина может показаться незначительной, с учётом гигантского объёма глубокого океана речь идёт об огромном количестве накопленного тепла.¹⁶³ Как отметил океанограф Кристофер Майнен:

«Если задуматься об объёме глубокого океана, это колоссальное количество тепла».
(Meinen, 2020¹⁶⁴)

Эти выводы подтверждают, что океан функционирует как массивный тепловой резервуар, в котором даже на первый взгляд небольшие температурные изменения означают существенный энергетический сдвиг в системе Земли.

Влияние потепления на океанические течения

Океанические течения являются результатом сочетания ветра, различий температуры и солёности (плотности воды), вращения Земли и конфигурации океанического дна. Вместе они образуют глобальный «конвейер» (термохалинную циркуляцию), который принципиально влияет на климат планеты.

¹⁶⁰ <https://berkeleyearth.org/august-2025-temperature-update/>

¹⁶¹ <https://phys.org/news/2024-01-driven-mystery-nasa-scientist.html>

¹⁶²

https://www.researchgate.net/publication/258215955_Pacific_Ocean_Heat_Content_During_the_Past_10000_Years

¹⁶³ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2020GL089093>

¹⁶⁴

<https://www.theguardian.com/environment/2020/oct/14/enormous-amount-of-heat-even-deepest-ocean-is-warming-study?ref=marketbulletin-dotcom>

Недавние исследования показывают, что изменения температуры и уровня океана влияют на циркуляцию даже в абиссальных (очень глубоких) слоях океана. Исследование, опубликованное в *Scientific Reports* (2023), показало, что аномалии уровня моря связаны с изменениями циркуляции на глубинах в несколько километров, что подтверждает вертикальную связность океанической системы.¹⁶⁵

С глобальной точки зрения представляется, что большинство океанических течений с 1990-х годов ускоряется — согласно исследованию 2020 года, примерно на 36 % за 30 лет, вероятно в результате энергетического дисбаланса климатической системы и потепления океанов.¹⁶⁶

Гольфстрим и АМОС

Ярким исключением из этого тренда является Атлантическая меридиональная опрокидывающая циркуляция (АМОС), частью которой является Гольфстрим. Он обеспечивает перенос тепла из тропиков в Северную Атлантику и является причиной того, что северо-западная Европа значительно теплее регионов на тех же широтах в Северной Америке.

Ряд исследований указывает на то, что АМОС в последние десятилетия ослабевает и что в 2009–2010 годах произошло её резкое замедление примерно на 30 %, что значительно превысило ожидания моделей¹⁶⁷. Примечательно, что этот период совпадает по времени с выраженной температурной аномалией Северной Атлантики¹⁶⁸, а также с интенсивной сейсмической и вулканической активностью в районе Срединно-Атлантического хребта и Исландии (извержение Эйяфьядлайёкюдля в 2010 году¹⁶⁹).

Медийные сообщения последних лет часто говорят о возможном коллапсе Гольфстрима или АМОС уже в ближайшие десятилетия, некоторые даже упоминают возможность около 2025 года. Такой коллапс имел бы для Европы драматические последствия — резкое похолодание, изменения режимов осадков и расширение арктического влияния к югу.¹⁷⁰

¹⁶⁵ <https://www.nature.com/articles/s41598-023-48074-9>

¹⁶⁶ <https://phys.org/news/2020-02-global-ocean-circulation-1990s.html>

¹⁶⁷

https://www.researchgate.net/publication/262983696_Impact_of_a_30_reduction_in_Atlantic_meridional_overturning_during_2009-2010

¹⁶⁸ <https://www.sciencenews.org/article/north-atlantic-heat-record-sea-surface-temperature>

¹⁶⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/2010_eruptions_of_Eyjafjallaj%C3%B6kull

¹⁷⁰ <https://www.nature.com/articles/s41467-023-39810-w>

<https://www.theguardian.com/environment/2023/jul/25/gulf-stream-could-collapse-as-early-as-2025-study-suggests>

<https://edition.cnn.com/2023/07/25/world/gulf-stream-atlantic-current-collapse-climate-science-intl/index.html>

Роль геотермального тепла

Наряду с влиянием таяния гренландских ледников и притока пресной воды в Северную Атлантику всё чаще обсуждается и роль геотермального тепла океанического дна. Ряд модельных и наблюдательных исследований показывает, что геотермальный нагрев может существенно влиять на глубоководную циркуляцию океана и изменять распределение тепла в океане.¹⁷¹

Хотя большая часть Срединно-Атлантического хребта не находится под детальным мониторингом, существуют свидетельства повышенной гидротермальной и вулканической активности в Северной Атлантике около 2009–2010 годов (например, район Lucky Strike Ridge, Исландия), что могло способствовать формированию аномально тёплого водного «пятна», повлиявшего на динамику Гольфстрима.¹⁷²

Связь между сейсмической активностью и температурными аномалиями океанов

Некоторые исследования указывают на то, что процессы, происходящие глубоко под дном океана, могут быть связаны с тем, что мы впоследствии наблюдаем на поверхности океанов. В частности, речь идет о возможной связи между сейсмической активностью и изменениями температуры поверхности моря (SST – Sea Surface Temperature), которые указывают на более сложную взаимосвязь между литосферой, океаном и атмосферой.

Брюс Лейборн и его коллеги проанализировали сейсмические записи вместе с спутниковыми измерениями температуры океанов и сосредоточили внимание, в частности, на районе Средиземного и Адриатического морей, то есть на тектонически активном регионе границ плит. Они выявили периоды повышенной сейсмической активности, которые проявлялись в виде коротких всплесков (от нескольких дней до нескольких недель), после чего — с задержкой примерно в 1–2 месяца — фиксировался рост температуры поверхности моря. Авторы интерпретируют эти связи как возможное следствие переноса тепла из более глубоких слоев океана к поверхности, потенциально связанного с повышенным геотермальным потоком или гидротермальной активностью.¹⁷³

Определенный тип связи между сейсмичностью и климатом описывает Олег Молчанов, который проанализировал долгосрочные данные за период с 1973 по 2008 год в районе экваториального Тихого океана. Он сосредоточился на сравнении сейсмической активности с температурными аномалиями океана, представленными индексами SST, связанными с ENSO. Он обнаружил схожую периодичность обоих явлений, причем изменения сейсмичности предшествовали температурным аномалиям примерно на 1,5 года.¹⁷⁴

171

https://www.researchgate.net/publication/280930612_Impact_of_the_oceanic_geothermal_heat_flux_on_a_glacial_ocean_state

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2000JC000532>

<https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/29/16/jcli-d-15-0458.1.xml>

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008gl036078>

¹⁷² <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X13002161>

<https://www.plateclimatology.com/gulf-stream-shut-down-caused-by-geological-heat-flow/>

173

<https://www.semanticscholar.org/paper/Earthquakes-Linked-to-2003-European-Heat-Wave%3A-for/33369dc72b64fe006e1deac8d0922ac08ba47687>

¹⁷⁴ <https://nhess.copernicus.org/articles/10/299/2010/nhess-10-299-2010.pdf>

Более подробно взаимосвязь между тектонической активностью и глобальной температурой рассматривает Витерито, который уделяет особое внимание сейсмической активности в районах средоокеанских хребтов (зонах средоокеанского расширения). В своей работе он указывает на значительный рост сейсмической активности в этих районах примерно с 1995 года, когда среднегодовое количество землетрясений магнитудой от 4 до 6 увеличилось с примерно 225 событий (в период 1990–1994 гг.) до более чем 510 событий в год в последующие годы, что представляет собой рост примерно на 127 %. Этот сдвиг к более высокому уровню сейсмичности стабилизировался в течение примерно двух лет и по времени совпадает с серией изменений в климатической системе, включая рост глобальных температур, изменения в термохалинной циркуляции, характеристиках Эль-Ниньо или динамике арктического льда. Витерито интерпретирует эти связи как возможное следствие увеличения поступления тепла в океаны из областей океанических хребтов, которое впоследствии может распространяться посредством океанической циркуляции и влиять на глобальный климат (Рис. 82).¹⁷⁵

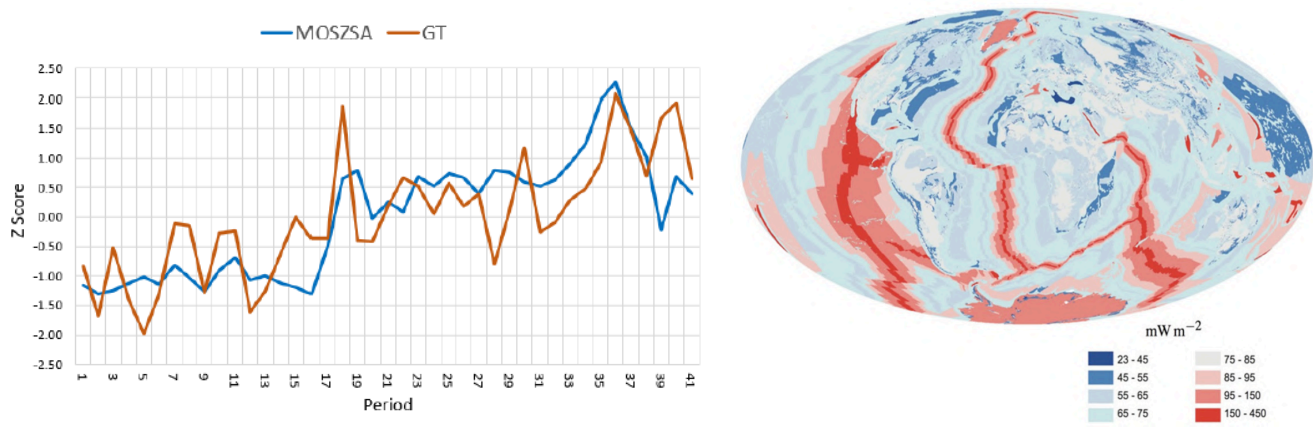


Рис. 82: **Слева:** Современный рост глобальных температур (GT) и сейсмической активности в зоне средоокеанских хребтов (MOSZSA) с 1979 по 2021 год с учётом двухлетней задержки в анализе (т. е. MOSZSA 1979 года сопоставляется с GT 1981 года, MOSZSA 1980 года сопоставляется с GT 1982 года и т. д.), источник:

<https://juniperpublishers.com/ijesnr/IJESNR.MS.ID.556271.php>

Справа: Геотермальный нагрев средоокеанских хребтов, источник:

https://www.researchgate.net/publication/256542901_Earth's_surface_heat

Современные наблюдения потепления океанов — как на поверхности, так и в глубинах — вместе с изменениями океанической циркуляции указывают на то, что океаническая система Земли проходит исключительно динамичный период, сопоставимый с крупными климатическими переходами в прошлом. Хотя прямые причинно-следственные связи между отдельными явлениями (климатические изменения, геотермальные процессы, циркуляция) ещё не полностью выяснены, доступные данные показывают, что речь идёт о глобальной и глубоко взаимосвязанной реорганизации системы океан–климат.

В последний раз Гольфстрим останавливался около 12 000 лет назад, в начале голоцена, когда происходили климатические изменения и температуры резко повышались¹⁷⁶. Не только замедление Гольфстрима, но и другие современные наблюдения, такие как потепление океанов или таяние гренландских ледников¹⁷⁷, указывают на то, что изменения, происходящие сейчас, в таком масштабе в последний раз имели место около 12 000 лет назад.

¹⁷⁵ <https://juniperpublishers.com/ijesnr/IJESNR.MS.ID.556271.php>

¹⁷⁶ <https://www.britannica.com/science/climate-change/Abrupt-climate-changes-in-Earth-history>

¹⁷⁷

<https://www.sciencealert.com/losing-greenland-s-ice-will-raise-seas-higher-than-any-level-seen-in-12-000-years>

11. Повторяющиеся циклические события в истории Земли

История Земли характеризуется повторяющимися циклами климатических и геодинамических изменений, происходящих в масштабах сотен и тысяч лет. Помимо хорошо известных циклов Миланковича, в геологических и палеоклиматических записях были выявлены также выраженные повторяющиеся события, связанные с быстрыми изменениями климата, океанической циркуляции, площади ледников и магнитного поля Земли. Эти явления указывают на то, что климатическая система Земли функционирует в режиме прерывистых, но повторяемых переходов между стабильными и нестабильными состояниями.

В течение последних 130 000 лет неоднократно проявляются циклические события (Рис. 83), при которых сочетаются:

- подповерхностное потепление океанов,
- коллапс или ослабление крупных морских течений,
- массовые выбросы ледников в океан,
- повышенная вулканическая активность,
- колебания магнитного поля Земли.

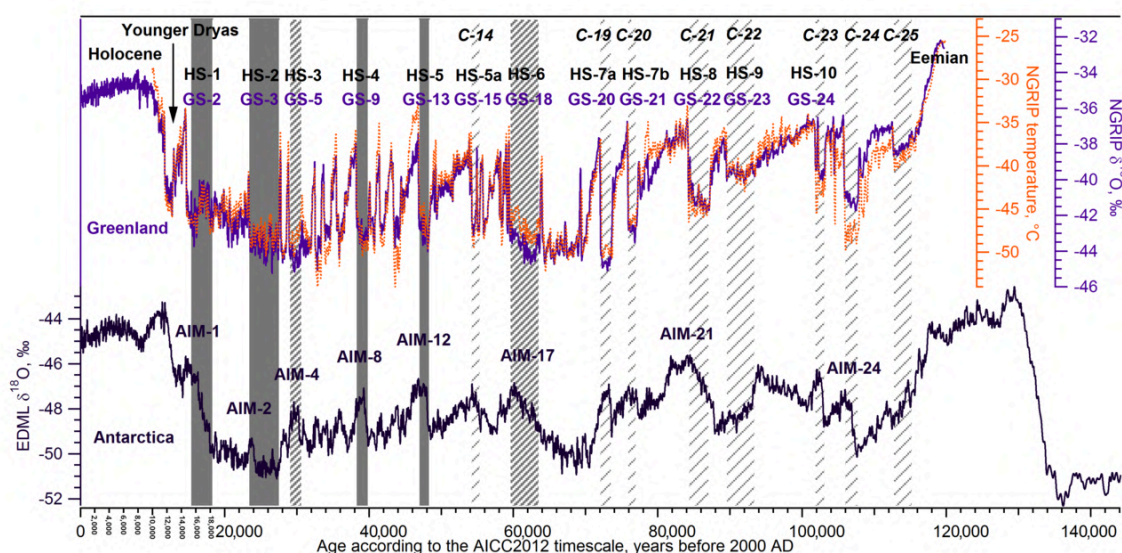


Рис. 83: Хронология климатических событий, важных для последнего ледникового периода (~последних 120 000 лет), зафиксированных в полярных ледяных ядрах, и приблизительное относительное положение событий Хайнриха HS-1 – HS-10, первоначально зафиксированных в ядрах морских осадков северной части Атлантического океана, источник: https://en.wikipedia.org/wiki/Heinrich_event#/media/File:Approximate_chronology_of_Heinrich_events_vs_Dansgaard-Oeschger_events_and_Antarctic_Isotope_Maxima.png

Одним из наиболее выраженных примеров таких циклических процессов являются эпизоды массового высвобождения ледников в северную Атлантику, которые многократно происходили в течение последних ледниковых периодов с приблизительно периодичностью около 10–12 тысяч лет и получили название событий Хайнриха¹⁷⁸. Этим событиям предшествовали подповерхностное потепление океана в субполярных областях северной Атлантики и ослабление крупномасштабной океанической циркуляции (Рис. 84). Тёплые подповерхностные

