

**Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт**

**Министерство науки, высшей школы и технической политики  
Российской Федерации**

**Препринт N 382**

**МЕХАНИЗМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ**

**Иудин Д.И., Шалашов Г.М.**

**Нижний Новгород 1994**

Иудин Д.И., Шалашов Г.М.

## **МЕХАНИЗМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ**

Препринт N 382, Нижний Новгород: НИРФИ, 1994.- 8 с.

УДК 551.42

В работе предложена новая концепция сейсмогенеза. Показано, что сейсмическая активность обусловлена выделением в самостоятельные фазы легких компонент геофизического субстрата при его тектоническом перемешивании. Кластеризация легкой фазы в масштабах, превышающих критический, приводит к нарушению механического равновесия субстрата и его разрушению. В рамках предлагаемого подхода получена аналитическая форма закона повторяемости сейсмических событий Гуттенберга-Рихтера. Введены понятия прочностных и гравитационных землетрясений.

Дмитрий Игоревич Иудин  
Геннадий Михайлович Шалашов

## **МЕХАНИЗМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ**

---

Подписано в печать 11.02.94 Формат 60x84.16.  
Бумага писчая. Печать офсетная. Объем 0,95 усл. пл.  
Заказ 5374. Тираж 100.

---

Отпечатано на ротапринте НИРФИ.

Колоссальные запасы внутренней энергии Земли обуславливают глобальные потоки тепла и материала, время существования которых соизмеримо с временем геологической жизни планеты. Наоборот, события сейсмической жизни имеют существенно более скромные пространственно-временные масштабы. И, таким образом, можно рассматривать тектоническое перемешивание как своеобразную квазистационарную и квазиоднородную накачку сейсмогенеза, а всю нашу планету как гигантский распределенный генератор сейсмичности. Какие физические процессы лежат в основе механизма генерации? Существующая сегодня сейсмологическая доктрина отвечает на этот вопрос в рамках теории прочности, которая, основываясь на гипотезе самоподобия процесса разрушения, отождествляет картину деформирования гигантских объектов с результатами миниатюрных лабораторных исследований [1, 2].

Однако, представление о масштабной инвариантности сейсмогенеза не является вполне адекватным. Динамика сейсмических процессов существенно зависит от соотношения прочности и гравитации, а роль последней растет пропорционально масштабу событий.

В настоящей работе в качестве физического процесса, обеспечивающего механизм сейсмической активности рассматривается выделение легких компонент первоначально гомогенного субстрата в самостоятельные фазы. Такое превращение может быть вызвано уменьшением давления или изменением температуры, химическими реакциями или радиактивным распадом, диффузией компонент или комплексом перечисленных условий. При этом речь может идти либо о дегазации твердого раствора, либо о вышлывании жидкой фракции, либо о комбинации этих возможностей. Для определенности мы будем рассматривать дегазацию субстрата.

Выделение газа рано или поздно может привести к катастрофе: пузырь сразмерами порядка

$$R_g = \frac{\sigma_m}{\rho g} \approx 10^3 \text{ м} , \quad (1)$$

где  $\rho, \sigma$  соответственно плотность и предел прочности субстрата,  $g$  - модуль ускорения свободного падения, неустойчив. Перепады давления на границе раздела фаз разрушают субстрат и пузырь "всплывает" со скоростью

$$v = \sqrt{\frac{\sigma_m}{\rho}} \approx 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}} . \quad (2)$$

Разумеется катастрофа происходит существенно раньше нежели в объеме хаотически заполненном зернами выделяющейся фазы успевает сформироваться одна большая полость. Неустойчивость развивается уже тогда, когда в ансамбле микропузырей происходит "полимеризация" - часть пузырей слипается в длинные цепи, образуя гигантские кластеры легкой компоненты. Кластеризация осуществляется как перколяционный фазовый переход при достижении долей заполненного пузырями объема  $V$  некоторого критического значения  $V_c$ . Величина имеет вид

$$V = \frac{4\pi}{3} \int_0^{\infty} a^3 f(a) da , \quad (3)$$

где  $a$  - радиус пузырей,  $f(a)$  - функция их распределения по размерам.

Пользуясь аналогией с задачей сфер теории протекания [3] можно дать следующую оценку критического значения

$$V_c < 0,3 . \quad (4)$$

Формированием кластера заканчивается длительный межсейсмический период и начинается существенно более короткая предсейсмическая стадия, характеризующаяся выравниванием давления газа по объему кластера. Эта часть сценария осуществляется как процесс аналогичный процессу Джоуля-Томсона. Возникающие при этом возмущения литостатического давления пропорциональны корреляционному радиусу системы, который равен размеру максимального кластера и определяет объем очага будущего события.

При перколяции очаговая зона готовящегося события стремится вести себя как один большой пузырь. Поэтому рассматриваемый механизм

является, по существу, механизмом дифференциации контрастных компонент в гравитационном поле. Причем размер очага играет роль своеобразного параметра порядка: его изменение приводит к качественно различающимся сценариям разворачивающихся событий. Действительно, если корреляционный радиус меньше величины

$$R_{\sigma} = \frac{\sigma^2}{\rho g \mu} \approx 1 \text{ м} \quad (5)$$

( $\mu$  - модуль Юнга), то в материале протекают релаксационные процессы, уменьшающие площадь границы раздела фаз, и система совершенно безобидна в сейсмическом плане. Но уже при  $R \geq R_{\sigma}$  субстрат в очаговой зоне начинает демонстрировать неупругое поведение в репертуаре ограниченном локальными термодинамическими условиями. Выделяемая им энергия пропорциональна объему очага и оценивается величиной

$$\xi_{\sigma} = \frac{\sigma^2}{\mu} R^3 \quad (6)$$

При  $R \geq R_g$  возмущения литостатического давления превышают предел прочности породы. Происходит гравитационное обрушение твердой фазы субстрата, сопровождающееся кумулятивным движением газа. При этом в очаге выделяется кинетическая энергия перемещающегося в поле тяжести материала

$$E_g = \rho g R^4 \quad (7)$$

По аналогии с метеоритными кратерами, события с размерами очага в интервале  $[R_{\sigma}, R_g]$  можно называть "прочностными" землетрясениями, а с размерами превышающими  $R_g$  - "гравитационными".

