

Статистическая кинетика разрушения горных пород и прогноз сейсмических явлений

© Н.Г. Томилин, Е.Е. Дамаскинская, П.И. Павлов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Nikita.Tomilin@mail.ioffe.ru

На основе кинетических представлений о прочности твердых тел и базирующейся на них иерархической модели разрушения горных пород сформулированы физически обоснованные критерии формирования очаговой стадии процесса. Разработана методика прогнозирования места, времени и энергии сейсмических явлений и описан ее алгоритм. Приведены примеры реализации прогноза на основе анализа сейсмического режима Камчатки и шахтных полей ОАО „СУБР“.

Работа выполнена в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 02-05-08003, 02-05-39017, 03-05-64831, 04-05-65287 и проекта МНТЦ № 1745.

Сейсмические явления, регистрируемые в механически нагруженных горных породах (землетрясения, горные удары, сигналы акустической эмиссии), являются результатом образования разномасштабных дефектов. Это определяет решение задачи прогноза землетрясений, заключающейся в заблаговременном определении места, времени и энергии на основе физико-механических представлений о разрушении горных пород. Поскольку в настоящее время регистрация и определение времени, координат, энергии упругих импульсов методически и технологически отработаны, решение данной задачи практически осуществимо.

До середины 50-х годов в физике прочности общепринятым было представление о разрушении твердых тел как о достижении напряжением или деформацией предельных значений. Принципиально новый подход открыла кинетическая концепция прочности твердых тел [1]. На основе обширного экспериментального материала доказано, что макроскопическое разрушение происходит не только при достижении предела прочности, но и при более низких нагрузках в случае их длительного воздействия. Основное время жизни нагружаемого объема приходится на развитие процесса накопления повреждений. Термофлуктуационная природа разрушения горных пород подтверждена в работе [2]. Важным следствием, вытекающим из кинетических представлений о прочности, является стохастический характер разрушения, который определяется статистикой тепловых флуктуаций [3]. Кроме того, случайность процесса определяется наличием статистического разброса локальных значений физико-механических свойств гетерогенных материалов.

Начиная с работы [4], заложившей основу представлений о горных породах как о дискретной многоуровневой среде, получили активное развитие исследования соответствующих свойств материала и процессов, возникающих при его деформировании. В настоящее время имеются убедительные подтверждения [5] подобия в широком диапазоне масштабов организации структуры горных пород и процессов, протекающих под воздействием механической нагрузки. Наиболее обобщенно принцип

подобия отображается эмпирическими зависимостями параметров процесса от энергии, выделяющейся при разрушении [6], что позволяет рассматривать ее как универсальную шкалу для определения уровней разрушения.

Кинетические подходы к прочности твердых тел, экспериментальные исследования закономерностей трещинообразования позволили сформулировать иерархическую модель разрушения горных пород [7], основные положения которой заключаются в следующем. Структурная неоднородность материала приводит к неравномерному распределению приложенной внешней нагрузки. В результате этого появляются элементы, вероятность разрушения которых в силу пониженного термоактивационного барьера выше средней для всего тела. Возникающие при разрушении таких случайно распределенных в пространстве объемов трещины стабилизируются на границах гетерогенности. Таким образом, первая стадия процесса заключается во множественном дисперсном накоплении невзаимодействующих трещин, размер которых определяется данным рангом структурной неоднородности j . В процессе накопления дефектов в некоторой области их концентрация случайным образом превышает среднее для всего тела значение. При локальном достижении трещины в данной области, называемой очагом разрушения, пороговой концентрации между трещинами возникает взаимодействие, что в свою очередь стимулирует дальнейшее дефектообразование. Формируются условия, при которых очаговая зона теряет устройчивость, и образуется дефект $j + 1$ ранга, соответствующего следующему размеру гетерогенности. Если в материале существует иерархия размеров блоков, присущая горным породам, то модель предполагает подобное развитие процесса разрушения на всех имеющихся масштабных уровнях.