178

https://www.researchgate.net/publication/223634267-Origin_and_Consequences_of_Cyclic_Ice_Rafting_in_the_Northeast_Atlantic_Ocean_During_the_Past_130000_Years

воды на глубинах сотен метров дестабилизировали ледяные шельфы и ледники «снизу», что приводило к их коллапсу и последующим быстрым климатическим изменениям - даже без выраженного предварительного потепления атмосферы.¹⁷⁹

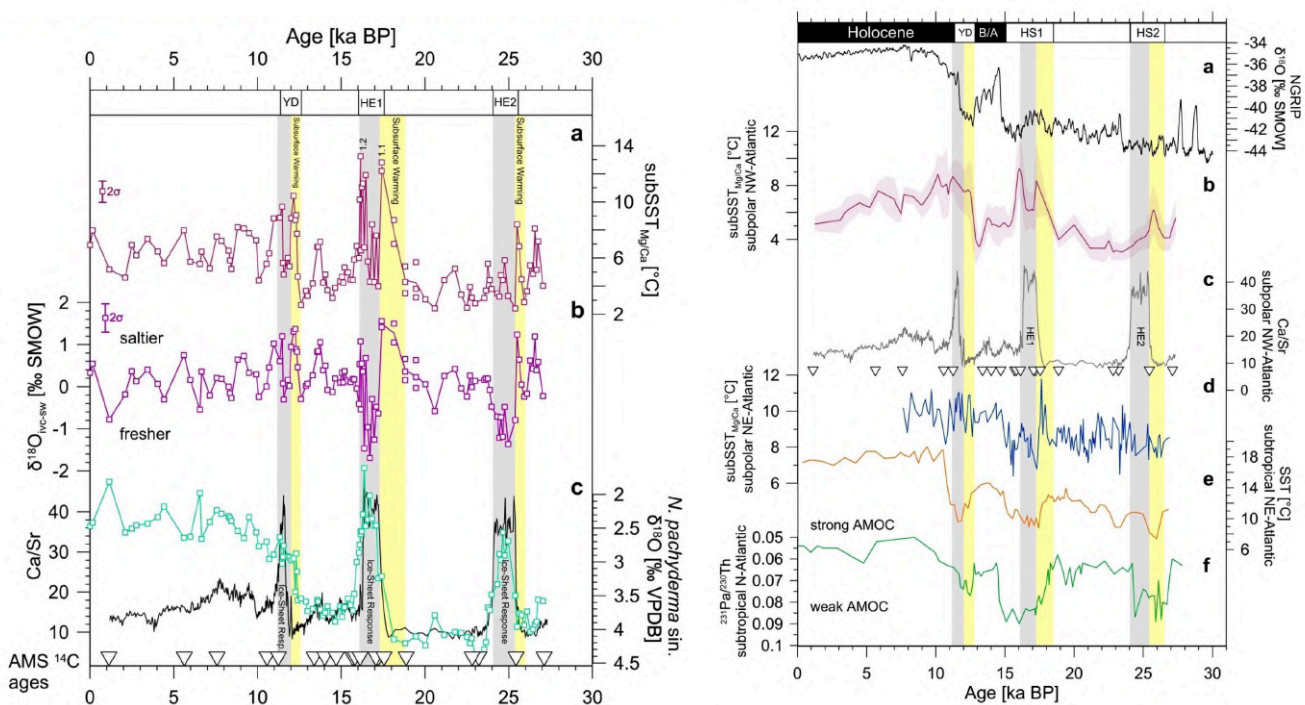


Рис. 84: Слева: Записи из океанических донных осадков за последние 27 000 лет показывают, что вода под поверхностью океана начала заметно нагреваться ещё до событий Хайнриха. Это означает, что сначала происходило потепление в более глубоких слоях океана, а уже затем происходило массовое высвобождение льда в море. Справа: Сравнение прокси-климатических данных из морских донных осадков с данными из Гренландии и северной Атлантики за последние 27 000 лет показывает, что основная океаническая циркуляция в Атлантике (AMOC) ослабевала ещё до событий Хайнриха - одновременно с потеплением воды под поверхностью океана.

Источник: https://www.researchgate.net/publication/362166766_Subsurface_ocean_warming_preceded_Heinrich_Events

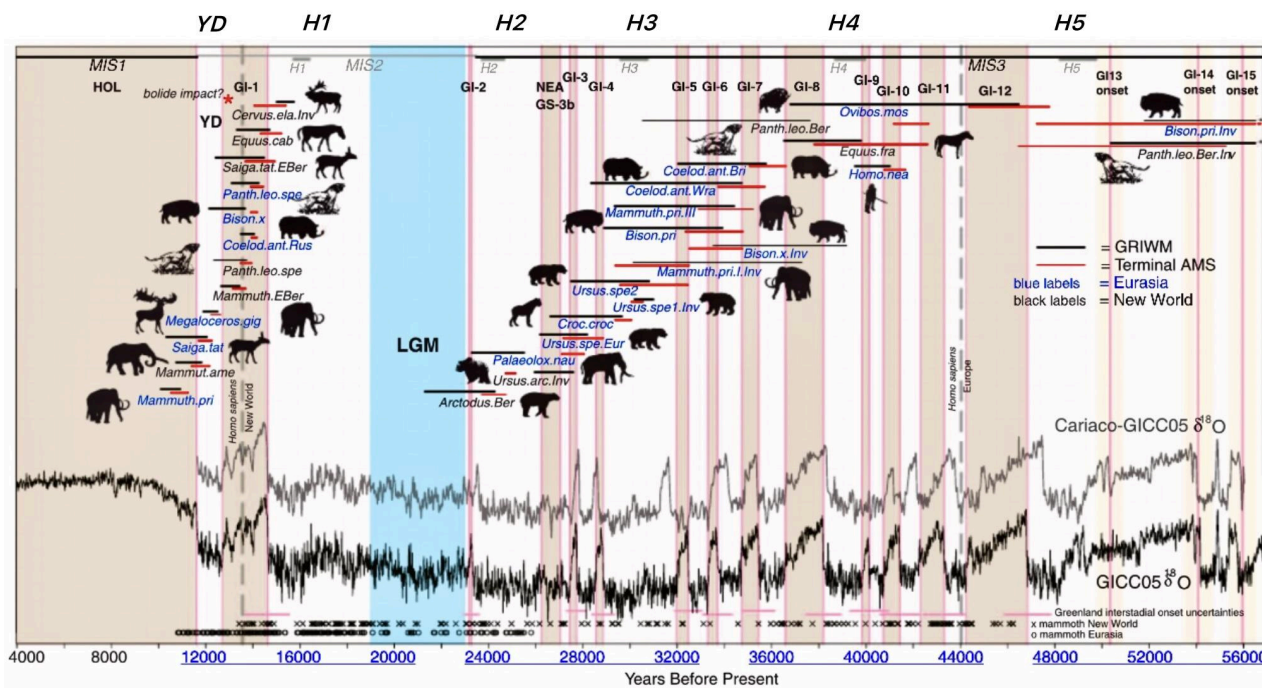


Рис. 85: Основные переходные события мегафауны (региональные или глобальные вымирания, инвазии видов или крупных клад) и климатические записи позднего плейстоцена, события Хайнриха H1 – H5, источник:

https://www.researchgate.net/publication/280733346_PALEOECOLOGY_Abrupt_warming_events_drove_Late_Pleistocene_Holarctic_megafaunal_turnover

¹⁷⁹ https://www.researchgate.net/publication/362166766_Subsurface_ocean_warming_preceded_Heinrich_Events

Быстрые климатические переходы одновременно оказывали существенное влияние на биосферу. Палеоэкологические записи указывают, что резкие потепления и реорганизация климата сыграли значительную роль в масштабных экологических изменениях, включая вымирание крупных видов животных в северном полушарии в конце последнего ледникового периода (Рис. 85). Эти события свидетельствуют о высокой чувствительности природных систем к резким климатическим импульсам.¹⁸⁰

В совокупности эти данные показывают, что климатические, океанические и геодинамические процессы Земли характеризуются не только плавным развитием, но и повторяющимися фазами ускоренных и резких изменений. Наблюдаемые в прошлом закономерности указывают на то, что внутренние обратные связи системы Земли в определённые периоды могут приводить к быстрым переходам между различными состояниями планеты, что имеет важные последствия для понимания современных и будущих изменений.

Младший дриас – резкие климатические изменения и геомагнитная экскурсия Гётеборг

Период примерно 12 900 – 11 700 лет назад известен как Младший дриас. Это был внезапный и драматический климатический эпизод, который прервал постепенное потепление после последнего ледникового периода (Рис. 86). После быстрого и выраженного потепления северное полушарие снова резко охладилось — на несколько градусов.

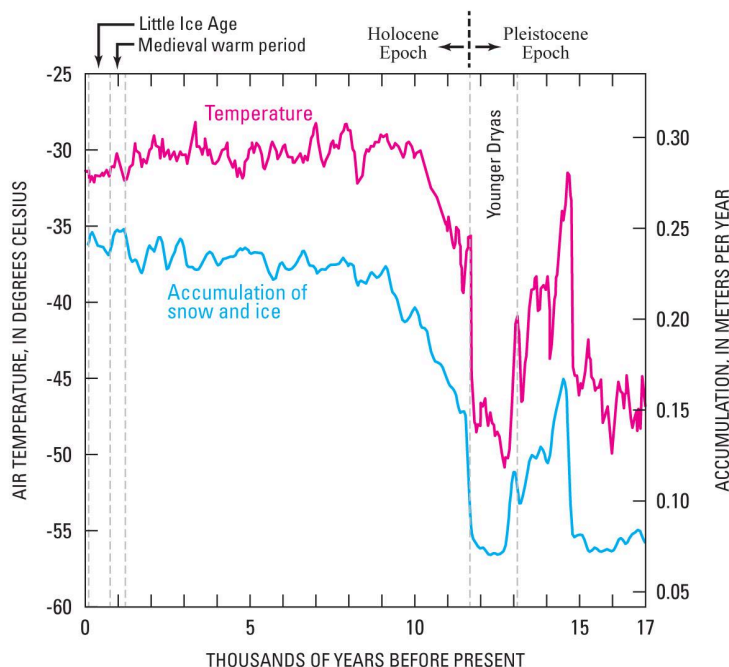


Рис. 86: Изменения температуры, полученные из центральной области гренландского ледяного щита в течение позднего плейстоцена и начала голоцена, источник: <https://pubs.usgs.gov/pp/p1386a/gallery2-fig35.html>

С климатической точки зрения Младший дриас был шоком:

- ледники перестали таять или снова начали расширяться,
- растительность быстро изменилась,
- экосистемы оказались под экстремальным давлением,
- многие популяции мегафауны окончательно исчезли.

Однако важно, что Младший дриас был не только климатическим событием. Он происходил одновременно с выраженными изменениями океанической циркуляции, вулканической активности и геомагнитного поля Земли.

Коллапс океанических течений и охлаждение планеты

Одним из ключевых механизмов Младшего дриаса было ослабление вплоть до коллапса Атлантической меридиональной циркуляции (АМОС), то есть системы течений, частью которой является Гольфстрим.

Перед этим событием:

- северная Атлантика демонстрировала выраженное подповерхностное потепление океана,
- тёплые воды накапливались под поверхностью,
- ледяные щиты были дестабилизированы снизу.

Важно, что океаны нагревались под поверхностью — что является именно тем же паттерном, который наблюдается и сегодня.

Вулканизм на пороге голоцена

Период Младшего дриаса и его ближайшее окружение одновременно были одним из наиболее активных вулканических периодов последних десятков тысяч лет.

Одной из обсуждаемых гипотез, объясняющих внезапное охлаждение в период Младшего дриаса, была идея падения крупного космического тела (кометы, метеорита) в атмосфере. Однако геохимические записи в осадках показывают, что аномалии, зафиксированные на границе плейстоцена и голоцена, можно объяснить и без необходимости внеземного импакта. Их характер скорее соответствует масштабной и временно накопленной вулканической активности, которая выбросила в атмосферу большое количество аэрозолей, сульфатов и мелкой пыли, способной существенно повлиять на климат северного полушария.¹⁸¹

Одним из основных триггеров климатических изменений в начале Младшего дриаса считается мощное эксплозивное извержение вулкана Лахер-Зе в современной Германии, произошедшее примерно 13 000 лет назад. Это извержение было одним из крупнейших в Европе за последние сотни тысяч лет, имело индекс VEI 6 и было чрезвычайно богато сульфатами. Выброшенные аэрозоли быстро распространились над северной Атлантикой и Европой, где могли усилить охлаждающий эффект уже ослабленной океанической циркуляции. Также предполагается, что

¹⁸¹ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aax8587>

это было не изолированное событие, а часть более широкой фазы повышенной активности нескольких вулканических систем северного полушария.¹⁸²

Примерно 13 100 лет назад также происходила выраженная вулканическая фаза Glacier Peak в районе северо-западной части Тихого океана, которая представляла собой не одно извержение, а серию крупных эксплозивных событий (Рис. 87)¹⁸³. Также расположенный рядом вулкан Mount Saint Helens извергался в период более 13 000 лет назад¹⁸⁴. Эти извержения показывают, что вулканическая дуга Каскадия в то время была высоко активной и, вероятно, распространила вулканические аэрозоли и криптотефру по всему северному полушарию.

Eruption history of Glacier Peak

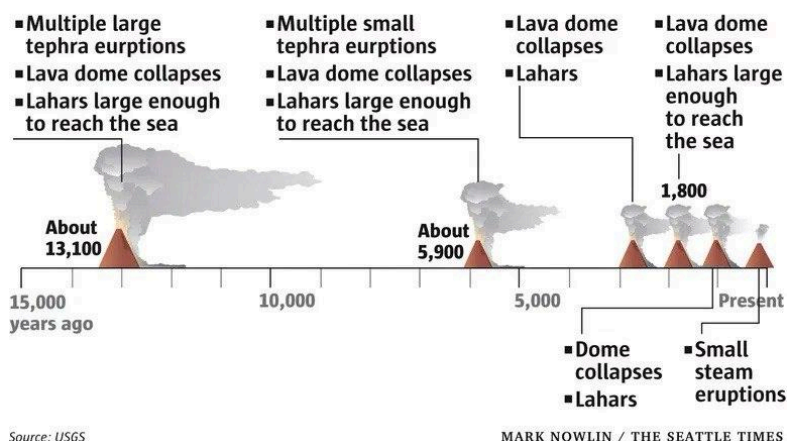


Рис. 87: История извержений вулкана Glacier Peak, источник:

<https://www.seattletimes.com/seattle-news/science/washingtons-hidden-glacier-peak-volcano-is-among-the-most-dangerous/>

Примерно 12 000 лет назад сформировалась кальдера вулкана Mount Okmok на Алеутских островах во время крупного извержения с индексом вулканической эксплозивности (VEI) 6, которое произвело не менее 30 км³ DRE (плотность, эквивалентная горной породе).¹⁸⁵

Многие учёные связывают слой пепла, отложенный в северной Атлантике и по всей Европе примерно 12 000 лет назад, с массивным извержением вулкана Катла. Катла относится к вулканам, способным очень быстро выбрасывать большие объёмы мелкодисперсного материала и сульфатов в атмосферу.¹⁸⁶

В Средиземноморье примерно 12 000 лет назад произошло плинианское извержение основной пемзы Pomici Principali, которое считается самым энергетически мощным извержением за последние 15 000 лет активности супервулкана Кампи-Флегреи.¹⁸⁷

Примерно 13 000 лет назад сформировался вулкан Сакурадзима, расположенный в кальдере супервулкана Айра в Японии. Это извержение Satsuma Tephra до сих пор является крупнейшим

¹⁸²

https://www.researchgate.net/publication/355976582_Volcanic_climate_forcing_preceding_the_inception_of_the_Younger_Dryas_Implications_for_tracing_the_Laacher_See_eruption
<https://cp.copernicus.org/articles/14/969/2018/>

¹⁸³

<https://www.seattletimes.com/seattle-news/science/washingtons-hidden-glacier-peak-volcano-is-among-the-most-dangerous/>

¹⁸⁴ <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aax8587>

¹⁸⁵ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JB018977>

¹⁸⁶ <https://www.britannica.com/place/Katla>

¹⁸⁷ <https://www.ov.ingv.it/index.php/flegrei-storia-eruttiva/prima-epoca>

извержением в истории Сакурадзимы — самого активного вулкана Японии (объём пирокластического материала составил примерно 11 км^3).¹⁸⁸

В целом можно заключить, что Младший дриас был не результатом одного изолированного события, а периодом, в котором синхронизировались несколько процессов: коллапс океанических течений, ослабление магнитного поля и фаза чрезвычайно интенсивной глобальной вулканической активности. Именно эта совокупность явлений могла привести к быстрой и выраженной климатической смене, подобной которой в голоцене уже не наблюдается.

