

# ПРИРОДА

117049, Москва, Мароновский пер., д. 26  
тел. : [095] 238-24-56; e-mail: byalko@landau.ac.ru

**№ 3 - 1999 г.**

**С.Д. Виноградов, В.С. Пономарев**

## **Экспериментальное изучение сейсмического режима**

© Природа

*Использование или распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции*



Образовательный сетевой выпуск  
**VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!**  
<http://www.techno.ru/vivovoco>

# Экспериментальное изучение сейсмического режима

С.Д.Виноградов, В.С.Пономарев

*Сергей Дмитриевич Виноградов, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Объединенного института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН. Область научных интересов — сейсмология, сейсмоакустические методы наблюдений.*

*Виталий Стефанович Пономарев, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник того же института. Занимается проблемами геомеханики, а также сейсмичностью Земли.*

**И**ЗУЧЕНИЕ физики землетрясений предполагает два аспекта — описание развития как отдельного очага, так и совокупности очагов, или сейсмического режима.

Эксперименты, проводившиеся в этой области, в своем подавляющем большинстве ориентированы на изучение процессов в отдельном очаге. Кроме того, они базировались на предположении, что землетрясение происходит в результате смещения бортов уже существующего разрыва.

Модель очага как скачкообразного движения бортов разрыва, взаимодействие которых определяется законами трения, впервые предложили В.Брейс и Дж.Байерли в 1966 г. Само это явление они назвали stick-slip (прерывистое скольжение). Их работы положили начало экспериментальному изучению очага землетрясения. В январском номере журнала «Nature» за прошлый год опубликован обзор, в котором рассмотрено 76 работ по этой тематике. Исследовались зависимости трения от температуры, свойств поверхности, величины нормальных напряжений, скорости движения и др.<sup>1</sup> Полученные закономерности применялись для объяснения особенностей сейсмического режима. В том же номере журнала помещена еще одна статья, в которой разрыв, возбуждающий землетрясения, представлен границей движущихся блоков с прослойкой измельченного материала<sup>2</sup>.

Не отрицая важности подобных исследований, мы все же должны заметить, что сейсмичность как результат разрушения среды (т.е. как результат образования новых разрывов) в них не рассматривается. Если принять, что смещение по бортам уже существующих

---

© С.Д.Виноградов, В.С.Пономарев

<sup>1</sup> Scholz C.H.// Nature. 1998. V.393. № 1. P.37—42.

<sup>2</sup> Marone C.//Ibid. P.69—72.

разрывов является главной причиной землетрясений, то тут же возникает ряд вопросов. Следует ли считать, что образование сети разрывов, смещение по которым возбуждает сейсмичность, завершилось в геологическом прошлом, а ныне мы наблюдаем только смещение уже по «готовым» разрывам? Если же разрывы продолжают возникать и в настоящем, то что же, их возникновение (в отличие от смещений по разрывам) протекает «бесшумно»? То, что мы знаем о разрушении материалов, свидетельствует как раз об обратном.

Разумно допустить, что в геологической среде происходит как смещение по готовым разрывам, так и образование новых. Но тогда возникает следующий вопрос: существуют ли какие-либо различия между землетрясениями, возбуждаемыми смещением по разрывам, и землетрясениями, происходящими при образовании новых разрывов?

Несмотря на очевидный смысл этих вопросов, однозначных, научно обоснованных ответов на них нет. Между тем экспериментальных работ, посвященных изучению сейсмического режима, немного. Причина этого отчасти в том, что внимание исследователей в первую очередь привлекал очаг большого землетрясения, рассматривавшийся как результат образования единичного «магистрального» разрыва. Отчасти же и в другом. Основным методом изучения сейсмического режима до последнего времени оставалась сейсмостатистика — теоретическое направление, рассматривающее сейсмичность как процесс хаотический, случайный. С точки зрения сейсмостатистического подхода множественное разрушение в его сейсмическом отражении — всего лишь своего рода генератор случайных событий, а универсальные особенности поведения множеств случайных событий достаточно хорошо изучены и без этого.

О явлении как о случайном нередко говорят тогда, когда причинные связи, которыми оно управляется, установить сложно. Это в какой-то мере относится и к сейсмичности. Последняя представляет собой результат совмест-

ного влияния целого ряда факторов, арена действия которых — глубокие недра Земли, недоступные для прямого наблюдения.

И все же возможность понять физическую основу сейсмического режима существует. В качестве аналогов естественной сейсмичности могут рассматриваться процессы разрушения горных пород в шахтах и твердых материалов в лабораторных условиях. В выполненной нами серии работ использовался метод акустической эмиссии, основанный на регистрации упругих импульсов, возникающих при образовании трещин или подвижек по уже имеющимся разрывам. По существу изучался своего рода «сейсмический режим» разрушаемых объектов в условиях, поддающихся контролю.

### ЗАКОН ПОВТОРЯЕМОСТИ

Если воспроизвести на экране дисплея карту одного из сейсмоактивных районов, а затем в виде вспышек разной яркости, соответствующей силе землетрясений, показывать последние в той очередности, в какой они следуют в каталоге, зритель увидит довольно хаотическую картину, в которой можно уловить лишь одну закономерность: чем вспышки ярче, тем они реже. Это наблюдение и лежит в основе закона повторяемости землетрясений: в совокупности сейсмических событий чем события значительней, тем они реже. Если построить в логарифмическом масштабе распределение числа землетрясений  $N$  по их энергии  $E$  (или магнитуде  $M$ ), то осредняющий их график изобразится прямой линией с отрицательным наклоном. Закон повторяемости обычно записывается в следующей форме:

$$\lg N = A - \gamma \lg E \quad \text{— для энергии;}$$

$$\lg N = a - bM \quad \text{— для магнитуды.}$$

Параметры графика повторяемости — наклон к оси абсцисс ( $\gamma$  и  $b$ ) и уровень ( $A$  и  $a$ ) — относятся к важнейшим количественным характеристикам сейсмического режима. Наклон графика выражает соотношение между числом сильных и

слабых сейсмических событий, или (уже в физической интерпретации) соотношения между числом больших и малых разрывов геологической среды. Уровень графика характеризует сейсмическую активность — суммарную интенсивность сейсмических проявлений на рассматриваемой сейсмоактивной территории. Эти параметры входят в основу метода количественного сейсмического районирования.