Последовательность появляющихся в процессе нагружения дефектов можно представить в виде потока дискретных событий, каждое из которых характеризуется координатой на временной оси и в пространстве, а также размером соответствующего дефекта. Такому

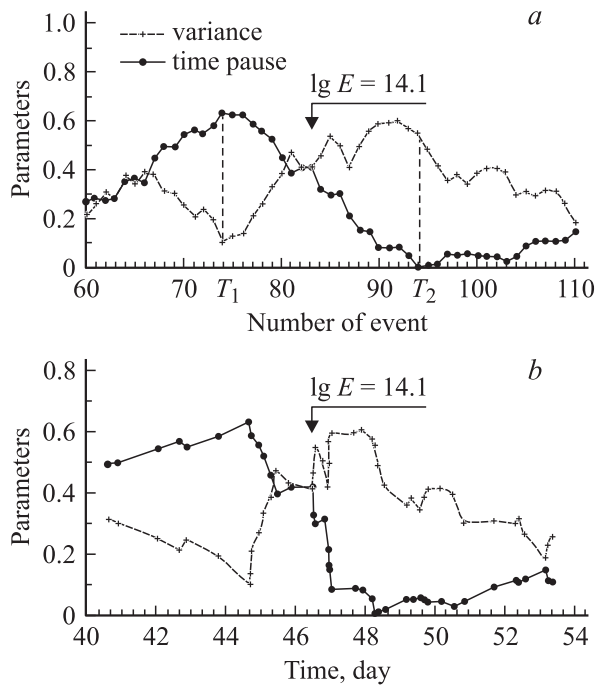


Рис. 1. Изменение среднего временного интервала и коэффициента вариации временных интервалов в зоне подготовки землетрясения с $\lg E = 14.1$ (1972): *a* — зависимость от номера выборки, *b* — временная развертка.

потоку можно сопоставить экспериментально зарегистрированную сейсмическую или акустоэмиссионную (АЭ) последовательность, в которой характеристикой размера дефекта служат энергетические параметры сигнала [8]. Переформулируя двухстадийную модель с позиций статистики потока дискретных событий, можно считать первую стадию удовлетворяющей условием квазистационарного пуассоновского процесса, а нарушения этих условий являются критерием формирования очага разрушения.

На основе результатов лабораторных исследований акустической эмиссии при разрушении горных пород [9] в качестве параметров, характеризующих пространственно-временные особенности разрушения, выбраны средние значения временных интервалов между хронологически последовательными событиями (Δt , time pause) и их коэффициент вариации ($V_{\Delta t}$, variance), рассчитанные для выборок с фиксированным числом событий. На первой стадии, некоррелированного образования дефектов, до момента времени T_1 (рис. 1, *a*), их поток является пуассоновским. При достижении дефектами в рассматриваемой зоне пороговой концентрации возникают условия для их взаимодействия и дальнейшего стимулированного зарождения, что внушает условия пуассоновского процесса. Эта стадия отражается в увеличении параметра $V_{\Delta t}$ и уменьшении Δt . Образование дефекта, соответствующего следующему уровню гетерогенности вследствие потери очагом устойчивости, не обязательно завершает вторую, нестационарную стадию.

В результате релаксации очаговой зоны (T_2) возникают обратные тенденции, т.е. увеличение Δt и уменьшение $V_{\Delta t}$ (рис. 1, *a*).

В общем случае разрушение реализуется одновременно на различных масштабных уровнях [7] и на каждом из них в виде последовательно сменяющихся стадий. Поэтому обнаружение рассматриваемых трендов возможно при выполнении двух условий. Они заключаются в том, что в анализируемую выборку должны входить только события, попадающие в пространственную область подготовки очага разрушения, их энергия соответствует определенному рангу процесса. Практически выполнение этих условий заключается в двойной, пространственно-энергетической селекции потока событий, где критерием является получение трендов в описанном характерном изменении статистических параметров. При одинаковом режиме нагружения экспериментально установлено существование корреляционных соотношений (1), (2) между временем развития очага (T), размером области его подготовки (R) и величиной упругого энерговыделения при потере им устойчивости (E).

$$\lg T = a \lg E + b, \quad (1)$$

$$\lg R = c \lg E + d, \quad (2)$$

где a, b, c, d — постоянные.

В прогностические критерии не входят физико-механические параметры материалов, которые не всегда доступны для практического контроля, а лишь универсальные статистические параметры. Безусловно, различие в физико-механических свойствах материалов, в том числе горных пород, не может не сказываться на особенностях разрушения, в том числе на значениях угловых коэффициентов a, c в (1) (2), но согласно экспериментальным данным [9], она не нарушает универсальности обнаруженных статистических зависимостей процесса.