Обратим внимание на термические последствия сейсмических событий в очагах различных масштабов. Поскольку, разогрев происходит крайне неравномерно, мы сможем оценить только среднее повышение температуры. Вся энергия очага в конечном счете переходит в тепловую, которая без учета частичного плавления и испарения пород оценивается величиной

$$Q = \rho c \Delta T R^3 \quad (8)$$

Здесь  $C \approx 10^3$  Дж/кгК есть характерная величина теплоемкости пород, а  $\Delta T$  - среднее возрастание температуры материала. Для "прочностных" событий средний нагрев по объему очага не зависит от его размеров и оценивается величиной

$$\Delta T \approx \frac{\sigma^2}{\mu c} \quad (9)$$

Однако, для очагов с размерами большими  $R_g$  температура разогрева материала растет пропорционально радиусу очага

$$\Delta T \approx \frac{gR}{c} \quad (10)$$

При этом температура газа достигает величины

$$T = \frac{\rho g R}{c_0 \rho_0} \approx 10^4 \text{ К} \quad (11)$$

где  $c_0, \rho_0$  - удельная теплоемкость и плотность газа.

Естественно, что сильный разогрев при значительном давлении вызывает ионизацию газа и образование свободных радикалов, инициирующих целый ряд геофизических и геохимических превращений. В частности, возможно развитие детонационных реакций, существенно влияющих на энергетический спектр крупномасштабных событий [4].

Возникающие при перколяционном фазовом переходе кластеры легкой компоненты являются фрактальными структурами, и, следовательно, обладают фундаментальным свойством самоподобия [5].

Это означает, в частности, что отношение среднего числа  $N(R_1)$  событий масштаба  $R_1$  к числу  $N(R_2)$  событий масштаба  $R_2$  в том же объеме за тот же период времени, определяется выражением

$$\frac{N(R_1)}{N(R_2)} = \left( \frac{R_1}{R_2} \right)^{-d} \quad (12)$$

где  $d$  - хаусдорфова размерность фрактальной структуры.

Величина фрактальной размерности существенно зависит от режима агрегации. В нашем случае имеет место кластер - кластерная ассоциация

монодисперсных элементов и хаусдорфова размерность фрактальной структуры близка к двум:  $d \leq 2$  [6]

Полная энергия, выделяемая в очаге крупного события, пропорциональна четвертой степени его размеров.

Поэтому, сопоставляя (7) и (12), мы получаем

$$N(R) \approx E^{-\frac{d}{4}} \quad (13)$$

Совершенно иная зависимость обнаруживается наблюдателем сейсмической активности, который способен оценить  $E_c$  энергию излучаемых очагом упругих волн. При прочих равных условиях (расстояние до эпицентра, глубина гипоцентра), акустическая энергия главного толчка, оцениваемая в точке наблюдения пропорциональна объему очага. Следовательно, наблюдатель обнаружит зависимость

$$N(R) \approx E_c^{-\frac{d}{3}} \quad (14)$$

Используя определение магнетуды [7]

$$Lg E_c (\text{Дж}) = 4,8 + 1,5M \quad (15)$$

совместно с (12) и (14) мы получаем

$$Lg \frac{N(R_1)}{N(R_2)} = 0,5d(M_2 - M_1) \quad (16)$$

Последнее соотношение при  $d = 1,8$  совпадает с эмпирическим законом повторяемости Гуттенберга-Рихтера [7]. Закон (16) является следствием масштабной инвариантности процесса кластерзации легкой фазы. Однако, динамика разрушения очага, обусловленная гравитацией, такой инвариантностью не обладает.

В заключении мы подчеркиваем, что в рамках предлагаемой концепции находят свое естественное объяснение многочисленные экспериментальные данные о предвестниках готовящихся событий. Так, сейсмическая аномалия обусловлена уменьшением сжимаемости субстрата, геохимические изменения - транспортом легкой компоненты, электромагнитные - ионизацией газа и т.д. При этом легко обнаруживается формальное сходство с делатантно-диффузионной моделью [8]. Это связано с тем, что если в качестве элементарного размера задачи вместо радиуса пузыря рассматривать грифитовский радиус, то мы получим своеобразную конфигурационную аналогию с процессом перколяции микротрещин в континуальной механике.

## Литература.

1. Владимиров В.И. Основы физики разрушения твердых тел. /Физические основы прогнозирования разрушения горных пород при землетрясениях. М.: Наука, 1987.
2. Садовский М.А., Болховитинов А.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987.
3. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. М.: Наука, 1982.
4. Шаров Р.И. Тектоническое землетрясение как неравновесный термодинамический процесс разрушения горных пород. Физика Земли т.5, с.121, 1992.
5. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. - N.Y.: Freeman 1983.
6. Witten T.A., Sander L.M. // Phys. Rev. Lett. - v.47, p.1400, 1981.
7. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985.
8. Дж. Райс Механика очага землетрясений. М.: Мир, 1983.