Попытки получить график повторяемости теоретически предпринимались многими исследователями. Несмотря на различие исходных посылок, распределение числа разрывов по энергии выводилось из априорных соображений, которые задают постоянную величину угла наклона. Исключение составляют работы К.И.Кузнецовой и Г.С.Подъяпольского<sup>3</sup>, в которых допускалось, что угол наклона может зависеть от свойств среды и условий процесса ее разрушения. Вместе с тем эта зависимость имеет весьма общий характер, получить какое-либо определенное соотношение пока трудно.

То, что распределение наиболее значительных землетрясений земного шара по их величине (магнитуде) подчиняется закону повторяемости, было обнаружено Б.Гутенбергом и К.Рихтером<sup>4</sup> в начале 50-х годов. Вскоре выяснилось, что закон носит универсальный характер и проявляется независимо от масштаба разрушаемых тел — от лабораторных образцов до крупных геологических структур. Это открыло возможность экспериментального моделирования землетрясений и физического объяснения закона повторяемости.

Одно из достоинств лабораторного изучения в том, что экспериментатор, варьируя условия опыта, может установить вклад того или иного фактора в общий процесс. Так, например, изменяя величину гранитных включений в цемен-

тных образцах, можно выяснить, каким образом влияет на разрушение среды степень ее неоднородности. В проведенной серии опытов образцы подвергались одноосному сжатию под прессом. Упругие импульсы, излучаемые образцом, воспринимались приемником, установленным на боковой грани образца. Импульсы затем усиливались и записывались соответствующей аппаратурой<sup>5</sup>.

Опыты показали, что количество упругих импульсов, излучаемых образцом, зависит от размера и фактуры включений. Большое количество их наблюдается у образцов с включениями мелкого и крупного щебня, меньше — с включениями из окатанной гальки, а меньше всего импульсов излучали образцы из чистого цемента.

Какое вероятное физическое содержание за этим кроется? Наиболее благоприятные условия для образования трещины создаются в местах концентрации напряжений. Число импульсов акустической эмиссии связано с общей конфигурацией поля напряжений, модифицированной локальными напряжениями вблизи имеющихся неоднородностей в образце.

У окатанной гальки число мест концентрации напряжений гораздо меньше, чем у битого щебня с острыми углами и изломами. Включения из мелкого щебня создают благоприятные условия для развития небольших трещин, поскольку в этом случае велико число мест концентрации напряжений небольшого объема.

Включения представляют собой и препятствия для роста трещин. При большом количестве мелких включений как бы уменьшается средняя величина «свободного пробега» трещин. В этом случае наклон графика распределения  $N(E)$  увеличивается. Добавка крупного щебня создает благоприятные условия для образования более крупных трещин — возникают места повышенных напряжений, занимающие сравнительно большие объемы. Это приводит к увеличению

<sup>3</sup> Кузнецова К.И. Схема распространения трещин в неоднородной среде и статистическая модель сейсмического режима // Исслед. по физике землетрясений. М., 1976. С.114—127; Подъяпольский Г.С. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1968. № 7. С.16—21.

<sup>4</sup> Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princ. Univ. Press, 1954.

<sup>5</sup> Виноградов С.Д. Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород. М., 1964; Он же. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений. М., 1989.

относительного количества крупных трещин и к уменьшению наклона графика.

Влияние прочности изучалось на пробах цемента с крупным (3—5 мм) кварцевым песком. Серии изготовлялись из одного замеса, однако процесс затвердевания и сушки проходил в разных условиях. Поэтому образцы обладали разной прочностью при одинаковом составе и при той же однородности. В результате оказалось, что наклон графиков повторяемости с увеличением прочности материала уменьшается.

Картину разрушения образца при том же одноосном сжатии можно варьировать, изменяя его напряженное состояние. Если образец поместить непосредственно между плитами пресса, он разрушается наклонными X-образно перекрещивающимися трещинами преимущественно сдвигового типа. Но, если между образцом и прессом положить свинцовые прокладки, уменьшающие силы трения на контакте, образец разрушается с образованием трещин отрыва, параллельных его свободным боковым поверхностям.

Разными видами разрушений определялись и неодинаковые величины разрушающей нагрузки. Если без прокладок образцы раскалывались при нагрузке 40—50 МПа, то со свинцовыми прокладками — при 25—30 МПа. При этом менялся и вид упругих импульсов. С прокладками они были более продолжительны, с большим числом колебаний. В целом результаты показывают, что изменение граничных условий нагрузки приводит к изменению вида разрушения и изменению уровня графиков повторяемости. Однако наклон при этом меняется мало. Невелики его изменения и при варьировании в весьма широких пределах скоростей деформации. Заметное увеличение угла наклона обнаруживается только при очень небольших скоростях деформаций. Скорее всего последние могут реализовываться преимущественно в виде вязкого или пластического течения.

К.Шольц поставил опыты, в которых образцы из гранита подвергались осевому сжатию в камере высокого давления.