Предложенные в рамках иерархической модели статистические критерии формирования очага разрушения позволяют локализовать пространственную зону подготовки очага разрушения, определить момент времени перехода этой области в неустойчивое состояние и оценить возможное энерговыделение в ней. Таким образом, появляется принципиальная возможность прогноза места, времени и энергии готовящегося сейсмического явления независимо от его масштаба.

Согласно используемым физическим представлениям, разрушение горных пород — стохастический процесс. Поэтому любые его оценки и прогностические решения в том числе могут быть сделаны только в вероятностном аспекте при различных уровнях достоверности (стратегии). В настоящее время для оценки эффективности (EF) прогностических решений применяются стандартные методы, позволяющие сравнивать различные способы и стратегии прогноза. В данной работе с этой целью использовалась зависимость (3), которая представляет

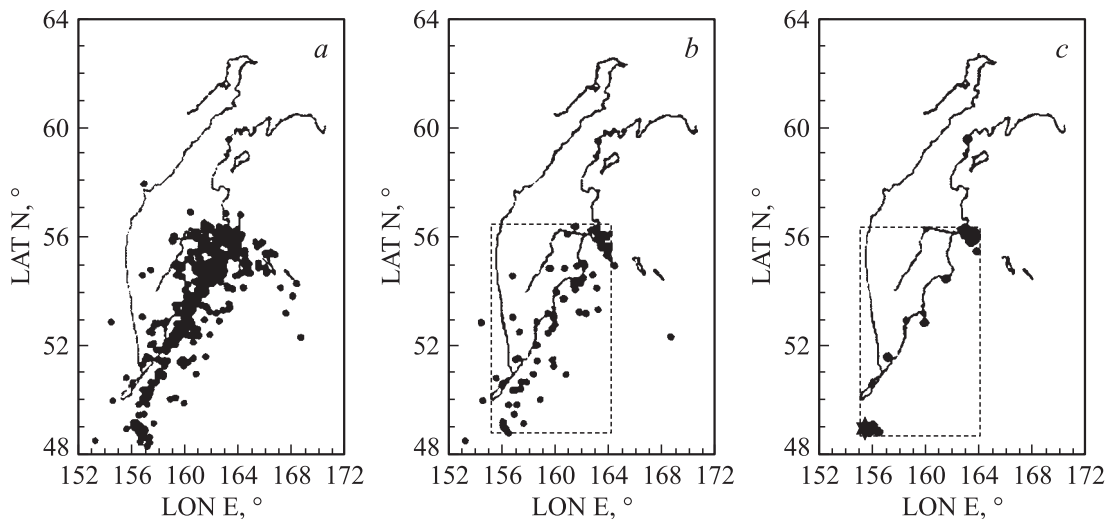


Рис. 2. Карты эпицентров землетрясения на Камчатке во временной области сейсмического события с параметрами 04.08.1972, $\lg E = 14.1$: *a* — все события в период 8.06–26.10.1972; *b* — события с $\lg E \geq 9.1$ в период 08.06–04.08.1972; *c* — события с $\lg E \geq 9.1$ в период 17.07–04.08.1972.

собой отношение плотности предсказываемых событий во время объявленных тревог к их средней плотности за время наблюдений

$$EF = (N_{pr}/N_{tot})/(T_{al}/T_{tot}), \quad (3)$$

где N_{pr} — число спрогнозированных событий, N_{tot} — общее число явлений за время наблюдений, T_{al} — суммарное время объявленных тревог, T_{tot} — общее время наблюдений. Параметр EF оценивает соотношение надежности точности прогноза. Отметим, что даже в случае $EF = \text{const}$ возможно изменение данного соотношения, т. е. стратегии прогноза посредством вариации уровня тревоги. Выбор стратегии определяется с учетом поставленных задач на стадии ретроспективного анализа сейсмического режима.