Геомагнитические колебания в то же время

Младший дриас по времени совпадает с выраженной геомагнитной экскурсией, во время которой произошло временное ослабление магнитного поля Земли, а в некоторых регионах — даже его локальная или почти полная инверсия. Записи из северной Европы показывают, что в этот период, примерно 12 400 – 12 350 лет назад, магнитное поле кратковременно потеряло свою стабильность. Это событие известно как Гётеборгская геомагнитная экскурсия и по времени соответствует холодной фазе Младшего дриаса.¹⁸⁹ Существование этого события было подтверждено также в донных осадках Баренцева моря (Рис. 88)¹⁹⁰ и в озере Палео Даньян в Китае¹⁹¹.

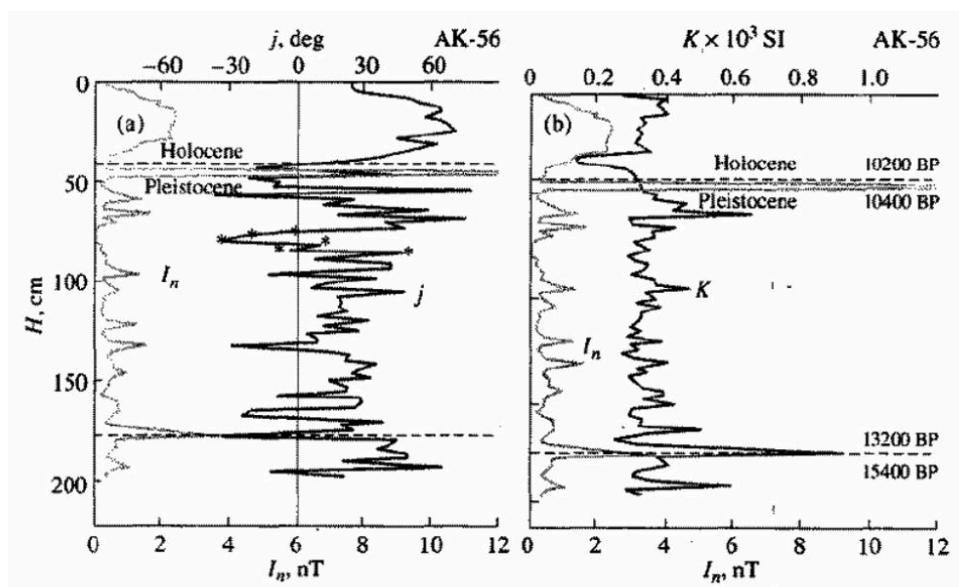


Рис. 88: График показывает изменения магнитных свойств осадков в северной части Баренцева моря в зависимости от глубины и времени. Видимые колебания естественной остаточной намагниченности (магнитная «память» пород), направления магнитного поля j (a) и магнитной восприимчивости K (b) отражают изменения геомагнитного поля в прошлом. Звёздочками обозначен период Гётеборгской геомагнитной экскурсии — кратковременной нестабильности магнитного поля примерно 12–13 тысяч лет назад, источник:

https://www.researchgate.net/publication/241600625_Manifestation_of_the_Gothenburg_geomagnetic_field_excursion_in_the_Barents_Sea_bottom_sediments

¹⁸⁸ https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/sakurajima/text/eng/exp01-2e.html#

¹⁸⁹ https://www.researchgate.net/publication/229127294_The_Gothenburg_Magnetic_Excursion
<https://www.cambridge.org/core/journals/quaternary-research/article/abs/gothenburg-magnetic-excursion/17B25AEC7351A029824A7B8F33EB6C63>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1367912019304924>

¹⁹⁰

https://www.researchgate.net/publication/241600625_Manifestation_of_the_Gothenburg_geomagnetic_field_excursion_in_the_Barents_Sea_bottom_sediments

¹⁹¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1367912019304924?via%3Dihub>

Важно, что записи из нескольких независимых седиментарных архивов указывают, что это была не локальная аномалия, а более широкий геомагнитный феномен, происходивший одновременно с выраженными климатическими и океаническими изменениями. Таким образом, геомагнитическая нестабильность представляется ещё одним звеном цепи процессов, которые во время Младшего дриаса происходили синхронно с коллапсом океанической циркуляции, усиленной вулканической активностью и быстрыми климатическими колебаниями.

Событие Генриха 1 (H1) и геомагнитная экскурсия Хилина-Пали

Потепление океанов, которое достигло кульминации в событии Генриха 1, началось примерно 18 000–19 000 лет назад. В этот период произошло выраженное подповерхностное потепление северной Атлантики и ослабление океанической циркуляции, что в итоге привело к дестабилизации ледовых шельфов и массивному сбросу ледников в океан.

По времени с этим периодом совпадает геомагнитная экскурсия Хилина-Пали, произошедшая примерно 18 500 лет назад (Рис. 89)¹⁹². Во время этой экскурсии произошло значительное, хотя и временное, ослабление интенсивности геомагнитного поля, что указывает на повышенную динамику процессов во внешнем ядре Земли.

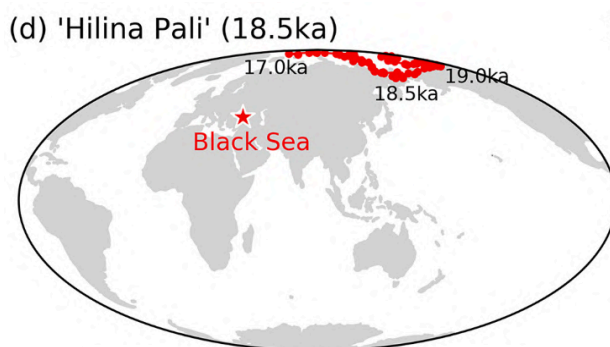


Рис. 89: Траектории виртуальных геомагнитных полюсов (VGP), рассчитанные на основе палеомагнитных направленных связей Чёрного моря, источник: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JB019225>

Параллельно с этими событиями происходили и значительные вулканические процессы. Примерно 18 000 лет назад произошло крупнейшее известное извержение комплекса Сомма–Везувий, которое существенно способствовало формированию современной кальдеры вулкана¹⁹³.

В тот же период происходили масштабные извержения в Западной Антарктиде, что указывает на глобально повышенную вулканическую активность в конце последнего ледникового периода. Серия массивных извержений около 18 000 лет назад, продолжавшаяся почти два столетия,

¹⁹² <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JB019225>

¹⁹³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377027398000250>
<https://www.protezionecivile.gov.it/en/approfondimento/eruptive-history/>
<https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=211020>

могла значительно ускорить переход климата в более тёплое состояние. Согласно новому исследованию, эти извержения выбросили в атмосферу большое количество веществ, разрушающих озоновый слой, что привело к его заметному ослаблению и последующему потеплению антарктической атмосферы. Хотя ледниковый период уже естественным образом приближался к концу, это событие, вероятно, действовало как катализатор внезапных и драматических климатических изменений, подтверждая, что климатическая система может очень чувствительно реагировать даже на относительно кратковременные, но интенсивные импульсы.¹⁹⁴

Событие Генриха 2 (H2) и геомагнитная экскурсия Lake Mungo 2

Потепление океанов, приведшее к событию Генриха 2, началось примерно 25 000–26 000 лет назад. Этот процесс снова характеризовался постепенным повышением температуры подповерхностных вод северной Атлантики и последующим нарушением стабильности ледниковых систем.

К этому периоду относится и выраженная геомагнитная экскурсия, идентифицированная в районе озера Мунго в Австралии, датируемая примерно 26 000 лет назад. Археомагнитные записи из этого региона указывают на значительные изменения направления и низкую интенсивность магнитного поля, что свидетельствует о глобальном характере геомагнитической нестабильности. Во время этой более молодой экскурсии магнитное поле не только значительно отклонялось по направлению, но и происходило существенное снижение его интенсивности. Измерения показывают, что сила поля была значительно ниже обычных значений — часто всего около 0,2–0,4 Ое. Таким образом, в этот период магнитное поле демонстрировало сочетание направленной нестабильности и низкой интенсивности, что является типичным признаком геомагнитической экскурсии (Рис. 90).¹⁹⁵

¹⁹⁴ <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1705595114>

<https://www.sciencenordic.com/climate-change-denmark-geology/volcanic-eruptions-hastened-the-end-of-the-last-ice-age/1448735>

¹⁹⁵ <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.1976.0048>

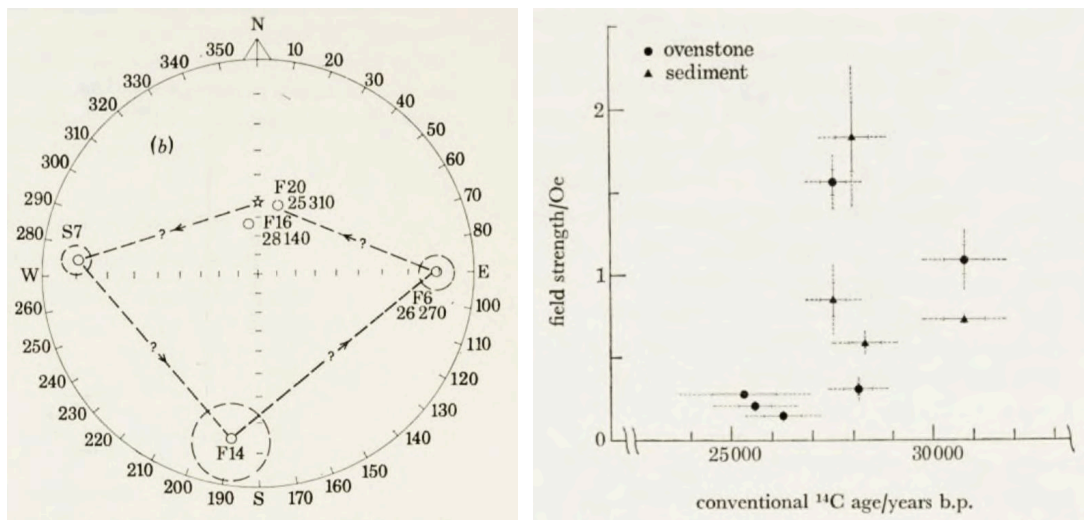


Рис. 90: **Слева:** Стереографическая проекция направлений намагниченности, наблюдавшихся во время геомагнитического отклонения примерно 26 000 лет назад (колебания направления магнитного поля), характеризующегося низкой интенсивностью поля.

Справа: Средние измерения интенсивности древнего магнитного поля. Во время экскурсии примерно 26 000 лет назад магнитное поле было значительно ослаблено. Измерения показывают значения значительно ниже современного уровня — часто около 0,2–0,4 Ое.

Источник: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.1976.0048>

С геологической точки зрения этот период связан с одним из крупнейших известных вулканических извержений в истории Земли — суперизвержением вулкана Таупо в Новой Зеландии, известным как извержение Орануи (около 25 500 лет назад). Это событие достигло уровня VEI 8 и произвело примерно 1 170 км³ изверженного материала, что представляет собой экстремальное воздействие на климатическую и экологическую систему планеты.¹⁹⁶

Событие Генриха 3 (H3) и геомагнитическая экскурсия Lake Mungo 1 / Mono Lake

Потепление океанов, предшествовавшее событию Генриха 3, началось примерно 31 000 лет назад. И в этом случае происходило постепенное накопление тепла в подповерхностных слоях океана, что приводило к дестабилизации ледников и последующему массивному выбросу льда в северную Атлантику.

К тому же периоду относится ещё одна геомагнитная экскурсия, зафиксированная в районе озера Мунго (Австралия), датируемая примерно 30 000 лет назад. Во время этой экскурсии направление магнитного поля Земли значительно отклонялось от обычного осевого дипольного направления, однако сама интенсивность поля была необычно высокой. Измерения вулканических пород и обожжённых осадков показывают, что сила магнитного поля достигала или превышала значения, сопоставимые с современным полем — примерно в диапазоне 1,0–1,5 Ое. Это означает, что, хотя поле было нестабильным по направлению, его общая интенсивность оставалась высокой (Рис. 91).¹⁹⁷

¹⁹⁶ <https://earthsky.org/earth/taupo-supervolcano-needs-monitoring/>
<https://eos.org/science-updates/implications-of-a-supervolcanos-seismicity>
https://en.wikipedia.org/wiki/Oruanui_eruption

¹⁹⁷ <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.1976.0048>

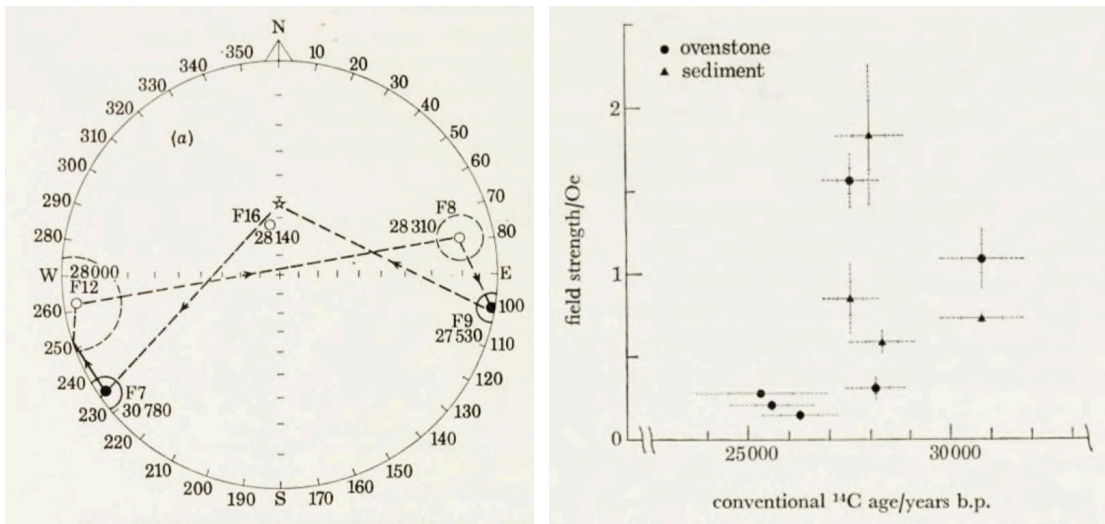


Рис. 91: **Слева:** Стереографическая проекция направлений намагниченности, наблюдавшихся во время геомагнитического отклонения, характеризующегося аномально высокой интенсивностью поля между 31 000 и 28 000 лет назад.