При этом было установлено, что угол наклона графика повторяемости по мере увеличения всестороннего сжатия также увеличивается<sup>6</sup>.

В целом эксперименты показали, что наклон графиков повторяемости отнюдь не постоянен, как это априорно постулировалось в большинстве работ теоретического плана. Большое число мелких неоднородностей, понижение прочности, малые скорости деформации и рост всестороннего давления заметно увеличивают угол наклона.

### ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ

Для построения графика повторяемости необходимо накопление данных о достаточном большом числе землетрясений. На формирование такой базы данных, определяющей график, имеются различные точки зрения.

Допустим, что в вашем распоряжении имеется множество фишек, величина которых символизирует силу землетрясений, а сами они пронумерованы в порядке появления землетрясений во времени. Ваша задача: разместить фишки на плоскости стола в том порядке, в каком они бы располагались в процессе накопления данных.

Существует несколько вариантов решения этой задачи.

Самая общепринятая схема (ее придерживается большинство сейсмологов, рассматривающих сейсмический процесс как чисто случайный) такая: фишки в коробке хорошенько перемешиваются, высыпаются на стол, затем разравниваются в один слой. Нечто подобное должно происходить и в природе.

Исследователь, изучавший физические особенности очага отдельного землетрясения, примется за дело иначе. Он расположит самые большие фишки на столе произвольно, к каждой такой фишке присоединит собственный отряд, генетически с ней связанный. Отряд представляет собой иерархическое со-

<sup>6</sup> Scholz C.H. // Am. Geophys. Un. Trans. 1967. V.48. P.204.

общество, члены каждой ступени которого представлены в пропорциях, соответствующих графику повторяемости. Порядковый номер главной фишки — самый большой, т.е. все остальные фишки предшествуют ее появлению. Если довести эту схему до логического конца, сейсмичность предстанет как процесс подготовки главных толчков, протекающий в разных частях региона на разных стадиях развития.

Существует еще одна схема, рассматривающая сейсмичность как отражение процесса дробления геологической среды. В соответствии с ней первыми возникают преимущественно самые крупные трещины. Они расчленяют материал на более мелкие части («блоки», «отдельности») и сокращают длину свободного пробега последующих «дочерних» трещин, в свою очередь расчленяющих материал на еще более мелкие части, и т.д. Со временем материал насыщается все большим количеством трещин, длина которых в среднем постепенно уменьшается. Очевидно, что графики повторяемости, отвечающие этой схеме, для разных временных интервалов окажутся разными: в конце опыта они будут беднее сильными событиями по сравнению с его началом.

Какой же схеме следует природа? Эксперимент на этот вопрос прямого ответа не дает: варьируя условия опыта и способы представления данных, можно получить результаты, в большей или меньшей мере удовлетворяющие любой из этих схем.

Действительно, процесс излучения упругих импульсов нагруженным образцом производит впечатление процесса чисто случайного. Чтобы выделить в нем систематическую составляющую, требуется применение специальных методов. Экспериментальный прототип второй схемы положен в основу теории лавинонеустойчивого образования трещин и кинетической теории прочности. Эти теории и их приложения широко освещались как в специальной, так и в научно-популярной литературе<sup>7</sup>. Разрушения в соответствии с третьей схемой — схемой дробления — в разных вариантах

реализованы на плоских двухслойных моделях, разработанных А.Н.Ромашовым. Формирование объемных блочных структур было получено в опытах, поставленных Г.А.Соболевым, Х.О.Асратяном<sup>8</sup>. То, что развитие событий в какой-то мере подчиняется подобному сценарию, подтверждается уменьшением со временем максимальной энергии излучаемых образцом (испытывающим осевое сжатие) упругих импульсов. Эксперимент, таким образом, показывает, какие именно схемы разрушения возможны в принципе, но какую из них изберет натура — слово за ней самой.

Рассмотрим под этим углом зрения шахтную сейсмичность. Массив, в котором ведутся горные работы, вдруг начинает излучать множество упругих импульсов, своего рода шахтных землетрясений, на фоне которых время от времени возникают горные удары — внезапные взрывоподобные толчки. Они могут вызвать разрушение подземных выработок, иногда очень существенное, имеющее масштаб подземных катастроф.

На чрезвычайно удароопасных шахтах Североуральского бокситового рудника установлена система прецизионных сейсмологических наблюдений, позволяющая определять координаты очагов сейсмических импульсов с очень высокой точностью. Ошибка составляет около 25 м. В 80-х годах здесь ежегодно регистрировалось около тысячи событий с энергией от  $10^2$  до  $10^8$  Дж. Их совокупность подчинялась закону повторяемости почти идеально.

Если на вертикальный разрез разрабатываемого месторождения точками нанести положение сейсмических событий, исследователь увидит нечто похожее на продолговатую туманность с компактным ядром и более разреженным ореолом рассеяния. Ее ось симметрии — слегка наклонный пласт руды.

Подавляющее большинство «населения» облака составляют слабые собы-

<sup>7</sup> См., напр.: Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1974. № 10. С.107—112.

<sup>8</sup> Соболев Г.А., Асратян Х.О. // ДАН СССР. 1990. Т.315. № 2. С.345—348.

тия с энергией  $10^2$ — $10^5$  Дж (их тысячи). Выделив в такой «туманности» самые значительные события с энергией  $10^6$ — $10^8$  Дж (их десятки), мы увидим нечто неожиданное: наиболее значительные события, вместо того, чтобы возникать вперемешку со слабыми преимущественно в самой гуще, т.е. в ядре, там вообще не возникают, а располагаются в периферических частях. Явление было названо эффектом пространственной сепарации сейсмических событий по их энергии, или кратко — эффектом сепарации. Если расположить фишки в соответствии с полученной картиной, то недалеко от выработанных пространств (в ближней зоне) разместятся самые мелкие фишки, а по мере движения в глубь массива (дальнюю зону) их размеры в среднем будут возрастать.