1. Ретроспективный прогноз землетрясений Камчатки

Проанализирована база данных сейсмического режима региона Камчатки (рис. 2), содержащая параметры более 50000 землетрясений: временной период (1962–2001 гг.), три координаты, и энергия в диапазоне $10^4 - 10^{16}$ J. Для проверки принципиальной возможности прогнозирования землетрясений рассматриваемого региона в соответствии с описанным выше алгоритмом были выбраны события с $\lg E \geq 14$. Закономерности формирования очага одного из них (04.08.1972, $\lg E = 14.1$) будут рассмотрены в данной работе. На рис. 2, *a* представлены все сейсмические события, зарегистрированные в период 8.06–16.10.1972. При варьировании методом последовательных приближений энергетический диапазон анализируемых событий (рис. 2, *b*), было выявлено характерное изменение статистических

параметров, свидетельствующих о формировании очага рассматриваемого мощного землетрясения (рис. 1).

На рис. 1, *b* приведены временные зависимости статистических параметров Δt и $V_{\Delta t}$, построенные для событий с $\lg E \geq 9.1$. Видно, что более чем за сутки до рассматриваемого события наблюдается одновременное уменьшение средних временных интервалов и увеличение коэффициента вариации временных интервалов. События, относящиеся к нестационарной стадии развития разрушения и непосредственно формирующие тренды, образуют в пространстве линейную структуру (рис. 2, *c*), соответствующую имеющемуся готовому разлому в земной коре. Это позволяет предположить явление stick-slip в качестве механизма финальной стадии процесса. Аналогичным образом были проанализированы очаговые области 36 землетрясений с $\lg E \geq 14$, из которых в 29 случаях были обнаружены предвестники. Таким образом, вероятность, равная 0.8, позволяет судить о принципиальной возможности прогнозирования землетрясений в рамках рассматриваемой методики.

2. Перспективный прогноз горных ударов на шахтных полях ОАО „СУБР“

Североуральские бокситовые месторождения отнесены к наиболее опасным в России по проявлению горного давления. Общие характеристики сейсмического режима и системы его регистрации представлены в работах [10,11].

Перспективный прогноз горных ударов осуществляется сейсмологической службой рудника с 1986 г. в пределах шахтных полей, имеющих характерные размеры $3 \times 3 \times 1$ km. Нижняя граница динамического диапазона

энергий горных ударов, регистрируемых сейсмостанцией „Североуральск“, составляет 10 J. Достоверным значением во всем поле сейсмичности является 10^2 J. При ретроспективном анализе было определено, что нижний энергетический порог прогнозируемых ударов превышает нижнюю достоверную границу регистрации на 4 порядка. Результаты эффективности прогноза горных ударов представлены в табл. 1 и 2. За период наблюдения в контролируемых районах произошло 57 горных ударов с энергией E . Результаты контроля C : успешная реализация прогноза Y , пропуск цели N и ретроспективный прогноз R , т.е. случай, когда пропуск цели произошел по субъективным причинам, не зависящим от возможностей собственно методики. Далее в табл. 1 представлены размеры пространственной зоны, в которой локализована выставленная тревога (прогноз по месту), прогнозируемое значение энергии E_{pr} , прогнозируемое время T_{pr} (в сутках) от момента выставления тревоги от предполагаемого сейсмического события (прогноз по времени) и фактическая длительность тревоги T .

Таблица 1. Параметры прогноза горных ударов на шахтах ОАО „СУБР“ (1988–1990 гг.)