Справа: Средние измерения интенсивности древнего магнитного поля. Во время экскурсии примерно 30 000 лет назад сила магнитного поля достигала или превышала значения, сопоставимые с современным полем — примерно в диапазоне 1,0–1,5 Oe.

Источник: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.1976.0048>

Эта картина временной нестабильности может быть временно и процессуально сопоставлена с хорошо задокументированной геомагнитической экскурсией известных локаций в Северной Америке — так называемой Mono Lake Excursion, которая является одним из наиболее хорошо зафиксированных палеомагнитных маркеров в осадках северного полушария. Согласно палеомагнитным и тефрохронологическим данным, экскурсия Mono Lake произошла примерно между 31 500 и 33 300 лет назад и подтверждена, например, в осадках формации Wilson Creek возле Mono Lake в Калифорнии и в соседних бассейнах, таких как Pyramid Lake и Carson Sink в Неваде, где её магнитные следы находятся над характерным вулканическим слоем Ash #15 (Рис. 92).¹⁹⁸

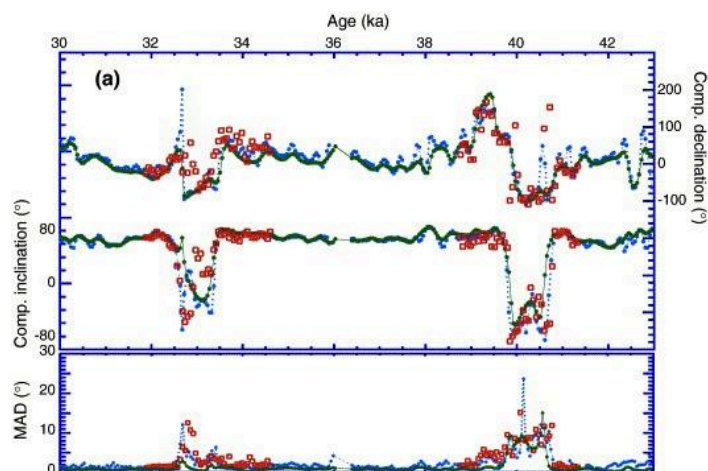


Рис. 92: График показывает снижение и нестандартное поведение магнитного поля Земли во время экскурсии Mono Lake примерно в интервале около 33 тыс. лет назад и около 40 тыс. лет назад, проявляющееся выраженными изменениями склонения (направления магнитного поля «в стороны») и наклонения (направления магнитного поля «вниз» или «вверх»), а также повышенными значениями MAD (показатель разброса/ненадёжности измерения), что указывает на нестабильность магнитной записи в этот период. Источник:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X06000574>

¹⁹⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0277379102002494?via%3Dihub>

В этом временном интервале произошло также крупнейшее извержение супервулкана в Японии. Супервулкан Айра во время этого мощного извержения примерно 30 000 лет назад сформировал свою кальдеру. Последняя оценка общего объёма выбросов из кальдеры Айра составляет примерно 800–900 км³, что примерно в 1,5 раза превышает предыдущую оценку в 600 миллиардов кубических метров. Это извержение классифицируется по индексу VEI как 8, что делает его «мегаколоссальным» извержением и оно имело разрушительные последствия для окружающей среды.¹⁹⁹

Событие Генриха 4 (H4) и геомагнитическая экскурсия Лашамп

Потепление океанов, приведшее к событию Генриха 4, началось примерно 40 000 лет назад. Этот период является одним из наиболее хорошо задокументированных примеров совпадения климатических, геомагнитических и вулканических экстремумов.

Примерно 41 200 лет назад произошла геомагнитическая экскурсия Лашамп (Рис. 93), во время которой произошло драматическое ослабление геомагнитного поля — в некоторых местах до долей его современной интенсивности²⁰⁰. Это ослабление имело выраженные последствия для атмосферной химии, включая изменения концентрации озона, и сопровождалось глобальными экологическими изменениями.²⁰¹

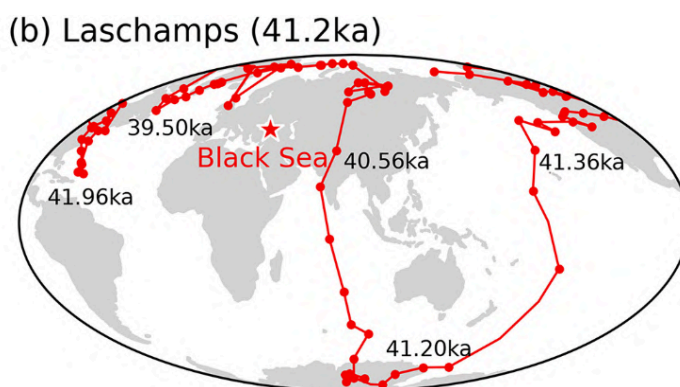


Рис. 93: Траектории виртуальных геомагнитных полюсов (VGP), рассчитанные на основе палеомагнитных направленных связей Чёрного моря, источник: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JB019225>

К этому же периоду относится и одно из крупнейших вулканических извержений в Европе — извержение Campanian Ignimbrite, сформировавшее значительную часть кальдеры Кампи-Флегрей в Италии. Это извержение достигло уровня VEI 7 и произвело примерно 430–680 км³ изверженного материала²⁰². Оно связывается с выраженным похолоданием климата в

¹⁹⁹ <https://www.asahi.com/ajw/articles/14532350>

²⁰⁰ <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JB019225>

²⁰¹ <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abb8677>

<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-12314.html>

²⁰² <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2020.543399/full>

Европе и с масштабными экологическими последствиями, включая исчезновение неандертальцев.²⁰³

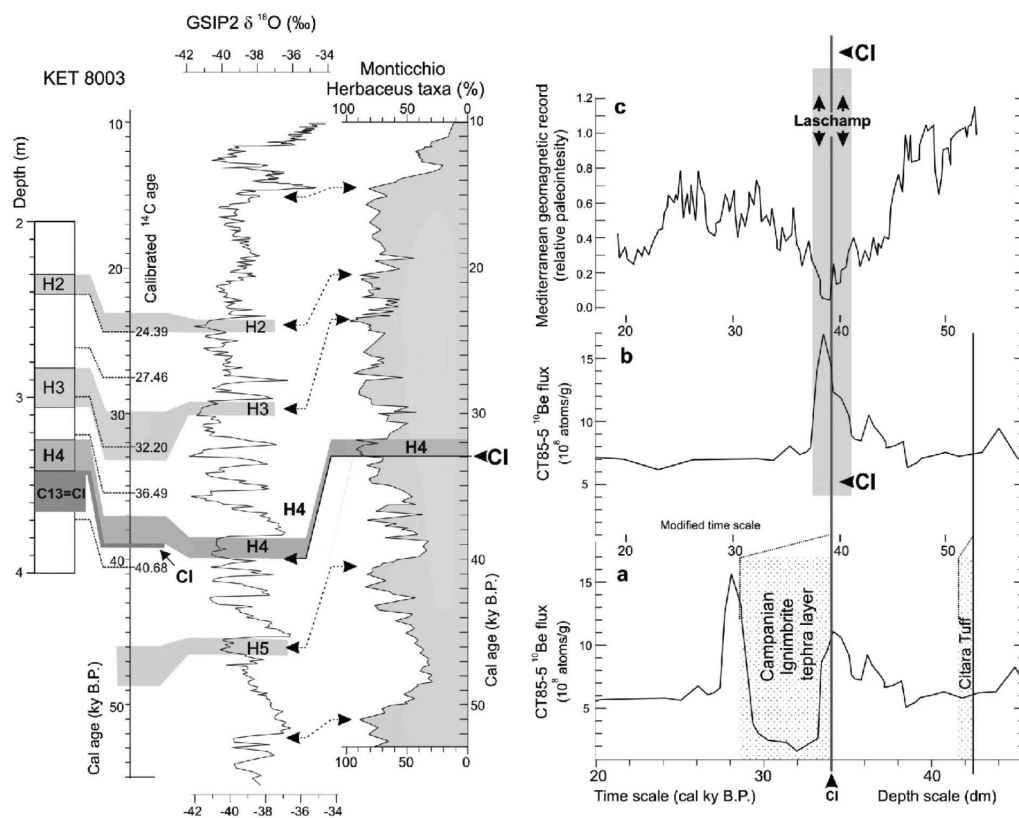


Рис. 94: **Слева:** Сравнение климатических изменений, зафиксированных в ледяных ядрах, морских осадках и озёрных записях, показывает, что событие Генриха H4 по времени примерно совпадает с извержением Campanian Ignimbrite CI и крупными изменениями растительности и климата. Стрелки указывают на один и тот же глобальный период климатического стресса.

Справа: Резкое снижение интенсивности геомагнитного поля во время экскурсии Лашамп и одновременно повышенный поток изотопа ¹⁰Be, который образуется при более интенсивном проникновении космического излучения при ослабленном магнитном поле. В тот же временной интервал попадает слой пепла из извержения Campanian Ignimbrite CI, что указывает на совпадение нескольких экстремальных процессов.

Источник:

<https://www.researchgate.net/publication/239939045> The Campanian Ignimbrite Eruption Heinrich Event 4 and Palaeolithic Change in Europe A High-Resolution Investigation

В тот же временной промежуток, примерно 38 000–40 000 лет назад, формировалась и кальдера вулкана Горелый на Камчатке с оценочным объёмом изверженного материала около 100 км³ и магнитудой VEI 7²⁰⁴. Совпадение этих событий указывает на период исключительной глобальной геодинамической активности.

В исследовании из книги «Вулканизм и земная атмосфера» подробно сопоставлены климатические записи из различных частей Европы и северной Атлантики с доказательствами крупного извержения Campanian Ignimbrite и со снижением интенсивности геомагнитного поля во время экскурсии Лашамп. Результаты показывают, что эти события перекрываются по времени примерно около 39–41 тысячи лет назад и приходятся на период начала события Генриха H4,

²⁰³ <https://www.ov.ingv.it/index.php/flegrei-storia-eruttiva/le-eruzioni-principali/ignimbrite-campana>

²⁰⁴ <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=300070>

что указывает на фазу выраженной глобальной нестабильности экологической системы (Рис. 94).²⁰⁵

Записи также показывают, что во время ослабления геомагнитного поля увеличивался поток космогенных изотопов, что указывает на более интенсивное проникновение космического излучения в атмосферу. Параллельно в осадочных записях появляется слой вулканического материала из извержения Campanian Ignimbrite, который связывается с выраженным охлаждением климата в Европе и возможными экологическими стрессами для тогдашних экосистем и человеческих популяций.²⁰⁶

Параллель с современностью: Повторение исторических циклов

В прошлом Земля неоднократно проходила через циклы, в ходе которых происходили изменения в поведении магнитного поля и смещения магнитных полюсов, выраженные климатические колебания (фазы глобального потепления, сменяющиеся охлаждением), а также периоды, сопровождавшиеся интенсивной вулканической активностью, которые в конечном итоге способствовали экологическим коллапсам и вымиранию мегафауны.

Анализ современных геодинамических процессов показывает тревожное сходство с периодами экстремальной глобальной нестабильности, которые Земля переживала в исторических циклических событиях, последний раз примерно 12 000 лет назад. Современные аномалии не являются изолированными событиями, а формируют комплексную картину системного изменения планеты, которая коррелирует с историческими циклами катастрофических событий.

В настоящее время мы наблюдаем тревожно схожую комбинацию явлений:

- **вхождение в период переполюсовки Земли или магнитной экскурсии** (ускоряющийся дрейф северного магнитного полюса, снижение интенсивности магнитного поля)
- **чрезвычайно быстрое потепление океанов**, особенно в подповерхностных слоях, которое относится к самым выраженным примерно за последние 10 000 лет
- **ослабление Атлантической меридиональной циркуляции** (включая Гольфстрим), которая в последний раз значительно нарушалась примерно 12 000 лет назад, а также изменения в других океанических течениях
- **глобальный рост сейсмической и вулканической активности**, включая пробуждение систем, которые были активны в последний раз именно около 12 000 лет назад, например:
 - **разлом Тинтина (Канада)**, который проявляет активность после более чем 12 000 лет тектонического покоя
 - **вулкан Hayli Gubbi (Эфиопия)**, который в 2025 году пробудился после примерно 12 000 лет
 - **повышенная активность супервулкана Кампи-Флегрей (Италия)**, указывающая на потенциал следующей крупной эруптивной фазы системы, которая имела одну из самых энергетически мощных эрупций примерно 12 000 лет назад

²⁰⁵

https://www.researchgate.net/publication/239939045_The_Campanian_Ignimbrite_Eruption_Heinrich_Event_4_and_Palaeolithic_Change_in_Europe_A_High-Resolution_Investigation

²⁰⁶

https://www.researchgate.net/publication/349448597_A_global_environmental_crisis_42000_years_ago
<https://www.theguardian.com/science/2021/feb/18/end-of-neanderthals-linked-to-flip-of-earths-magnetic-poles-study-suggests>

- **Сакурадзима в кальдере супервулкана Айра (Япония)**, которая входит в фазу наивысшей активности за последние 13 000 лет, когда кальдера была сформирована мощным извержением
- **супервулкан Лаахер-Зее (Германия)**, который был активен на рубеже голоцена примерно 13 000 лет назад и в настоящее время демонстрирует наиболее выраженные признаки беспокойства за последние десятилетия

Эти примеры формируют не изолированные аномалии, а скорее глобальный паттерн возврата внутренней активности Земли после длительной стабильности, которая длилась практически весь период голоцена (около 12 000 лет) — эпохи, в которой развилась человеческая цивилизация.

Хотя возможно, что в прошлом подобные климатические и геодинамические изменения были распределены по более длительным временным интервалам, сегодня мы можем сталкиваться с ситуацией, в которой эти естественные процессы ускоряются. На это указывают беспрецедентные тренды в потеплении океанов и в динамике геодинамических процессов планеты.

Одним из факторов, который может еще больше усилить эту тенденцию, является растущая концентрация микро- и нанопластика в биосфере, поскольку накапливаются данные исследований, свидетельствующие о том, что эти частицы уже не являются лишь пассивным источником загрязнения, но существует гипотеза, что, выступая в качестве элемента, нарушающего энергетический баланс Земли, они способствуют накоплению тепла в океанах и атмосфере, ослабляют естественный теплообмен между слоями и «замыкают» планетарную систему, тем самым снижая способность планеты эффективно перераспределять и отводить избыточное тепло в окружающее пространство.

Более подробно эти гипотезы разработаны, например, в отчете «Нанопластики в биосфере» (MSH ALLATRA), в котором отмечается их растущее присутствие в атмосфере и океанах, а также потенциальные последствия их накопления в различных компонентах окружающей среды, включая нарушение естественного теплообмена и перераспределения тепла в планетарной системе. Эти данные представляют собой важный дополнительный контекст для анализа современных глобальных изменений и динамики процессов, происходящих на Земле.²⁰⁷

²⁰⁷ https://allatra.org/storage/app/media/reports/en/Nanoplastics_in_the_Biosphere_Report.pdf

Заключение

Обобщение доступных данных сейсмологических, вулканологических и геофизических наблюдений указывает на то, что в последние десятилетия Земля находится в периоде повышенной геодинамической variability. Анализ глобальных и региональных данных показывает, что речь идёт не только об увеличении числа событий, но и об изменении их характера, пространственного распределения и взаимной связанности. Поэтому зарегистрированные явления нельзя интерпретировать исключительно как изолированные региональные эпизоды, а скорее как проявления глобально повышенной динамики тектонической системы Земли.