Такое расположение фишек не соответствует ни схеме случайного рассеяния случайных событий, ни схеме их концентрации в зоне будущего магистрального разрыва. Если допустить, что развитие во времени процесса возникновения трещин сочетается с его центробежной экспансией в пространстве, то разрушение в основных чертах соответствует схеме дробления. Очевидно, что график повторяемости для ближней зоны, где породы уже сильно нарушены, должен быть круче, выше по уровню и бедней значительными событиями, чем для дальней зоны, где породы пока более прочны, более монолитны и процесс их разрушения только начался.

Эффект сепарации обнаруживается и при изучении тонкой структуры поля естественной сейсмичности. На детальных картах слабые события образуют устойчивые во времени локальные сгущения — участки концентрации эпицентров. Более сильные события, как и в случае шахтной сейсмичности, тяготеют к периферии участков. Такая картина, в частности, наблюдалась в Гармском районе Таджикистана, на стыке горных сооружений Памира и Тянь-Шаня<sup>9</sup>. В Гималаях, самых высоких горных сооружениях земного шара, где тектоническая активность чрезвычайно высока, особенно сильные землетрясения в исторически

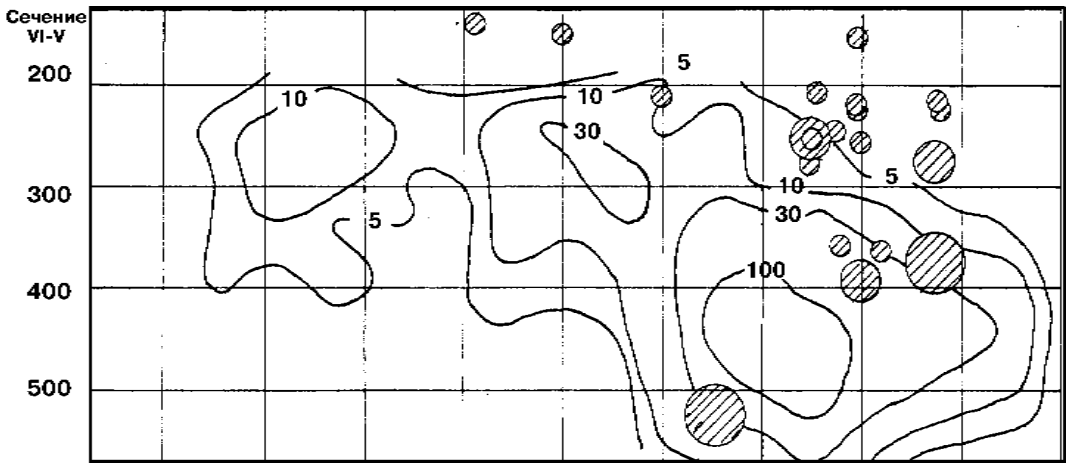
обозримое время не возникали. Они главным образом тяготеют к их периферии, где консолидированные, пока слабо нарушенные массы пород еще только вовлекаются в процесс тектонической переработки.

Все сказанное говорит о том, что графики повторяемости отражают эволюцию структурного состояния разрушаемой среды. Размеры дефектов, которыми насыщается вещество, в среднем со временем уменьшаются, а их количество возрастает, что отражается и на изменении графика повторяемости — от сравнительно пологого для однородного материала и до более крутого для материала, однородность которого нарушена в процессе разрушения.

Казалось бы, если процесс разрушения отснять на киноплёнку, то каждому кадру фильма должен соответствовать свой частный график повторяемости. Такой фильм для разрушения на двуслойной модели был снят. Обработка данных эксперимента дала результат неожиданный: зависимость числа событий от их величины для любого из кадров в отдельности закону повторяемости не подчиняется, а описывается нормальным распределением, характерным для случайного рассеяния событий вокруг среднего. Возвращаясь к фишкам, можно сказать, что при переходе от кадра к кадру количество их в среднем закономерно убывает, но вот набор, соответствующий каждому кадру, распределяется относительно среднего значения случайным образом.

С одной стороны, сейсмический процесс вполне случаен, но, с другой, в его результате происходит изменение среды, которое отражается в направленных и необратимых изменениях величин, характеризующих его средние значения. Закон повторяемости описывает процесс разрушения среды в целом статистически. Если закономерная форма графика выдерживается, это значит, что он

<sup>9</sup> Нерсесов И.Л., Пономарев В.С., Кучай В.К. Особенности пространственного распределения сейсмического фона // Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах. М., 1974. С.119—131.



*Эффект сепарации. Вертикальный разрез поля сейсмических событий шахты № 15 Североуральского бокситового рудника, на котором регистрировались сейсмические события. Изолиниями показано распределение плотности слабых сейсмических событий (число на 100 м<sup>2</sup>). Заштрихованные кружки — области появления сильных землетрясений (с энергией 10<sup>9</sup>—10<sup>8</sup> Дж), которые располагаются вне зоны наибольшей концентрации слабых событий. Шаг сетки 100 м.*

содержал данные, относящиеся к разным стадиям процесса разрушения.

Такой «эволюционистский» подход на первый взгляд противоречит гипотезе стационарности сейсмического режима, которая исходит из того, что сумма условий, определяющих поведение сейсмичности, с течением времени остается постоянной. Однако противоречие это кажущееся. Картину звездного неба мы воспринимаем как «вечную», «стационарную». Данные же астрономии говорят, что современный облик звездного неба — всего лишь краткое мгновение в процессе непрерывных изменений космоса. В одном масштабе времени сейсмичность в первом приближении может быть описана как процесс случайный, в другом — как процесс направленных необратимых изменений.

