

Почему землетрясения после гидроразрыва ведут себя по-разному: ученые нашли причину отсутствия предупреждающих толчков



Дата публикации: 29.08.2026

Гидравлический разрыв пласта позволяет добывать нефть и газ из плотных горных пород, однако закачка больших объемов жидкости под давлением способна менять напряжение в земной коре и активировать существующие разломы. В результате возникают индуцированные землетрясения. Новое исследование показывает, что их развитие значительно сложнее, чем простая зависимость между количеством закачанной жидкости и силой подземных толчков.

Международная группа ученых проанализировала сейсмическую активность на западе Канады за десять лет — с 2014 по 2024 год. Исследователи составили каталог примерно из 70 000 землетрясений и отдельно изучили 77 событий магнитудой 3 и выше, связанных с гидроразрывом пласта. Результаты работы опубликованы в журнале Science.

Ученых особенно интересовали форшоки — небольшие землетрясения,

происходящие незадолго до более сильного события. Если между ними существует устойчивая закономерность, такие слабые толчки потенциально могут использоваться как один из сигналов повышающейся сейсмической опасности.

Оказалось, что форшоки действительно встречались очень часто. У 71 из 77 изученных землетрясений магнитудой не менее 3 в течение пяти предыдущих дней регистрировались небольшие толчки на расстоянии до пяти километров от будущего очага.

Но количество таких событий различалось колоссально. Перед одним землетрясением ученые зарегистрировали более 700 слабых толчков, тогда как шесть более крупных событий произошли вообще без обнаруженных форшоков в выбранном временном и пространственном диапазоне.

На первый взгляд причиной могла быть сама технология добычи: чем быстрее и больше жидкости закачивается под землю, тем активнее должна становиться окружающая порода. Однако анализ показал, что скорость и объем закачки не способны полностью объяснить наблюдаемую разницу.

Ключевым фактором оказалась местная геология. Некоторые разломы значительно чувствительнее к изменению давления жидкости и уже находятся близко к состоянию, при котором накопленное напряжение способно вызвать сдвиг. В таких местах закачка может сопровождаться множеством небольших землетрясений перед более крупным событием.

В других районах картина принципиально иная. Разлом может приблизиться к критическому состоянию без заметной серии слабых толчков. Поэтому отсутствие форшоков нельзя считать надежным признаком безопасности: потенциально опасное индуцированное землетрясение способно начаться практически без выраженного сейсмического предупреждения.

Чтобы разобраться в механизме, ученые сопоставили данные сейсмостанций с информацией о закачке жидкости, геологическим строением территории и измерениями деформации поверхности. В результате они предложили несколько сценариев подготовки разрыва.

Закачиваемая жидкость способна проникать в трещины и изменять давление в породах. Это может запускать медленное движение по разлому, которое почти невозможно заметить обычными сейсмическими методами. Такое движение постепенно ослабляет участок будущего разрыва либо передает дополнительное напряжение соседней заблокированной части разлома.

Другой сценарий больше напоминает цепную реакцию. Первое небольшое

землетрясение перераспределяет напряжение и способствует возникновению следующего. Последовательность слабых событий постепенно распространяется по разлому, пока не оказывается затронут участок, способный вызвать более сильный толчок.

Это объясняет необычную ситуацию, когда одинаковая промышленная операция в разных местах приводит к совершенно разным результатам. Земная кора не является однородной средой: каждый разлом имеет собственную геометрию, напряженное состояние, проницаемость и историю движения.

Результаты имеют непосредственное значение для безопасности добычи нефти и газа. Сейчас во многих регионах используются так называемые светофорные протоколы. Пока сейсмичность остается низкой, работы продолжаются; при достижении определенных порогов операторы должны уменьшить интенсивность закачки, а при более сильных толчках — остановить ее.

Проблема заключается в том, что универсальные пороги могут недостаточно хорошо отражать реальную опасность. Если конкретный разлом способен перейти к более крупному землетрясению без многочисленных форшоков, система, ориентированная преимущественно на рост числа слабых толчков, может дать слишком мало времени для реакции.

Авторы работы предлагают учитывать региональную чувствительность разломов, геодезические измерения деформации поверхности, сейсмические наблюдения в реальном времени и физические модели развития разрыва. Иными словами, оценивать следует не только то, сколько произошло землетрясений, но и геологическую систему, в которой они возникают.

Исследование не означает, что теперь можно точно предсказывать землетрясения, вызванные гидроразрывом. Скорее оно показывает пределы существующих методов предупреждения. Большое количество форшоков может свидетельствовать о развитии опасного процесса, но их отсутствие еще не означает, что разлом остается стабильным.

Ссылка: «Продуктивность форшоков и зарождение разрывов при землетрясениях, вызванных инъекциями, в западной Канаде» [DOI: 10.1126/science.aed9893](https://doi.org/10.1126/science.aed9893).