Наиболее выраженные проявления этой динамики концентрируются вдоль главных границ литосферных плит, особенно на окраинах Евразийской плиты. Мегаземлетрясение на Камчатке в 2025 году с магнитудой $M 8,8$, сопровождавшееся масштабными афтершоковыми последовательностями и одновременной активацией нескольких долгое время спокойных вулканов, представляет исключительный пример тесной связи глубокой сейсмичности и вулканических процессов. Пробуждение вулканов Крашенинникова, Кроноцкого и Безымянного после десятилетий и даже столетий покоя указывает на масштабную магматическую реорганизацию, выходящую за рамки локальной вулканической структуры.

Средиземноморский регион, прежде всего Эгейская область, демонстрирует резкий рост сейсмической активности в диапазоне средних магнитуд. Район Санторини–Колумбо предоставляет чёткие доказательства продолжающейся магматической активации — сейсмические рои, рост магматической камеры, тепловые и химические аномалии морского дна. Это связанная вулканическая система с потенциалом взрывных, включая цунамигенные, извержений, поведение которой вписывается в более широкую картину повышенной региональной нестабильности.

Особого внимания заслуживают наблюдения на Сибирской платформе, традиционно считавшейся одной из наиболее стабильных областей планеты. Появление землетрясений с магнитудами выше $M 5$ в районах Красноярска и Якутии представляет собой выраженную аномалию по сравнению с историческими данными и может указывать на активацию глубоких структур мантии.

В районе Кампи-Флегрей в Италии 2025 год стал рекордным не только по числу локализованных землетрясений, но и по их интенсивности. Комбинация более чем 5000 толчков, исторически самых сильных зарегистрированных событий, резкого роста выбросов CO_2 и повышенных температур фумарол предоставляет убедительные доказательства продолжающейся дестабилизации этой супервулканической системы. Более того, индикаторы температуры магмы в глубоком резервуаре указывают, что Кампи-Флегрей находится перед потенциальной супервулканической эрупцией.

С глобальной точки зрения долгосрочные временные ряды подтверждают постепенный рост числа землетрясений средних магнитуд ($M 4$ – $M 5$) и более частое возникновение сейсмических роев в различных тектонических обстановках. Хотя официальный научный консенсус пока в основном объясняет эти тренды улучшением детекции и каталогизации, существуют обоснованные причины рассматривать диапазон средних магнитуд как потенциальный ранний индикатор более глубоких изменений в напряжённом поле Земли. Именно в этом диапазоне возможное глобальное усиление сейсмичности проявилось бы сначала, прежде чем можно было бы ожидать роста числа экстремальных событий.

В контексте закона Гутенберга–Рихтера это развитие имеет принципиальное значение. Если окажется, что рост числа землетрясений $M \geq 4$ физически реален и параметр b остаётся стабильным, в более длительной временной перспективе неизбежно должен последовать рост числа событий более высоких магнитуд. Тот факт, что этот эффект пока не наблюдается однозначно, может быть связан с коротким статистическим окном, редкостью крупных землетрясений и запаздывающей реакцией системы на изменения напряжённого поля.

В целом результаты данного анализа указывают, что современное состояние Земли нельзя сводить к кратковременной флуктуационной фазе. Одновременное наличие статистических трендов в диапазоне средних магнитуд, региональных сейсмических роев, активации долгое время спокойных вулканических систем и признаков глубоких геодинамических процессов (процессов в мантии и ядре) указывает на фазу повышенной глобальной динамики. Уже некорректно с научной точки зрения игнорировать эти явления или объяснять их единственным фактором. Поэтому данная работа подчёркивает необходимость систематического мониторинга, пересмотра существующих моделей сейсмического риска и более глубокого изучения процессов, которые в настоящее время формируют динамику Земли.

Общие выводы работы указывают на необходимость расширения аналитической рамки мониторинга динамики Земли — не только на уровень локальных тектонических процессов, но и на уровень глобальных системных изменений планеты, включая процессы, происходящие в глубоких слоях Земли и в её взаимодействии с атмосферной и океанической системой. В этом более широком контексте особое значение приобретают исторические параллели и циклические изменения в системе Земли, которые могут помочь лучше понять современные тренды и их потенциальное дальнейшее развитие.

Благодарность

Авторы хотели бы поблагодарить всех, кто поддерживал и воодушевлял их в ходе подготовки данного доклада. Особая благодарность друзьям, коллегам и читателям, которые своими комментариями, вопросами и дискуссиями способствовали более глубокому осмыслению данной темы.

Авторы также благодарят всех рецензентов и ученых, которые предоставили отзывы по отдельным частям текста. Их замечания и критические замечания помогли уточнить некоторые интерпретации и расширить взгляд на исследуемую проблематику.

ИСТОЧНИКИ

1. *IRIS Newsletter: Volume 2000, No. 1* (2000). Available at: <https://ds.iris.edu/news/IRISnewsletter/volume2000no1/page-02-04.htm> (Accessed: March 16, 2026).
2. Parsons, T. and Geist, E.L. (2014) "The 2010–2014.3 global earthquake rate increase," *Geophysical Research Letters*, 41(13), pp. 4479–4485. Available at: <https://doi.org/10.1002/2014GL060513>.
3. Ringler, A.T. (2022) "Global Seismic Networks: Recording the Heartbeat of the Earth," *Eos*, 9 September. Available at: <https://eos.org/editors-vox/global-seismic-networks-recording-the-heartbeat-of-the-earth> (Accessed: March 16, 2026).
Achievements and prospects of global broadband seismographic networks after 30 years of continuous geophysical observations | U.S. Geological Survey (2022). Available at: <https://www.usgs.gov/publications/achievements-and-prospects-global-broadband-seismographic-networks-after-30-years> (Accessed: March 16, 2026).
4. Weatherill, G.A., Pagani, M. and Garcia, J. (2016) "Exploring earthquake databases for the creation of magnitude-homogeneous catalogues: tools for application on a regional and global scale," *Geophysical Journal International*, 206(3), pp. 1652–1676. Available at: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw232>.
5. "Lists of earthquakes" (2026) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lists_of_earthquakes&oldid=1343016360 (Accessed: March 16, 2026).
6. "1952 Severo-Kurilsk earthquake" (2026) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=1952_Severo-Kurilsk_earthquake&oldid=1333427734 (Accessed: March 16, 2026).
7. *M 9.0 - 89 km ESE of Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*. Available at: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/official19521104165830_30/executive (Accessed: March 16, 2026).
8. *M 8.8 - 2025 Kamchatka Peninsula, Russia Earthquake*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/executive> (Accessed: March 16, 2026).
9. Yagi, Y. *et al.* (2025) "Breaking the Cycle: Short Recurrence and Overshoot of an M9-class Kamchatka Earthquake," *Seismica*, 4(2). Available at: <https://doi.org/10.26443/seismica.v4i2.2012>.
10. *Foreshocks, aftershocks - what's the difference?* | U.S. Geological Survey (2024). Available at: <https://www.usgs.gov/faqs/foreshocks-aftershocks-whats-difference> (Accessed: March 16, 2026).
11. Johnson, J.M. and Satake, K. (1999) "Asperity Distribution of the 1952 Great Kamchatka Earthquake and its Relation to Future Earthquake Potential in Kamchatka," *Pure and Applied Geophysics*, 154(3–4), pp. 541–553. Available at: <https://doi.org/10.1007/s000240050243>.
12. Xu, D., Wang, W. and Ren, Z. (2025) "Preliminary slip distribution of the July 29, 2025 MW 8.8 Kamchatka, Russia earthquake," *Earthquake Research Advances*, p. 100427. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2025.100427>.
13. *Significant Earthquakes - 1952*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php?year=1952> (Accessed: March 16, 2026).
14. Helmstetter, A. and Sornette, D. (2003) "Bath's law Derived from the Gutenberg-Richter law and from Aftershock Properties," *Geophysical Research Letters*, 30(20), p. 2003GL018186. Available at: <https://doi.org/10.1029/2003GL018186>.
15. *На Камчатке произошло новое землетрясение* (2025) *Национальная Служба Новостей - НСН*. Available at:

- <https://nsn.fm/incident/novoe-moschnoe-zemletryasenie-na-kamchatke-privelo-seismologov-v-zameshate-istvo> (Accessed: March 16, 2026).
16. Pirti, A. (2024) "Investigation and prediction of the 2010 Maule, Chile earthquake by using GNSS on 25, 26 and 27 February 2010," *Journal of South American Earth Sciences*, 133, p. 104702. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104702>.
 17. *M 8.8 - 2025 Kamchatka Peninsula, Russia Earthquake*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/executive> (Accessed: March 16, 2026).
 18. Braille, L. (2010). *Feb. 27, 2010 M8.8 Chile Earthquake: Seismic/Eruption Views, Seismicity, Main Shock-AfterShock Sequence*. Available at: <https://web.ics.purdue.edu/~braille/edumod/chile/chile.htm> (Accessed: March 16, 2026).
 19. *Lori Dengler | A very large aftershock reminder that the Kamchatka earthquake sequence is not over* (2025). Available at: <https://www.msn.com/en-us/public-safety-and-emergencies/natural-disasters/lori-dengler-a-very-large-aftershock-reminder-that-the-kamchatka-earthquake-sequence-is-not-over/ar-AA1MYowB> (Accessed: March 16, 2026).
 20. *Volcano in Russia's Kamchatka ejects ash up to 9.2 km high* (2025) *ap7am.com*. Available at: <https://www.ap7am.com/en/110864/volcano-in-russias-kamchatka-ejects-ash-up-to-92-km-high> (Accessed: March 16, 2026).
 21. "Землетрясение в Хатанге нехарактерное явление для сейсмически спокойного Таймыра" (2025) *Новости «Северного Города»*, 5 March. Available at: <https://news.sgnorilsk.ru/2025/03/05/zemletryasenie-v-hatange-neharakternoe-yavlenie-dlya-seismicheskoi-spokojnogo-tajmyra/> (Accessed: March 16, 2026).
- Силой 6 - 8 баллов. Ученые оценили прогноз мощных землетрясений в Якутии, Дзен | Статьи* (2024). Available at: <https://dzen.ru/a/ZqjG6iMaR2Fxfei4> (Accessed: March 16, 2026).
22. Горохова, М. (2025) *В Якутии растет количество землетрясений. Ученый рассказал о сейсмической опасности — ЯСИА, Новости Якутии и Якутска — свежие новости онлайн на сайте ysia.ru — ЯСИА*. Available at: <https://ysia.ru/v-yakutii-rastet-kolichestvo-zemletryasenij-uchenyj-rasskazal-o-seismicheskoi-opasnosti/> (Accessed: March 16, 2026).
 23. Egan, R. (2025) *Reconstruction of record-breaking Myanmar earthquake confirms supershear event*. Available at: <https://phys.org/news/2025-08-reconstruction-myanmar-earthquake-supershear-event.html> (Accessed: March 16, 2026).
- Tsukuba, U. of (2025) Supershear "boomerang" rupture found in Myanmar earthquake defies typical seismic patterns*. Available at: <https://phys.org/news/2025-07-supershear-boomerang-rupture-myanmar-earthquake.html> (Accessed: March 16, 2026).
24. Bouchon, M. *et al.* (2001) "How fast is rupture during an earthquake? New insights from the 1999 Turkey Earthquakes," *Geophysical Research Letters*, 28(14), pp. 2723–2726. Available at: <https://doi.org/10.1029/2001GL013112>.
 25. *Earthquake statistics: Myanmar - detailed charts and tables, current and past seismic activity*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/myanmar/stats.html> (Accessed: March 16, 2026).
 26. *The complete Myanmar earthquake report (up-to-date 2026)*. Available at: <https://earthquakelist.org/myanmar/> (Accessed: March 16, 2026).
 27. Sparacino, F. *et al.* (2022) "Seismic coupling for the Aegean - Anatolian region," *Earth-Science Reviews*, 228, p. 103993. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103993>.

28. *Nisyros: The volcanic craters in the Nisyros caldera*. Available at: <https://nisyros.de/en/geology-of-nisyros-volcano/the-volcanic-craters-of-nisyros> (Accessed: March 16, 2026).
29. Antoniou, V. *et al.* (2021) "Nisyros Volcanic Island: A Geosite through a Tailored GIS Story," *Geosciences*, 11(3). Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11030132>.
30. "Methana Peninsula" *Visit Attica*. Available at: <https://athensattica.com/point/methana-peninsula/> (Accessed: March 16, 2026).
31. Giannopoulos, B. (2026) "Newly Discovered Extensive Hydrothermal Vent Fields Off Milos Island, Greece Greek City Times," *Greek City Times*, 1 January. Available at: <https://greekcitytimes.com/2026/01/01/milos-island-hydrothermal-vents-discovery/> (Accessed: March 16, 2026).
32. Di Luccio, F. and Pasyanos, M.E. (2007) "Crustal and upper-mantle structure in the Eastern Mediterranean from the analysis of surface wave dispersion curves," *Geophysical Journal International*, 169(3), pp. 1139–1152. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03332.x>.
33. Casten, U. and Snopek, K. (2006) "Gravity modelling of the Hellenic subduction zone — a regional study," *Tectonophysics*, 417(3), pp. 183–200. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.11.002>.
34. Halnon, E. (2025) *Study finds that magma helped drive recent Santorini earthquakes*, *OregonNews*. Available at: <https://news.uoregon.edu/study-finds-magma-helped-drive-recent-santorini-earthquakes> (Accessed: March 16, 2026).
35. Papazachos, C. *et al.* (2025) "The Santorini 2024–2025 Volcano-Tectonic Sequence: Constraining the Initial Phase of the Intra-Caldera Unrest," *Geophysical Research Letters*, 52(13), p. e2025GL115856. Available at: <https://doi.org/10.1029/2025GL115856>.
36. Maeno, F. (2025) "Global database on surface phenomena and hazards of explosive submarine eruptions with application to hazards of the Kolumbo Volcanic Field," *Bulletin of Volcanology*, 87(10), p. 87. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00445-025-01871-8>.
37. Anagnostou, E. *et al.* (2025) "Hydrothermal mercury inputs from the Kolumbo Submarine Volcano," *Goldschmidt2025 abstracts*. *Goldschmidt2025*, Prague, Czech Republic: European Association of Geochemistry. Available at: <https://doi.org/10.7185/gold2025.31407>.
38. Chrapkiewicz, K. *et al.* (2022) "Magma Chamber Detected Beneath an Arc Volcano With Full-Waveform Inversion of Active-Source Seismic Data," *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23(11), p. e2022GC010475. Available at: <https://doi.org/10.1029/2022GC010475>.
39. Mcnair, B. (2024) "What Are Phreatomagmatic Eruptions and How They Form?," *Geology Base*, 10 January. Available at: <https://geologybase.com/phreatomagmatic-eruptions/> (Accessed: March 16, 2026).
40. Isken, M.P. *et al.* (2025) "Volcanic crisis reveals coupled magma system at Santorini and Kolumbo," *Nature*, 645(8082), pp. 939–945. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09525-7>.
41. Department of Earth Science University of Bergen (2013) "Seismicity of Norway and surrounding areas for 2013." Available at: https://nnsn.geo.uib.no/reports/2013/seismicity_2013.pdf (Accessed: March 16, 2026).
42. *Jan Mayen*. Available at: https://www.volcanodiscovery.com/de/jan_mayen-earthquakes.html (Accessed: March 16, 2026).
43. *M 7.4 - 15 km S of Hualien City, Taiwan*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000m9g4/executive> (Accessed: March 16, 2026).
44. Kothari, R. (2024) "Taiwan logs record seismic activity with 42 quakes surpassing M5.5 in 2024" . Available at:

<https://watchers.news/2024/12/07/taiwan-logs-record-seismic-activity-with-42-quakes-surpassing-magnitude-5-5/> (Accessed: March 16, 2026).