### ЗАВИСИМЫЕ СОБЫТИЯ

Если бы возникновение землетрясений представляло чисто случайный процесс, то появление каждого события никак не зависело от других, и между ними не было бы никакой взаимосвязи.

Но в применении к сейсмическому процессу — это жесткая идеализация. Мы знаем случаи, когда зависимость сейсмических событий неоспорима. Таковы, например, афтершоки, следующие за мощными землетрясениями. Можно привести и ряд других примеров, когда землетрясения, как сильные, так и слабые, возникают более или менее компактными пространственно-временными группами.

С физической точки зрения генетическая связь между сейсмическими событиями не только возможна, но и неизбежна. Образование разрыва наряду с излучением упругих волн ведет к перестройке поля напряжений в его окрестностях. Образующееся локальное поле напряжений воздействует на другие разрывы, попадающие в зону его влияния, замедляя или, наоборот, ускоряя их рост. В результате на фоне потока независимых событий должны появляться группы событий зависимых, связанных между собой в пространстве—времени. Это общефизическое представление подтвердил и эксперимент.

Случайные события не образуют монотонной последовательности во времени. Так же неравномерно они распределены и в пространстве, образуя своего рода фиктивные группы событий, на самом деле независимых. Выделение групп взаимосвязанных событий на фоне их чисто случайных скоплений — довольно деликатная математическая операция. Разными авторами предложен целый ряд



критериев такого выделения. Не входя в подробности, отметим лишь, что общий принцип конструирования критериев сводится к определению такого численного состава группы, который при чисто случайном рассеянии имел бы пренебрежимо малую вероятность.

Опыты показали, что по мере увеличения энергии импульсов число событий в группе возрастает<sup>10</sup>. Это в общем понятно: чем больше трещина, тем больше размеры области ее влияния. Вместе с тем интенсивность объединения событий одного энергетического уровня примерно одинакова. Во многих опытах в состав группы входило более половины от общего числа зарегистрированных событий. Все наблюдавшиеся группы можно разделить на два вида: с выдающимся импульсом и рои. В первой из них наблюдается один импульс, энергия которого превышает среднюю энергию других импульсов группы на два-три порядка. Во второй — все импульсы имеют энергии в пределах двух порядков от величины среднего значения. При испытании образцов с разным наполнением было установлено, что во всех случаях преобладающими были рои импульсов.

Подобно тому как сейсмические события с большой энергией возникают реже, чем события с меньшей энергией, группы с большим числом событий встречаются реже. При этом по мере возрастания продолжительности опыта мелких групп становится больше.

Проведенные экспериментальные исследования, общефизические представления о разрушении, а также наблюдения над естественной сейсмичностью формируют точку зрения, основные моменты которой сводятся к следующему.

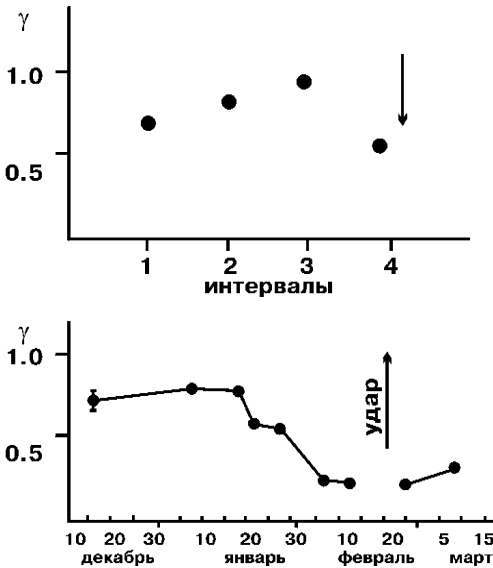
Каждое вновь возникшее землетрясение вносит свой вклад в изменение конфигурации поля напряжений, т.е. оно является следствием действия предыдущих землетрясений. Так что очаг большого землетрясения можно рассматривать как суммарный итог развития процесса разрушения в некоторой окрест-

ности этого очага, а не только как результат разрушения непосредственно в нем. В свою очередь большое землетрясение — это своего рода поле неустойчивости, которое оказывает существенное влияние на последующую сейсмическую жизнь региона, возбуждая как массовое появление афтершоков, так и предопределяя более отдаленные последствия. Оно, например, может спровоцировать целую серию других больших землетрясений. Вся их совокупность может рассматриваться как фактор, влияющий на последующее развитие сейсмического процесса — на его ускорение или замедление, неоднородность проявления в пространстве, своеобразии форм сейсмических проявлений и т.д. В том числе и на то, что среди множества потенциальных очагов больших землетрясений преимущественное развитие получает какой-то один из них. В таком широком смысле вся сейсмичность, несмотря на частный характер ее проявлений, может рассматриваться как система генетически связанных событий, причем график повторяемости — интегральное выражение этой связи.

#### КАНУН РАЗРУШЕНИЯ (ЭКСПЕРИМЕНТ)

Поведение геологической среды в стадии «предразрушения» — физическая основа различных подходов к прогнозу больших землетрясений. Причина такой многоплановости прежде всего в том, что деформационные процессы в этой стадии сказываются не только в специфических изменениях сейсмичности, но и в изменении других геофизических полей. Понятие разрушения применительно к образцам в лабораторных опытах и реальной геологической среде имеет не вполне один и тот же смысл. Говоря о разрушении образцов, имеют в виду завершающую стадию процесса разрушения — образование глобальной трещины, которая нарушает связность образца как единого. Разрушение в геологической среде связывают обычно с появлением достаточно большой, «магистральной» трещины или зоны разрывов,

<sup>10</sup> Пономарев В.С., Ромашов А.Н. Моделирование блоковой структуры земной коры // Природа. 1994. № 5. С.54—63.



*Изменение угла наклона графика повторяемости  $\gamma$  при подготовке крупного разрушения. Вверху — разрушение образца из гипса и песка, величина получена в четырех интервалах времени опыта. Внизу — изменение перед ударом на руднике «Анна» (Чехословакия). Наименьшая величина  $\gamma$  наблюдается непосредственно перед разрушением.*

соответствующей очагу большого землетрясения.

Рассмотрим данные эксперимента.

Для изучения возможных изменений угла наклона графика повторяемости время опыта делилось на две равные части и построение графика повторяемости проводилось для каждой части отдельно. Мы проводили серии опытов с разными скоростями деформации на образцах гипса с песком, цемента с включениями гальки, а также крупного и мелкого щебня.

Результаты оказались неожиданными. Во всех случаях наблюдалось уменьшение наклона графика во второй половине опыта, тогда как, по логике последовательного уменьшения длины свободного пробега трещин, дело должно было бы обстоять как раз наоборот. Изучение тонкой структуры полученного эффекта показало: если время опыта разделить не на две, а на четыре части, то резкое уменьшение угла наклона наблюдается лишь в последней четверти опыта, непосредственно перед разруше-

нием образца. В первых же трех угол наклона, как это и должно быть, последовательно возрастает. Перед окончательным разрушением механическое поведение образца резко меняется. Что же в нем происходит? Почему длина разрывов, постепенно убывая в процессе опыта, к его завершению вновь растет? Укажем на две вероятные возможности.

Угол наклона может уменьшиться из-за локализации процесса разрушения в узкой зоне, которая как бы намечает трассу будущего разрыва. Причем происходит укрупнение трещин за счет слияния более мелких, образовавшихся на ранних стадиях разрушения.

Другое объяснение. Вначале связность образца обеспечивалась равномерно всем его сечением. Но перед разрушением эти функции принимает на себя самая прочная, пока еще слабо нарушенная часть сечения. Уменьшение угла наклона графика свидетельствует о том, что начался процесс разрушения последней «твердыни», обеспечивающей целостность образца. Очевидно, что к такому же результату должно привести и разрушение прочных перемычек между кластерами ранее образовавшихся трещин.

Рассмотрим картину развития процесса разрушения во времени, представленную появлением единичных импульсов.

Данные, полученные при разрушении образцов горных пород в опытах, которые продолжались от одного до нескольких часов, говорят о том, что число импульсов перед разрушением растет, причем для прочных пород (песчаников, гранитов, андезитов, базальтов) на последние десять процентов времени опыта обычно приходилось около 50—70% всех импульсов.

Опыты на образцах из бетона с крупным и мелким щебнем показали, что картина распределения импульсов сильно зависит от скорости деформации. В общих чертах она такова. При больших скоростях, когда продолжительность «жизни» нагруженного образца составляла десятки секунд, на последние 10% времени приходилось до 50% общего

числа импульсов. При меньших скоростях импульсы распределялись более равномерно, а при большой продолжительности опытов (около двух суток) перед разрушением наблюдалось затишье — полное отсутствие импульсов в течение некоторого времени.

### КАНУН РАЗРУШЕНИЯ (НАТУРА)

Картина естественной сейсмичности предстает наблюдателю как мир непрестанных изменений. На этом хаотическом фоне время от времени возникают образования более или менее стабильные. Одни из них постепенно все более четко прорисовывают устойчивую во времени пространственную структуру сейсмичности, другие, амeboобразно изменяясь в очертаниях, как бы «переползают» с одного места на другое... Картина — вполне в духе фантазий Станислава Лема. Но тем не менее известно сходство между тем, что наблюдается в этом изменчивом мире и в лабораторном эксперименте, обнаружить можно.

Вначале обратимся к шахтной сейсмичности. Она по своему масштабу занимает как бы промежуточное положение между излучением импульсов разрушающегося образца и естественной сейсмичностью.

Наблюдения, проводившиеся в свое время на угольных шахтах Кизеловского угольного бассейна и на руднике «Анна» в Чехословакии (см.сноску 5), показали, что перед горными ударами наблюдаются: подъем активности шахтной сейсмичности, сменяющийся затем сейсмическим затишьем, длящимся вплоть до момента горного удара; уменьшение наклона графика повторяемости; рост интенсивности группирования импульсов.

Таким образом, наблюдаются явления, качественно сходные с происходящими в образцах накануне их разрушения.

Подобные черты улавливаются и при естественной сейсмичности. В качестве примеров рассмотрим два эффекта, возникающих перед большими сейсмическими событиями.

Один из них — сейсмические затишья. За несколько месяцев или лет (в

зависимости от величины предстоящего землетрясения) в поле сейсмичности, на фоне ее высокой активности в целом, формируется обширное зияние — зона сейсмического молчания. Характерная особенность ее — резкая убыль землетрясений сравнительно высокой энергии. Одновременно за пределами образующейся зоны наблюдается заметное повышение активности. Главный толчок возникает внутри зоны затишья, не в ее центре, а ближе к краю. Сейсмическое затишье длится вплоть до момента главного события — как и в случае шахтной сейсмичности<sup>11</sup>.