45. Qiu, J. *et al.* (2025) "Coseismic deformation and seismogenic structure of the 2024 Hualien Earthquake measured by InSAR and GNSS," *Earthquake Research Advances*, 5(1), p. 100328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2024.100328>.
46. Mao, Z. *et al.* (2025) "Seismo-Traveling Ionospheric Disturbances from the 2024 Hualien Earthquake: Altitude-Dependent Propagation Insights," *Remote Sensing*, 17(7). Available at: <https://doi.org/10.3390/rs17071241>.
47. *M 7.7 - 21 km S of Puli, Taiwan*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0009eq0/executive> (Accessed: March 16, 2026).
48. *M 7.4 - 8 km SSW of Hualien City, Taiwan*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0003009/executive> (Accessed: March 16, 2026).
49. Chen, Y. *et al.* (2025) "Coseismic slip model and early post-seismic deformation processes of the 2024 M7.5 Noto Peninsula, Japan earthquake revealed by InSAR and GPS observations," *Geophysical Journal International*, 240(2), pp. 1048–1063. Available at: <https://doi.org/10.1093/gji/ggae429>.
50. *Earthquake statistics: Ishikawa-ken, Japan - detailed charts and tables, current and past seismic activity*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/japan/ishikawa/stats.html> (Accessed: March 16, 2026).
51. "Earthquake Lifts the Noto Peninsula - NASA Science" (2024), 25 January. Available at: <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/earthquake-lifts-the-noto-peninsula-152350/> (Accessed: March 16, 2026).
52. List of major earthquakes since the Great East Japan Earthquake (2025) *nippon.com*. Available at: <https://www.nippon.com/ja/features/h20002/> (Accessed: March 16, 2026).
53. *Volcanic Eruptions on the Reykjanes Peninsula in Iceland - A Complete Timeline (2021-2025)* (2026) *Guide to Iceland*. Available at: <https://guidetoiceland.is/best-of-iceland/volcanic-eruptions-on-the-reykjanes-peninsula-in-iceland-a-complete-timeline-2021-2024> (Accessed: March 16, 2026).
54. *The ninth eruption on the Sundhnúkur crater row has ended* | News | Icelandic Meteorological office (2025). Available at: <https://en.vedur.is/about-imo/news/a-magma-intrusion-has-started-on-sundhnuksgigarod-crater-row> (Accessed: March 16, 2026).
- Iceland's volcano eruptions may last decades, researchers find* (2024). Available at: <https://phys.org/news/2024-06-iceland-volcano-eruptions-decades.html> (Accessed: March 16, 2026).
- Molinek, R. (2024) *Hidden Underground Magma Pools Fueled Iceland's Volcanic Eruptions, Study Suggests*, *Smithsonian Magazine*. Available at: <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/hidden-underground-magma-pools-fueled-icelands-volcanic-eruptions-study-suggests-180984818/> (Accessed: March 16, 2026).
55. Schanen, N. (2025) "Iceland volcano leaves visual spectacle in 12th eruption in four years," *The Washington Post*, 16 July. Available at: <https://www.washingtonpost.com/world/2025/07/16/iceland-volcano-eruption-blue-lagoon/> (Accessed: March 16, 2026).
56. *Global Volcanism Program | Report on Reykjanes (Iceland) — 30 July-5 August 2025* (2025). Available at: <https://volcano.si.edu/ShowReport.cfm?doi=10.5479/si.GVP.WVAR20250730-371020> (Accessed: March 16, 2026).

57. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (2023) "Earthquake: Türkiye and north-west Syria." Available at: <https://www.rcce-collective.net/wp-content/documents-repo/Earthquake/Resources/Situation/Earthquake/GZT-FlashUpdate-FIN.pdf> (Accessed: March 16, 2026).
58. Demir, A. *et al.* (2025) "Destructive impact of successive high magnitude earthquakes occurred in Türkiye's Kahramanmaraş on February 6, 2023," *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23(3), pp. 893–919. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01865-5>.
59. Rosakis, A., Abdelmeguid, M. and Elbanna, A. (2023) "Evidence of Early Supershear Transition in the Mw 7.8 Kahramanmaraş Earthquake From Near-Field Records." arXiv. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.07214>.
60. Sahin, S. (2023) "Last 123 years' largest earthquakes in Türkiye". Available at: <https://www.aa.com.tr/en/turkiye/last-123-years-largest-earthquakes-in-turkiye/2836533> (Accessed: March 16, 2026).
61. Temblor (2023) "Major earthquake strikes the Philippines, followed by unusually large aftershocks," *Temblor.net*, 7 December. Available at: <https://temblor.net/temblor/major-earthquake-strikes-the-philippines-followed-by-unusually-large-aftershocks-15758/> (Accessed: March 16, 2026).
62. *Significant Earthquakes - 2023*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/significant.php?year=2023> (Accessed: March 16, 2026).
63. *M 7.7 - 4 km E of Macapsing, Philippines*. Available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0004bxs/executive> (Accessed: March 16, 2026).
64. *Ethiopia Earthquake 2025 - DREF Operation (MDRET037) - Ethiopia | ReliefWeb* (2025). Available at: <https://reliefweb.int/report/ethiopia/ethiopia-earthquake-2025-dref-operation-mdret037> (Accessed: March 16, 2026).
65. Wright, T.J. *et al.* (2006) "Magma-maintained rift segmentation at continental rupture in the 2005 Afar dyking episode," *Nature*, 442(7100), pp. 291–294. Available at: <https://doi.org/10.1038/nature04978>.
66. "Earth Observatory - NASA Science" (1999), 29 April. Available at: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/event/50989> (Accessed: March 16, 2026).
67. *Dabbahu*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/dabbahu.html> (Accessed: March 16, 2026).
68. *Dofen*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/dofen.html> (Accessed: March 16, 2026).
- Fantale*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/fantale.html> (Accessed: March 16, 2026).
- Way, L. *et al.* (2025) "Real-time satellite monitoring of the 2024–2025 dyke intrusion sequence at Fentale-Dofen volcanoes, Ethiopia," *Bulletin of Volcanology*, 87(11), p. 100. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00445-025-01884-3>.
69. *Experts On Why Volcano Hayli Gubbi Erupted After 12,000 Years* (2025) NDTV. Available at: <https://www.ndtv.com/world-news/why-volcano-hayli-gubbi-erupted-after-12-000-years-what-experts-said-9694900> (Accessed: March 16, 2026).
- Press, T.A. (2025) *Volcano in Ethiopia erupts for first time in nearly 12,000 years: "It felt like a sudden bomb"* - CBS News. Available at: <https://www.cbsnews.com/news/volcano-erupts-first-time-12000-years-hayli-gubbi-ethiopia/> (Accessed: March 16, 2026).
70. Yadav, R. (2025) *Lava surge at Erta Ale volcano reaches historic camp for first time in 20 years, Ethiopia, The Watchers*. Available at:

<https://watchers.news/2025/01/17/lava-surge-at-erta-ale-volcano-reaches-historic-camp-for-first-time-in-20-years-ethiopia/> (Accessed: March 16, 2026).

71. Blašković, T. (2025) *Sudden eruption produces dense ash plume at Erta Ale volcano, Ethiopia*, *The Watchers*. Available at: <https://watchers.news/2025/07/15/erta-ale-volcano-eruption-dense-ash-emission-ethiopia-july-2025/> (Accessed: March 16, 2026).
72. Szeglat, M. (2025) "OI Doinyo Lengai: Thermal Anomaly Suggests Lava Overflow | volcanoes and eruptions," 14 June. Available at: <https://www.volcanoes.de/2025/06/14/ol-doinyo-lengai-thermal-anomaly-suggests-lava-overflow/> (Accessed: March 16, 2026).
73. UNESCO World Heritage Centre (2017) *Mid-Atlantic Ridge*. Available at: <https://whc.unesco.org/en/tentativelists/6231/> (Accessed: March 16, 2026).
74. "Southeast Indian Ridge" (2025) *Wikipedia*. Available at: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Southeast Indian Ridge&oldid=1315112042](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Southeast_Indian_Ridge&oldid=1315112042) (Accessed: March 16, 2026).
75. *Major magnitude 7.5 earthquake - 2025 Southern Drake Passage Earthquake on Thursday, Aug 21, 2025, at 10:16 pm (GMT -4)*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/22087250/2025-08-22/02h16/magnitude7-Drake-Passage.html> (Accessed: March 16, 2026).
76. *Major magnitude 7.6 earthquake - Drake Passage on Friday, Oct 10, 2025, at 04:29 pm (GMT -4)*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/22261987/2025-10-10/20h29/magnitude7-Antarctica-Drake-Passage.html> (Accessed: March 16, 2026).
77. *IRIS Newsletter: Volume 2000, No. 1* (2000). Available at: <https://ds.iris.edu/news/IRISnewsletter/volume2000no1/page-02-04.htm> (Accessed: March 16, 2026).
78. Cesca, S. *et al.* (2022) "Massive earthquake swarm driven by magmatic intrusion at the Bransfield Strait, Antarctica," *Communications Earth & Environment*, 3(1), p. 89. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00418-5>.
79. Finley, T. *et al.* (2025) "Large Surface-Rupturing Earthquakes and a >12 kyr, Open Interseismic Interval on the Tintina Fault, Yukon," *Geophysical Research Letters*, 52(14), p. e2025GL116050. Available at: <https://doi.org/10.1029/2025GL116050>.
80. "Scientists Warn: Tintina Fault Could Unleash Major Earthquake" (2025) *SciTechDaily*, 27 July. Available at: <https://scitechdaily.com/scientists-warn-tintina-fault-could-unleash-major-earthquake/> (Accessed: March 16, 2026).
81. Team Paislobo Prensa (2025) *Reportan 160 sismos en dos horas en el volcán Laguna del Maule*, *Paislobo Prensa*. Available at: <https://www.paislobo.cl/2025/04/reportan-160-sismos-en-dos-horas-en-el.html> (Accessed: March 16, 2026).
82. National Service for Disaster Prevention and Response SENAPRED (2025) "Sernageomin issues yellow technical alert for the Laguna del Maule volcanic complex". Available at: <https://www.senapred.cl/2025/08/06/sernageomin-decreta-alerta-tecnica-amarilla-para-el-complejo-volcanico-laguna-del-maule/> (Accessed: March 16, 2026).
83. *Global Volcanism Program | Laguna del Maule* (2025) *Smithsonian Institution | Global Volcanism Program*. Available at: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=357061> (Accessed: March 16, 2026).

84. Hall, S. (2018) *A Supervolcano with a Cold Heart May Be Brewing in Chile*, *Scientific American*. Available at: <https://www.scientificamerican.com/article/a-supervolcano-with-a-cold-heart-may-be-brewing-in-chile/> (Accessed: March 16, 2026).
- Volcano warning after 160 earthquakes in just two hours* (2025) *The Independent*. Available at: <https://www.independent.co.uk/news/world/americas/chile-andes-earthquake-laguna-del-maule-volcano-b2732340.html> (Accessed: March 16, 2026).
85. *Newest Volcano Notice Including Mount Rainier* (2025). Available at: <https://volcanoes.usgs.gov/hans-public/volcano/wa6> (Accessed: March 16, 2026).
86. *Monitoring stations detect small magnitude earthquakes at Mount Rainier during July and August 2025* | U.S. Geological Survey (2025). Available at: <https://www.usgs.gov/observatories/cvo/news/monitoring-stations-detect-small-magnitude-earthquakes-mount-rainier> (Accessed: March 16, 2026).
87. PNSN (2025) "Mount Rainier earthquake swarm of July, 2025". Available at: <https://pnsn.org/blog/mount-rainier-earthquake-swarm-of-july-2025> (Accessed: March 16, 2026).
88. Daily, A.H.T. (2025) *Mount Rainier undergoes largest earthquake swarm in decades*, *The Daily*. Available at: <https://www.dailyuw.com/article/earthquake-20250728> (Accessed: March 16, 2026).
89. Pfeffinger, R. (2025) *WA seismic activity prompting new eruption plan for Mount Adams, Mount St. Helens*, *FOX 13 Seattle*. FOX 13 Seattle. Available at: <https://www.fox13seattle.com/news/eruption-planning-mt-adams-helens> (Accessed: March 16, 2026).
90. Staff, F. 12 and staff, G.N. (2024) *Magma beneath Mount St. Helens is 'recharging,' scientists say*, <https://www.kfyrtv.com>. Available at: <https://www.kfyrtv.com/2024/06/23/magma-beneath-mount-st-helens-is-recharging-scientists-say/> (Accessed: March 16, 2026).
91. Washington Military Administrator (2025) *What to do about Mount St. Helens and Mount Adams?* Available at: <https://mil.wa.gov/news/what-to-do-about-mount-st-helens-and-mount-adams> (Accessed: March 16, 2026).
92. Wirth, E. *et al.* (2025) "Earthquake Probabilities and Hazards in the U.S. Pacific Northwest." Available at: <https://pubs.usgs.gov/fs/2025/3050/fs20253050.pdf>.
93. "The West Coast Is at Risk: New Megathrust Fault Research Indicates That the Next Big Earthquake Could Be Imminent" (2024) *SciTechDaily*, 28 August. Available at: <https://scitechdaily.com/the-west-coast-is-at-risk-new-megathrust-fault-research-indicates-that-the-next-big-earthquake-could-be-imminent/> (Accessed: March 16, 2026).
94. Williams, K. (2025) *West Coast quake zones may be more connected than previously thought*, *Axios*. Available at: <https://www.axios.com/local/portland/2025/10/15/cascadia-san-andreas-fault-connection-earthquake> (Accessed: March 16, 2026).
95. Silleni, A. *et al.* (2020) "The Magnitude of the 39.8 ka Campanian Ignimbrite Eruption, Italy: Method, Uncertainties and Errors," *Frontiers in Earth Science*, 8. Available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.543399>.
96. Costa, A. *et al.* (2021) "The long and intertwined record of humans and the Campi Flegrei volcano (Italy)," *Bulletin of Volcanology*, 84(1), p. 5. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00445-021-01503-x>.
97. Marti, A. *et al.* (2016) "Reconstructing the plinian and co-ignimbrite sources of large volcanic eruptions: A novel approach for the Campanian Ignimbrite," *Scientific Reports*, 6, p. 21220. Available at: <https://doi.org/10.1038/srep21220>.