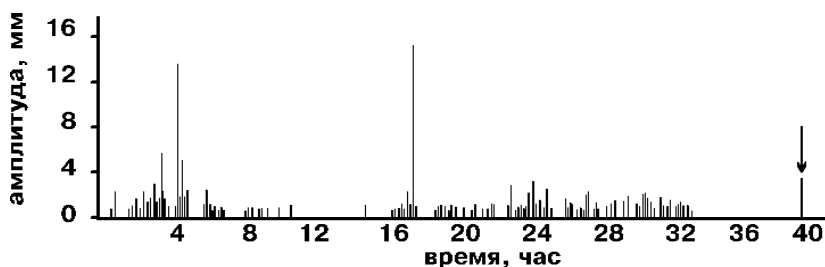
Достаточно четко выраженными затишьями предваряется большинство больших землетрясений. Однако их эффективность как предвестников землетрясений снижает то обстоятельство, что в процессе своего формирования затишья трудно отличить от чисто случайных флуктуаций сейсмичности. Бывает, что к тому времени, когда появляется возможность судить о неслучайном характере этих образований более или менее уверенно, нередко происходит уже и само главное событие.

Прогностическую эффективность затиший существенно повышает другое явление — предвестниковые рои. В окрестностях очаговых зон больших землетрясений почти всегда возникают всплески активности слабых землетрясений, по своей интенсивности далеко превосходящие те, которые в доступный обзорный период времени когда-либо возникали на той же площади<sup>12</sup>. Они тем более заметны, поскольку число группирующихся событий в области очага большого землетрясения перед его возникновением относительно их средней нормы заметно уменьшается<sup>13</sup>.

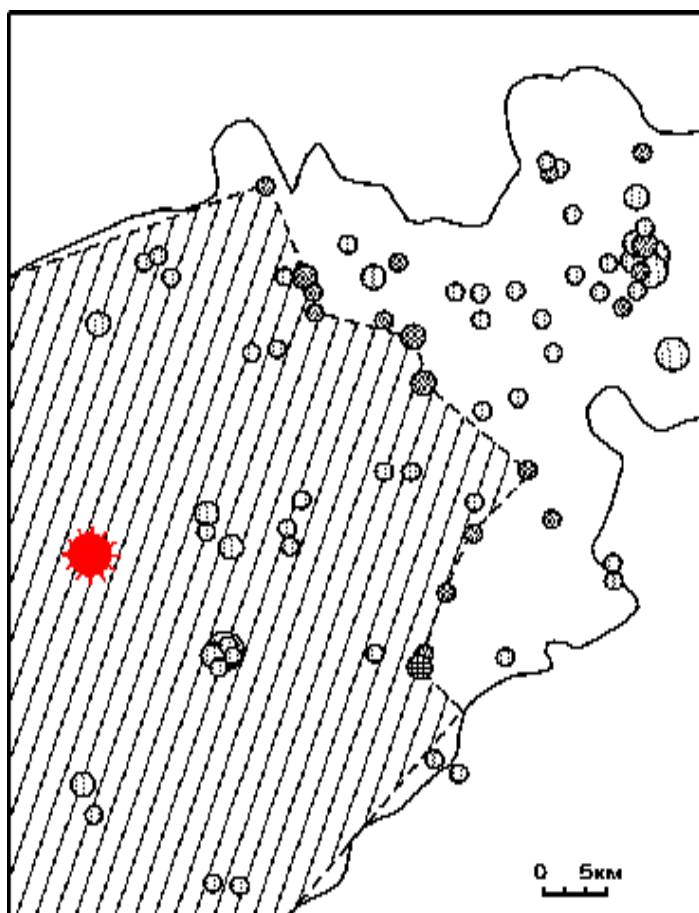
<sup>11</sup> Нерсесов И.Л., Пономарев В.С., Тейтельбаум Ю.М. Эффект сейсмического затишья при больших землетрясениях // Исслед. по физике землетрясений. М., 1976. С.149—168; Михайлова Р.С. // Изв.АН СССР. Физика Земли. 1980. № 10. С.12—22.

<sup>12</sup> Нерсесов И.Л., Тейтельбаум Ю.М., Пономарев В.С. // ДАН СССР. 1979. Т.249. № 6. С.1335—1338.

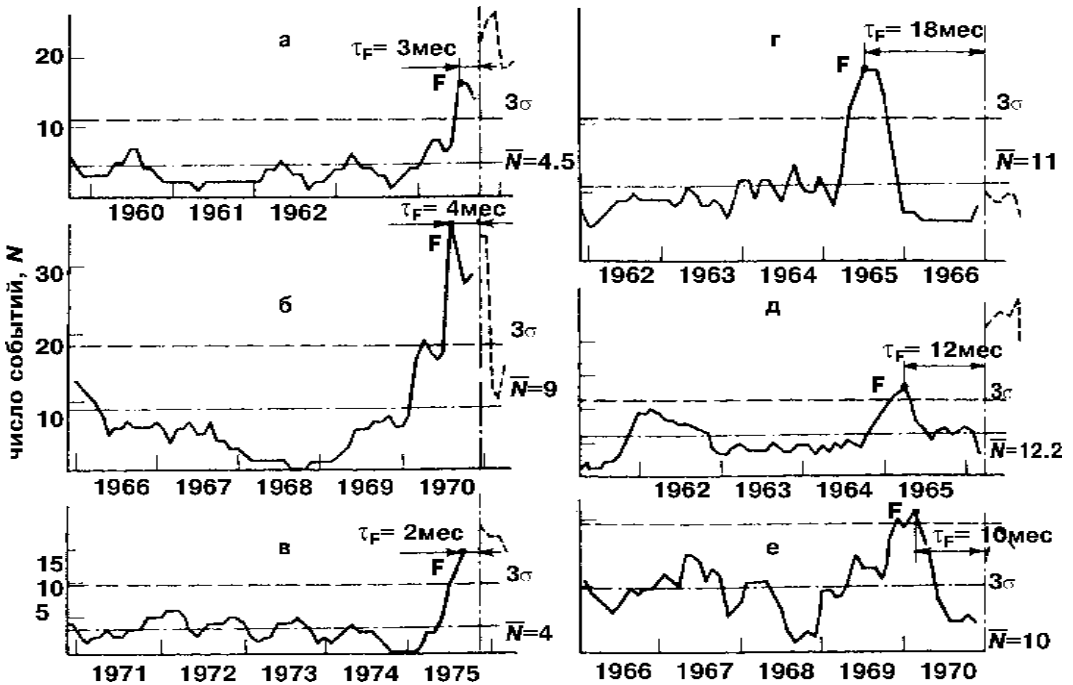
<sup>13</sup> Васильев В.Ю. Исследования особенностей группирования землетрясений. Автореферат канд. дис. Институт физики Земли РАН. М., 1994.