98. *Did a volcanic cataclysm 40,000 years ago trigger the final demise of the Neanderthals?* (2015) *ScienceDaily*. Available at: <https://www.sciencedaily.com/releases/2015/03/150320112332.htm> (Accessed: March 16, 2026).
99. Szeglat, M. (2025a) "Campi Flegrei: Erdbebenschwarm am 11. Oktober," *Vulkane Net Newsblog*, 11 October. Available at: <https://www.vulkane.net/blogmobil/campi-flegrei-erdbebenschwarm-am-11-oktober/> (Accessed: March 16, 2026).
100. *Monitoraggio Terremoti Campi Flegrei*. Available at: <https://www.terremotiflegrei.it/filtro.php?from=2025-01-01&to=2025-11-03&minmag=4> (Accessed: March 16, 2026).
- Campi Flegrei (Phlegrean Fields)*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/campi-flegrei-earthquakes/archive/2025.html> (Accessed: March 16, 2026).
101. Rapagnani, G. *et al.* (2025) "Coupled earthquakes and resonance processes during the uplift of Campi Flegrei caldera," *Communications Earth & Environment*, 6(1), p. 607. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02604-7>.
102. *Campi Flegrei, l'asfalto "bolle": arrivano i tecnici dell'INGV* (2025) *Newsroom Italia*. Available at: <https://newsroom24.it/notizia/2025/10/02/campi-flegrei-lasfalto-bolle-arrivano-i-tecnici-dellingv> (Accessed: March 16, 2026).
103. Kilburn, C.R.J. *et al.* (2023) "Potential for rupture before eruption at Campi Flegrei caldera, Southern Italy," *Communications Earth & Environment*, 4(1), p. 190. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00842-1>.
104. Guardascione, P. (2025) "Earthquake in Campi Flegrei, Di Vito (INGV): "In Campi Flegrei, gas emissions have increased at Solfatara and decreased at Pisciarelli." Available at: https://www.ilmattino.it/napoli/area_metropolitana/terremoto_campi_flegrei_di_vito_ingv_campi_flegrei_aumentata_emissione_gas_solfatara_diminuite_pisciarelli-9032201.html?refresh_ce (Accessed: March 16, 2026).
105. INGV (2025) "Bollettino di Sorveglianza CAMPI FLEGREI OTTOBRE 2025". Available at: <https://www.ov.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-infrastrutture/bollettini-tutti/bollett-mensili-cf/anno-2025-3/1897-bollettino-mensile-campi-flegrei-2025-10/file> (Accessed: March 16, 2026).
106. Frattasi, P. (2025) "The Campi Flegrei road is full of bubbles and deformed. INGV technicians at Solfatara." Available at: <https://www.fanpage.it/napoli/la-strada-dei-campi-flegrei-e-deformata-bolle-sullasfalto-alla-solfatara-i-tecnici-dellingv/> (Accessed: March 16, 2026).
107. "Smoke billows from the asphalt at Campi Flegrei" (2025). Available at: <https://www.ilfattovesuviano.it/2025/10/campi-flegrei-fuoriesce-fumo-dallasfalto/> (Accessed: March 16, 2026).
- Campi Flegrei: segnalata fuoriuscita di fumo dall'asfalto* (2025) *Napoli ZON*. Available at: <https://napoli.zon.it/campi-flegrei-segnalata-fuoriuscita-di-fumo-dallasfalto/> (Accessed: March 16, 2026).
108. *Terremoto Campi Flegrei, Pappalardo: «Sollevamento in aumento con media di 20 millimetri al mese»* (2025). Available at: https://www.ilmattino.it/napoli/area_metropolitana/pappalardo_campi_flegrei_velocita_di_sollevamento_bradisismo_aumentata_un_valore_medio_di_20_millimetri_al_mese-9164652.html (Accessed: March 16, 2026).
109. Forni, F. *et al.* (2018) "Long-term magmatic evolution reveals the beginning of a new caldera cycle at Campi Flegrei," *Science Advances*, 4(11), p. eaat9401. Available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat9401>.

110. “Campi Flegrei Volcano’s Ancient Cycle Seems to End in Large Eruption” (2018). Available at: <https://www.nytimes.com/2018/11/14/science/volcano-eruption-italy.html#> (Accessed: March 16, 2026).
111. Marini, L., Principe, C. and Lelli, M. (2025) “Time changes during the last 40 years in the Solfatara magmatic–hydrothermal system (Campi Flegrei, Italy): new conceptual model and future scenarios,” *Solid Earth*, 16(6), pp. 551–578. Available at: <https://doi.org/10.5194/se-16-551-2025>.
112. The Munich Eye (2025) *Supervolcano Near Naples Poses Immediate Eruption Threat*. Available at: <https://themunicheye.com/supervolcano-near-naples-eruption-threat-13549>. (Accessed: March 16, 2026).
113. Nishihara, A., Geshi, N. and Naruo, H. (2022) “Long-term change of the eruption activities of Sakurajima volcano, Japan, inferred from the fallout tephra deposits,” *Frontiers in Earth Science*, 10, p. 988373. Available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.988373>.
- Sakurajima(2): Eruption History of Sakurajima Volcano*. Available at: https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/sakurajima/text/eng/exp01-2e.html# (Accessed: March 16, 2026).
114. Huber, C. and Toramaru, A. (2024) “Increase in magma supply to Sakurajima volcano’s (Japan) shallow magma chamber over the past 500 years,” *Geology*, 52(4), pp. 235–239. Available at: <https://doi.org/10.1130/G51763.1>.
115. Todde, A. *et al.* (2017) “The 1914 Taisho eruption of Sakurajima volcano: stratigraphy and dynamics of the largest explosive event in Japan during the twentieth century,” *Bulletin of Volcanology*, 79(10), p. 72. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00445-017-1154-4>.
116. “Sakurajima | Kagoshima Travel Information” (2025), 29 September. Available at: <https://www.offthetrackjapan.com/sakurajima/> (Accessed: March 16, 2026).
117. *Sakurajima, Japan’s Most Active Volcano* (2018) *nippon.com*. Available at: <https://www.nippon.com/en/features/h00194/> (Accessed: March 16, 2026).
118. Kagoshima Meteorological Office (2026). Monthly eruptions of Sakurajima. Available at: https://www.data.jma.go.jp/kagoshima/vol/data/skr_erp_num.html (Accessed: March 16, 2026).
119. *Outline of Sakurajima (Current Status)*. Available at: <https://www.city.kagoshima.lg.jp/kikikanri/leadingcity/current.html> (Accessed: March 16, 2026).
120. Klemetti, E. (2015) “Sakurajima in Japan Might Be Headed Towards a Large Eruption,” *Wired*, 15 August. Available at: <https://www.wired.com/2015/08/sakurajima-japan-might-headed-towards-large-eruption/> (Accessed: March 16, 2026).
121. Marks, P.L. and Nowak, M. (2025) “Vesiculation dynamics – Part 1: Decompression-induced H₂O vesicle formation in the Lower Laacher See phonolitic melt,” *European Journal of Mineralogy*, 37(4), pp. 385–412. Available at: <https://doi.org/10.5194/ejm-37-385-2025>.
122. Skapski, J. (2025) “Erdbebenschwarm am Laacher See,” *Erdbebennews*, 10 October. Available at: <https://erdbebennews.de/2025/10/erdbebenschwarm-am-laacher-see/> (Accessed: March 16, 2026).
123. *Weak mag. 2.7 earthquake - 14 km west of Koblenz, Kreisfreie Stadt Pirmasens, Rheinland-Pfalz, Germany, on Friday, Oct 31, 2025, at 01:55 am (Berlin time)*. Available at: <https://www.volcanodiscovery.com/earthquakes/quake-info/22334958/info.html> (Accessed: March 16, 2026).
124. Laumann, P. *et al.* (2026) “Microseismicity reveals fault activation and fluid processes beneath the Neuwied Basin and Laacher See Volcano, East Eifel, Germany,” *Geophysical Journal International*, 244(2), p. ggaf475. Available at: <https://doi.org/10.1093/gji/ggaf475>.
125. *Deep low-frequency earthquakes indicate migration of magmatic fluids beneath Laacher See Volcano (Eifel, Germany)* (2019). Available at:

- <https://www.gfz.de/en/press/news/details/deep-low-frequency-earthquakes-indicate-migration-of-magmatic-fluids-beneath-laacher-see-volcano-eifel-germany> (Accessed: March 16, 2026).
126. Deng, Z. *et al.* (2024) "Deformation Monitoring on Laacher See by GNSS." Available at: https://files.igs.org/pub/resource/pubs/workshop/2024/IGSWs-2024-PS0504-Deng-Deformation_Monitoring_on_Laacher_See_Volcano_by_GNSS.pdf.
127. Hensch, M. *et al.* (2019) "Deep low-frequency earthquakes reveal ongoing magmatic recharge beneath Laacher See Volcano (Eifel, Germany)," *Geophysical Journal International*, 216(3), pp. 2025–2036. Available at: <https://doi.org/10.1093/gji/ggy532>.
128. "Is Germany's Active Volcano Awakening?" (2019) *Armstrong Economics*, 16 May. Available at: <https://www.armstrongeconomics.com/international-news/nature/germanys-active-volcano-awakening/> (Accessed: March 16, 2026).
129. Secretariat of the Pacific Regional Environment Programme (2021) "Volcanoes of the World - Global Volcanism Program". Available at: <https://fsm-data.sprep.org/dataset/volcanoes-world-global-volcanism-program> (Accessed: March 16, 2026).
130. NASA/GSFC/SED/ESD/TISL/GESDISC (2025) *Multi-Satellite Air Quality Sulfur Dioxide (SO₂) Database Long-Term L4 Global V2 (MSAQSO2L4) at GES DISC - NASA Open Data Portal*. Available at: <https://data.nasa.gov/dataset/multi-satellite-air-quality-sulfur-dioxide-so2-database-long-term-l4-global-v2-msaqso2l4-a-d5d7e> (Accessed: March 16, 2026).
131. World Economic Forum "NASA tracks volcanic eruption signs from space". Available at: <https://www.weforum.org/videos/nasa-volcanic-eruptions/> (Accessed: March 16, 2026).
132. "Advanced Very-High-Resolution Radiometer" (2025) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Advanced_Very-High-Resolution_Radiometer&oldid=1330309367 (Accessed: March 16, 2026).
133. "Sensing Remote Volcanoes - NASA Science" (2004). Available at: <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/sensing-remote-volcanoes/> (Accessed: March 16, 2026).
134. Carter, J. (2022) *Earth Is Suddenly Spinning Faster. Why Our Planet Just Recorded Its Shortest Day Since Records Began*, *Forbes*. Available at: <https://www.forbes.com/sites/jamiecartereurope/2022/07/28/earth-is-suddenly-spinning-faster-why-our-planet-just-recorded-its-shortest-day-since-records-began/> (Accessed: March 16, 2026).
135. Franco, L. (2024) *Earth's Rotation Confirmed to Have Slowed Down, Inner Core Appears to be Reversing and Backtracking*, *Nature World News*. Available at: <https://www.natureworldnews.com/articles/62027/20240617/earths-rotation-confirmed-slowed-down-inner-core-appears-reversing-backtracking.htm> (Accessed: March 16, 2026).
136. Livermore, Philip W., Hollerbach, R. and Finlay, C.C. (2017) "An accelerating high-latitude jet in Earth's core," *Nature Geoscience*, 10(1), pp. 62–68. Available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo2859>.
137. Jeffries, E. (2025) *Earth's Magnetic North Pole Is Shifting Toward Siberia and Raising Questions About Unusual Movement*, *Smithsonian Magazine*. Available at: <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/earths-magnetic-north-pole-is-shifting-toward-siberia-and-raising-questions-about-unusual-movement-180985892/> (Accessed: March 16, 2026).
138. *World Magnetic Model Out-of-Cycle Release* (2019) *National Centers for Environmental Information (NCEI)*. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/news/world-magnetic-model-out-cycle-release> (Accessed: March 16, 2026).

139. Paris, F. (2019) "As Magnetic North Pole Zooms Toward Siberia, Scientists Update World Magnetic Model," *NPR*, 4 February. Available at: <https://www.npr.org/2019/02/04/691471616/as-magnetic-north-pole-zooms-toward-siberia-scientists-update-world-magnetic-mod> (Accessed: March 16, 2026).
140. Andronico, D. *et al.* (2021) "Uncovering the eruptive patterns of the 2019 double paroxysm eruption crisis of Stromboli volcano," *Nature Communications*, 12(1), p. 4213. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24420-1>.
141. Giacomuzzi, G. *et al.* (2024) "Tracking transient changes in the plumbing system at Campi Flegrei Caldera," *Earth and Planetary Science Letters*, 637, p. 118744. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2024.118744>.
142. Whitt, K.K. (2021) *EarthSky* | *Taupo supervolcano needs monitoring, scientists say*. Available at: <https://earthsky.org/earth/taupo-supervolcano-needs-monitoring/> (Accessed: March 16, 2026).
- GeoNet (2022) Taupō Volcano: Volcanic Alert Level raised to Level 1. Ongoing earthquakes and deformation indicating minor volcanic unrest. Available at: <https://www.geonet.org.nz/vabs/6WkpJjHluMfBLGRAYmIQjX> (Accessed: March 16, 2026).
143. *Earth's Magnetic Field Is Fading* (2004) *Science*. Available at: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/earths-magnetic-field-is-fading> (Accessed: March 16, 2026).
144. *Are the Earth's poles about to flip?* | *PBS News* (2013). Available at: <https://www.pbs.org/newshour/nation/are-the-earths-poles-about-the-flip> (Accessed: March 16, 2026).
- Zolfagharifard, E. (2014) *Forget global warming, it's the MAGNETOSPHERE we need to worry about*, *Mail Online*. Available at: <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2545465/Forget-global-warming-worry-MAGNETOSPHERE-Earths-magnetic-field-collapsing-affect-climate-wipe-power-grids.html> (Accessed: March 16, 2026).
145. *Our protective shield*. Available at: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm/Our_protective_shield (Accessed: March 16, 2026).
- Our protective shield* (2021). Available at: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2021/08/Our_protective_shield (Accessed: March 16, 2026).
146. Dickerson, K. (2014) *Earth's Magnetic Field Is Weakening 10 Times Faster Now*, *Live Science*. Available at: <https://www.livescience.com/46694-magnetic-field-weakens.html> (Accessed: March 16, 2026).
147. Scientific American (2014) *Earth's Magnetic Field Flip Could Happen Sooner Than Expected*, *Scientific American*. Available at: <https://www.scientificamerican.com/article/earth-s-magnetic-field-flip-could-happen-sooner-than-expected/> (Accessed: March 16, 2026).
- Zolfagharifard, E. (2018) *Earth's magnetic poles show signs they are about to FLIP*, *Mail Online*. Available at: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-5334421/Earths-magnetic-poles-signs-FLIP.html> (Accessed: March 16, 2026).
148. "South Atlantic Anomaly" (2025) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=South_Atlantic_Anomaly&oldid=1326326002 (Accessed: March 16, 2026).

149. Geggel, L. (2020) *The north magnetic pole is leaving Canada for Siberia. These “blobs” may be the reason why.*, *Live Science*. Available at: <https://www.livescience.com/magnetic-north-pole-to-siberia.html> (Accessed: March 16, 2026).
150. *Swarm reveals growing weak spot in Earth’s magnetic field* (2025). Available at: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/Swarm/Swarm_reveals_growing_weak_spot_in_Earth_s_magnetic_field (Accessed: March 16, 2026).
- Finlay, C.C., Kloss, C. and Gillet, N. (2025) “Core field changes from eleven years of *Swarm* satellite observations,” *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 368, p. 107447. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2025.107447>.
151. Pare, S. (2025) *A massive weak spot in Earth’s magnetic field is growing, scientists discover*, *Live Science*. Available at: <https://www.livescience.com/planet-earth/a-massive-weak-spot-in-earths-magnetic-field-is-growing-scientists-discover> (Accessed: March 16, 2026).
152. “How NASA Tracked the Most Intense Solar Storm in Decades - NASA Science” (2024), 16 May. Available at: <https://science.nasa.gov/science-research/heliophysics/how-nasa-tracked-the-most-intense-solar-storm-in-decades/> (Accessed: March 16, 2026).
153. iMeteo.sk (2024) *A už fakt niečo nie je v poriadku! Polárna žiara získala ZELENÉ farby, čo je u nás vzácnosťou*, *iMeteo.sk*. Available at: <https://www.imeteo.sk/spravy/a-uz-fakt-nieco-nie-je-v-poriadku-polarna-ziara-ziskala-zelene-farby-co-je-u-nas-vzacnostou> (Accessed: March 16, 2026).
154. “Auroras - NASA Science” (2025), 4 February. Available at: <https://science.nasa.gov/sun/auroras/> (Accessed: March 16, 2026).
155. *Polární záře z ČR - Optické úkazy v atmosféře*. Available at: <http://ukazy.astro.cz/polar.php> (Accessed: March 16, 2026).
156. *Solar Cycle Progression | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center*. Available at: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (Accessed: March 16, 2026).
157. *Severe Magnetic Storm-January 6, 2025 | U.S. Geological Survey* (2025). Available at: <https://www.usgs.gov/programs/geomagnetism/science/severe-magnetic-storm-january-6-2025> (Accessed: March 16, 2026).
158. “Near Miss: The Solar Superstorm of July 2012 - NASA Science” (2014), 22 July. Available at: https://science.nasa.gov/science-research/planetary-science/23jul_superstorm/ (Accessed: March 16, 2026).
159. Rohde, R. (2024) “August 2024 Temperature Update,” *Berkeley Earth*, 2 October. Available at: <https://berkeleyearth.org/august-2024-temperature-update/> (Accessed: March 16, 2026).
160. Rand, D. (2025) “August 2025 Temperature Update,” *Berkeley Earth*, 17 September. Available at: <https://berkeleyearth.org/august-2025-temperature-update/> (Accessed: March 16, 2026).
161. AUBOURG, L. (2024) *2023’s record heat partly driven by “mystery” process: NASA scientist*. Available at: <https://phys.org/news/2024-01-driven-mystery-nasa-scientist.html> (Accessed: March 16, 2026).
162. Rosenthal, Y., Linsley, B.K. and Oppo, D.W. (2013) “Pacific Ocean Heat Content During the Past 10,000 Years,” *Science*, 342(6158), pp. 617–621. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.1240837>.
163. Meinen, C.S. *et al.* (2020) “Observed Ocean Bottom Temperature Variability at Four Sites in the Northwestern Argentine Basin: Evidence of Decadal Deep/Abysal Warming Amidst Hourly to Interannual Variability During 2009–2019,” *Geophysical Research Letters*, 47(18), p. e2020GL089093. Available at: <https://doi.org/10.1029/2020GL089093>.