Распределение во времени импульсов акустической эмиссии в образцах из цемента с мелким щебнем в условиях постоянной нагрузки. Импульсы большой амплитуды возникали в первой половине опыта. За несколько часов до полного разрушения перестали возникать и слабые импульсы — наступило полное «сейсмическое затишье».



Один из первых примеров сейсмического затишья, наблюдавшегося перед возникновением землетрясения с энергией  $10^{12}$  Дж в предгорьях Памира (7.01.1958 г.). Цветной кружок — эпицентр главного толчка. Кружками с косой штриховкой обозначены землетрясения средней силы (с энергией  $10^9$ — $10^{12}$  Дж), возникшие в интервале от десяти до пяти месяцев, предшествующие главному толчку, в клеточку — землетрясения за пятидесятилетний интервал времени до толчка. Заштрихованная площадь (свыше 4 тыс. км<sup>2</sup>) — область сейсмического затишья, на которой за пять месяцев до главного толчка землетрясения с энергией  $10^9$ — $10^{12}$  Дж не возникали, хотя раньше они здесь были обычны.



Предвестниковые рои. Временные ряды числа землетрясений с энергией  $10^2 - 10^6$  Дж в шестимесячном интервале. Этот интервал перемещался по оси времени с шагом два месяца. Подсчитывались события, возникшие за последние пять лет перед главным толчком в близочаговых областях землетрясений с энергией  $10^2 - 10^3$  Дж.  $\tau_F$  — время до главного толчка, за которое появляются всплески на кривой (предвестниковый рой). Для удобства сопоставления моменты главных толчков на рисунке совмещены (вертикальная штрихпунктирная линия). Горизонтальная штрихпунктирная линия — среднее значение числа землетрясений за весь рассматриваемый отрезок времени; штриховая — уровень ( $3\sigma$ ), отклонение за пределы которого считается значимым; а, б, в — землетрясения на юге региона с мощным слоем осадков; г, д, е — землетрясения в северной области, сложенной более прочными гранитоидами.

Не являются ли предвестниковые рои теми землетрясениями, которые как бы намечают трассу будущего магистрального разрыва? Возможность этого изучалась специально. Вывод таков: в некоторых случаях нельзя утверждать ничего определенного, однако в большинстве случаев локальные скопления землетрясений, составляющих предвестниковые рои, возникают вблизи очаговой зоны, но не в ней самой. Причем они приурочены к объемам сильно разупроченных пород, соседствующих с менее нарушенными, в которых очаг главного толчка и возникает.

\* \* \*

Экспериментальные исследования показывают, что взгляд на сейсмичность как на процесс чисто случайный — слишком упрощен. Существенную роль в нем играют вполне определенные причинно-следственные связи.

Нам представляется, что настало время как следует разобраться, с чем же мы все-таки имеем дело в случае сейсмичности, т.е. создать физическую модель сейсмического режима, дающую представление о физике совокупностей очагов землетрясений. Ее создание, на

наш взгляд, — самый короткий путь к решению и проблемы прогноза землетрясений, и ряда других важнейших практических задач, стоящих перед сейсмологами.

Роль эксперимента в становлении физической модели явления или процесса — решающая. Касаясь соотношения

теории и эксперимента, Петр Леонидович Капица в лекциях, читанных студентам физтеха, перефразировал слова одной американки, которая сказала, что любовь — это хорошо, но золотой браслет остается навсегда. «Теория — это хорошо, но хороший эксперимент остается навсегда».

## ОБЪЯВЛЕНИЕ

---

### КОНКУРС НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫХ СТАТЕЙ среди держателей грантов РФФИ

1. Российский фонд фундаментальных исследований объявляет конкурс научно-популярных статей по результатам исследований, поддержанных грантами РФФИ. Объем статьи: до 0.5 авт. листа (12 машинописных страниц, 20 Кб тестового файла), до 8 иллюстраций. Среди авторов статьи должен быть руководитель гранта. Кроме рукописи представляются стандартные формы РФФИ 1, 2, а также дискета с файлами form1.txt, form2.txt и файлом статьи в текстовом или винвордовском формате. Если иллюстрации выполнены в компьютерном виде, они также должны быть приведены на дискете (формат произволен).

В статье должен содержаться краткий обзор состояния области науки к моменту начала исследований по гранту, четко очерчены цели исследований и наглядно представлены их результаты. Статья должна быть доступна читателям с университетским образованием.

На конкурс могут быть представлены оригинальные работы или статьи, опубликованные в научно-популярных журналах в 1998, 1999 гг.

2. Будет присуждено 42 премии по 10000 рублей.

3. Премированные статьи после редактирования будут изданы в виде сборника.

4. Оценка работ проводится экспертными советами РФФИ совместно с представителями ведущих научно-популярных журналов.

5. Срок представления заявок до 15 сентября 1999 г. включительно. Объявление результатов — в декабре 1999 г.