164. Holden, E. (2020) “Temperatures of deepest ocean rising quicker than previously thought,” *The Guardian*, 14 October. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2020/oct/14/enormous-amount-of-heat-even-deepest-ocean-is-warming-study> (Accessed: March 16, 2026).
165. Frey, D.I., Morozov, E.G. and Smirnova, D.A. (2023) “Sea level anomalies affect the ocean circulation at abyssal depths,” *Scientific Reports*, 13(1), p. 20829. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48074-9>.
166. Monroe, R. and Diego, U. of C.-S. (2025) *Study shows acceleration of global mean ocean circulation since 1990s*. Available at: <https://phys.org/news/2020-02-global-ocean-circulation-1990s.html> (Accessed: March 16, 2026).
167. Bryden, H.L. *et al.* (2014) “Impact of a 30% reduction in Atlantic meridional overturning during 2009–2010.” In situ Observations/All Depths/Deep Seas: North Atlantic/Current Field. Available at: <https://doi.org/10.5194/osd-11-789-2014>.
168. “Why is the North Atlantic breaking heat records?” (2023), 15 June. Available at: <https://www.sciencenews.org/article/north-atlantic-heat-record-sea-surface-temperature> (Accessed: March 16, 2026).
169. “2010 eruptions of Eyjafjallajökull” (2026) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=2010_eruptions_of_Eyjafjallaj%C3%B6kull&oldid=1339641370 (Accessed: March 16, 2026).
170. Ditlevsen, P. and Ditlevsen, S. (2023) “Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation,” *Nature Communications*, 14(1), p. 4254. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>.
- Carrington, D. and editor, D.C.E. (2023) “Gulf Stream could collapse as early as 2025, study suggests,” *The Guardian*, 25 July. Available at: <https://www.theguardian.com/environment/2023/jul/25/gulf-stream-could-collapse-as-early-as-2025-study-suggests> (Accessed: March 16, 2026).
- Paddison, L. (2023) *A crucial system of ocean currents is heading for a collapse that ‘would affect every person on the planet,’ CNN*. Available at: <https://www.cnn.com/2023/07/25/world/gulf-stream-atlantic-current-collapse-climate-scn-intl> (Accessed: March 16, 2026).
171. Ballarotta, M. *et al.* (2015) “Impact of the oceanic geothermal heat flux on a glacial ocean state.” *Climate Modelling/Modelling only/Pleistocene*. Available at: <https://doi.org/10.5194/cpd-11-3597-2015>.
- Scott, J.R., Marotzke, J. and Adcroft, A. (2001) “Geothermal heating and its influence on the meridional overturning circulation,” *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 106(C12), pp. 31141–31154. Available at: <https://doi.org/10.1029/2000JC000532>.
- Downes, S.M. *et al.* (2016) “The Transient Response of Southern Ocean Circulation to Geothermal Heating in a Global Climate Model,” *Journal of Climate*, 29(16), pp. 5689–5708. Available at: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0458.1>.
- Hofmann, M. and Morales Maqueda, M.A. (2009) “Geothermal heat flux and its influence on the oceanic abyssal circulation and radiocarbon distribution,” *Geophysical Research Letters*, 36(3). Available at: <https://doi.org/10.1029/2008GL036078>.
172. Crawford, W.C. *et al.* (2013) “Hydrothermal seismicity beneath the summit of Lucky Strike volcano, Mid-Atlantic Ridge,” *Earth and Planetary Science Letters*, 373, pp. 118–128. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.04.028>.

- Kamis, J.E. (2015) *Gulf Stream Shut Down Caused By Geological Heat Flow, Plate climatology*. Available at: <https://www.plateclimatology.com/gulf-stream-shut-down-caused-by-geological-heat-flow/> (Accessed: March 16, 2026).
173. “Earthquakes Linked to 2003 European Heat Wave: Implications for Global Warming-Evidence in the Adriatic and Mediterranean Basins (Revisited)” (2020). Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Earthquakes-Linked-to-2003-European-Heat-Wave%3A-for/33369dc72b64fe006e1deac8d0922ac08ba47687> (Accessed: March 31, 2026).
174. Molchanov, O. (2010) “About climate-seismicity coupling from correlation analysis,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(2), pp. 299–304. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-10-299-2010>.
175. Viterito, A. (2022) “1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History,” *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 29(5), pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2021.29.556271>.
176. *Climate change - Abrupt Changes, Earth History, Impacts | Britannica* (2026). Available at: <https://www.britannica.com/science/climate-change/Abrupt-climate-changes-in-Earth-history> (Accessed: March 16, 2026).
177. Staff, S. (2020) “Scientists: Greenland’s Ice Loss This Century on Track to Be Worst in 12,000 Years,” *ScienceAlert*, 30 September. Available at: <https://www.sciencealert.com/losing-greenland-s-ice-will-raise-seas-higher-than-any-level-seen-in-12-000-years> (Accessed: March 16, 2026).
178. Heinrich, H. (1988) “Origin and Consequences of Cyclic Ice Rafting in the Northeast Atlantic Ocean During the Past 130,000 Years,” *Quaternary Research*, 29(2), pp. 142–152. Available at: [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(88\)90057-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90057-9).
179. Max, L. *et al.* (2022) “Subsurface ocean warming preceded Heinrich Events,” *Nature Communications*, 13(1), p. 4217. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31754-x>.
180. Cooper, A. *et al.* (2015) “Abrupt warming events drove Late Pleistocene Holarctic megafaunal turnover,” *Science*, 349(6248), pp. 602–606. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.aac4315>.
181. Sun, N. *et al.* (2020) “Volcanic origin for Younger Dryas geochemical anomalies ca. 12,900 cal B.P.,” *Science Advances*, 6(31), p. eaax8587. Available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax8587>.
182. Abbott, P. *et al.* (2021) “Volcanic climate forcing preceding the inception of the Younger Dryas: Implications for tracing the Laacher See eruption,” *Quaternary Science Reviews*, 274, p. 107260. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107260>.
- Baldini, J.U.L., Brown, R.J. and Mawdsley, N. (2018) “Evaluating the link between the sulfur-rich Laacher See volcanic eruption and the Younger Dryas climate anomaly,” *Climate of the Past*, 14(7), pp. 969–990. Available at: <https://doi.org/10.5194/cp-14-969-2018>.
183. *Washington’s hidden Glacier Peak volcano is among the most dangerous* (2018) *The Seattle Times*. Available at: <https://www.seattletimes.com/seattle-news/science/washingtons-hidden-glacier-peak-volcano-is-among-the-most-dangerous/> (Accessed: March 16, 2026).
184. Sun, N. *et al.* (2020) “Volcanic origin for Younger Dryas geochemical anomalies ca. 12,900 cal B.P.,” *Science Advances*, 6(31), p. eaax8587. Available at: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax8587>.
185. Dai, C. *et al.* (2020) “Characterization of the 2008 Phreatomagmatic Eruption of Okmok From ArcticDEM and InSAR: Deposition, Erosion, and Deformation,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(6), p. e2019JB018977. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019JB018977>.

186. *Katla | Icelandic, Glacier, Eruption | Britannica* (2026). Available at: <https://www.britannica.com/place/Katla> (Accessed: March 16, 2026).
187. Sansivero, F. "The First Epoch (15,000 - 10,600 years)". Available at: <https://www.ov.ingv.it/index.php/flegrei-storia-eruttiva/prima-epoca>.
188. *Sakurajima(2): Eruption History of Sakurajima Volcano*. Available at: https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/sakurajima/text/eng/exp01-2e.html# (Accessed: March 16, 2026).
189. Mörner, N.-A. (1977) "The Gothenburg Magnetic Excursion," *Quaternary Research*, 7, pp. 413–427. Available at: [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(77\)90031-X](https://doi.org/10.1016/0033-5894(77)90031-X).
- Chen, Z. *et al.* (2020) "Paleomagnetic evidence for the Gothenburg geomagnetic excursion during the Pleistocene–Holocene transition recorded in the Paleo-Danyang Lake, eastern China," *Journal of Asian Earth Sciences*, 201, p. 104140. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104140>.
190. Guskova, E. *et al.* (2007) "Manifestation of the Gothenburg geomagnetic field excursion in the Barents Sea bottom sediments," *Geomagnetizm i Aeronomiya - GEOMAGN AERON*, 47, pp. 781–786. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0016793207060126>.
191. Chen, Z. *et al.* (2020) "Paleomagnetic evidence for the Gothenburg geomagnetic excursion during the Pleistocene–Holocene transition recorded in the Paleo-Danyang Lake, eastern China," *Journal of Asian Earth Sciences*, 201, p. 104140. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104140>.
192. Liu, J. *et al.* (2020a) "The Norwegian–Greenland Sea, the Laschamps, and the Mono Lake Excursions Recorded in a Black Sea Sedimentary Sequence Spanning From 68.9 to 14.5 ka," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(8), p. e2019JB019225. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019JB019225>.
193. Bertagnini, A. *et al.* (1998) "The Pomici di Base plinian eruption of Somma-Vesuvius," *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 83(3), pp. 219–239. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00025-0](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00025-0).
- Eruptive history*. Available at: <https://www.protezionecivile.gov.it/en/approfondimento/eruptive-history/> (Accessed: March 16, 2026).
- Global Volcanism Program | Vesuvius* (1999) *Smithsonian Institution | Global Volcanism Program*. Available at: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=211020> (Accessed: March 16, 2026).
194. McConnell, J.R. *et al.* (2017) "Synchronous volcanic eruptions and abrupt climate change ~17.7 ka plausibly linked by stratospheric ozone depletion," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(38), pp. 10035–10040. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1705595114>.
- Jex, C. (2017) *Volcanic eruptions hastened the end of the last ice age*. Available at: <https://www.sciencenordic.com/climate-change-denmark-geology/volcanic-eruptions-hastened-the-end-of-the-last-ice-age/1448735> (Accessed: March 16, 2026).
195. Barbetti, M.F. and McElhinny, M.W. (1976) "The Lake Mungo geomagnetic excursion," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 281(1305), pp. 515–542. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.1976.0048>.
196. Whitt, K.K. (2021) *EarthSky | Taupo supervolcano needs monitoring, scientists say*. Available at: <https://earthsky.org/earth/taupo-supervolcano-needs-monitoring/> (Accessed: March 16, 2026).
- Wilson, F.I.-K., S.J. Barker, B. Smith, C.J.N. (2020) "Implications of a Supervolcano's Seismicity," *Eos*, 5 March. Available at: <https://eos.org/science-updates/implications-of-a-supervolcanos-seismicity> (Accessed: March 16, 2026).

- “Oruanui eruption” (2026) *Wikipedia*. Available at: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Oruanui_eruption&oldid=1335449906 (Accessed: March 16, 2026).
197. Barbetti, M.F. and McElhinny, M.W. (1976) “The Lake Mungo geomagnetic excursion,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 281(1305), pp. 515–542. Available at: <https://doi.org/10.1098/rsta.1976.0048>.
 198. Benson, L. et al. (2003) “Age of the Mono Lake excursion and associated tephra,” *Quaternary Science Reviews*, 22(2), pp. 135–140. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00249-4](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00249-4).
 199. *Kagoshima blast 30,000 years ago dumped ash in Tokyo | The Asahi Shimbun: Breaking News, Japan News and Analysis* (2022) *The Asahi Shimbun*. Available at: <https://www.asahi.com/ajw/articles/14532350> (Accessed: March 16, 2026).
 200. Liu, J. et al. (2020) “The Norwegian-Greenland Sea, the Laschamps, and the Mono Lake Excursions Recorded in a Black Sea Sedimentary Sequence Spanning From 68.9 to 14.5 ka,” *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(8), p. e2019JB019225. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019JB019225>.
 201. Cooper, A., Turney, C.S.M., et al. (2021) “A global environmental crisis 42,000 years ago,” *Science*, 371(6531), pp. 811–818. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.abb8677>.

Cooper, A. and Turney, C. (2020) *The Adams Event, a geomagnetic-driven environmental crisis 42,000 years ago*. EGU2020-12314. Copernicus Meetings. Available at: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-12314>.
 202. Silleni, A. et al. (2020) “The Magnitude of the 39.8 ka Campanian Ignimbrite Eruption, Italy: Method, Uncertainties and Errors,” *Frontiers in Earth Science*, 8. Available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2020.543399>.
 203. Sansivero, F. “*The Campanian Ignimbrite*”. Available at: <https://www.ov.ingv.it/index.php/flegrei-storia-eruttiva/le-eruzioni-principali/ignimbrite-campana>
 204. *Global Volcanism Program | Gorely* (2014) *Smithsonian Institution | Global Volcanism Program*. Available at: <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=300070> (Accessed: March 16, 2026).
 205. Fedele, F. et al. (2003) “The Campanian Ignimbrite Eruption, Heinrich Event 4, and Palaeolithic Change in Europe: A High-Resolution Investigation,” *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, pp. 301–325. Available at: <https://doi.org/10.1029/139GM20>.
 206. Cooper, A., Turney, C.S.M., et al. (2021) “A global environmental crisis 42,000 years ago,” *Science*, 371(6531), pp. 811–818. Available at: <https://doi.org/10.1126/science.abb8677>.

Davis, N. and correspondent, N.D.S. (2021) “End of Neanderthals linked to flip of Earth’s magnetic poles, study suggests,” *The Guardian*, 18 February. Available at: <https://www.theguardian.com/science/2021/feb/18/end-of-neanderthals-linked-to-flip-of-earths-magnetic-poles-study-suggests> (Accessed: March 16, 2026).
 207. ALLATRA International Public Movement (2025). Nanoplastics in the biosphere. From molecular impact to planetary crisis. Available at: https://allatra.org/storage/app/media/reports/en/Nanoplastics_in_the_Biosphere_Report.pdf (Accessed: March 16, 2026).