Дата	C	$\Delta X \times \Delta Y \times \Delta Z,$ m	$E_{pr},$ J	$E,$ J	$T_{pr},$ days	$T,$ days
25.03.88	Y	$200 \times 200 \times 200$	6.1	5.5	13	85
12.04.88	Y	$200 \times 200 \times 200$	6.1	6.2	13	46
15.09.88	Y	$300 \times 250 \times 300$	6.7	6.7	20	68
27.12.88	Y	$250 \times 250 \times 250$	6.4	5.8	17	8
1.03.89	R	$100 \times 200 \times 300$	6.1	6.2	13	55
21.03.89	Y	$225 \times 175 \times 200$	6.3	6.4	15	14
14.05.89	Y	$400 \times 400 \times 250$	7.2	5.3	26	26
21.05.89	Y	$250 \times 250 \times 250$	6.4	6.3	16	50
24.05.89	Y	$299 \times 325 \times 375$	6.8	6.2	22	65
6.07.89	R	$50 \times 225 \times 225$	6.3	5.8	15	19
29.07.89	N			5.7		
21.08.89	Y	$200 \times 200 \times 250$	6.1	6.5	13	6
23.10.89	R	$200 \times 225 \times 150$	6.3	5.8	15	33
7.01.90	Y	$300 \times 225 \times 300$	6.3	6.3	15	10
13.01.90	Y	$200 \times 150 \times 150$	6.1	6.7	13	8
23.01.90	Y	$300 \times 200 \times 400$	6.7	5.6	20	25
23.01.90	Y			5.8		
6.03.90	R	$200 \times 320 \times 395$	6.8	6.7	21	16
23.04.90	R	$235 \times 175 \times 150$	6.3	6.1	10	1
3.08.90	R	$200 \times 200 \times 200$	5.9	5.7	12	51
29.08.90	Y	$210 \times 245 \times 245$	6.4	6.4	16	30
31.08.90	Y	$185 \times 175 \times 275$	6.2	6.2	12	6
10.09.90	N			6.2		
27.11.90	Y	$200 \times 300 \times 175$	6.7	6.6	20	33

Примечание. C — результат контроля: успешная реализация прогноза Y , пропуск цели N , ретроспективный прогноз R ; $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ — пространственная область подготовки горного удара; E_{pr} — прогнозируемое значение энергии; E — энергия произошедшего горного удара; T_{pr} — прогнозируемое время от момента выставления тревоги до предполагаемого сейсмического события; T — фактическая длительность тревоги.

Таблица 2. Эффективность прогноза горных ударов на шахтах ОАО „СУБР“

Год	P	$T_{tot},$ days	$T_{al},$ days	T_{al}/T_{tot}	EF
1986	$10/11 = 0.91$	2555	939	0.37	2.5
1987	$4/6 = 0.67$	2745	486	0.18	3.8
1988	$4/4 = 1.00$	2783	762	0.27	3.6
1989	$5/9 = 0.56$	3345	1195	0.36	1.6
1990	$7/11 = 0.64$	4174	946	0.23	2.8
1991	$5/12 = 0.42$	2315	795	0.34	1.2
1992	$3/4 = 0.75$	2164	344	0.16	4.7
Total:	$38/57 = 0.66$	20081	5667	0.28	2.4

Примечание. P — вероятность прогноза, T_{tot} — общее время наблюдений, T_{al} — суммарное время объявленных тревог, EF — эффективность прогностических решений.

Параметры, характеризующие качество прогноза по времени, представлены в табл. 2. При оценке вероятности P спрогнозированными событиями N_{pr} считались только случаи, для которых $C = Y$. При определении длительности ложных тревог T_{fa} не учитывалось профилактическое воздействие на уже сформированный очаг разгрузки массивов в рамках штатных мероприятий. Значительное превышение в некоторых случаях фактическим временем тревоги его прогнозируемого значения связано с тем, что выбранная стратегия предполагает снятие тревоги не по факту предсказанного сейсмического явления, а при появлении физических критериев перехода контролируемой очаговой области в неудароопасное состояние. Это, естественно, увеличивает период тревоги, но позволяет предсказать групповые удары, происходящие с небольшим интервалом практически в одном месте. Последнее обстоятельство имеет первостепенное значение при принятии решения о возобновлении технологических процессов в непосредственной близости от релаксирующей очаговой области.

Таким образом, несмотря на жесткие условия оценки эффективности представленные данные свидетельствуют о высоком качестве прогноза по времени. В работе сознательно не рассматриваются оценки эффективности прогноза по месту, так как пространственная локализация тревоги в объеме с характерным размером 200–250 м (для событий с $E = 10^6$ J) при общей области контроля в тысячи метров является убедительным доказательством возможностей рассматриваемой методики. Точность прогноза предполагаемого упругого энерговыделения (табл. 2) — в пределах точности его измерения.

3. Заключение

На основе кинетических представлений о прочности твердых тел и сформулированной на их основе иерархической модели разрушения горных пород разработана методика прогнозирования сейсмических явлений. Формализован универсальный критерий формирования

локального очага разрушения гетерогенных материалов. Экспериментальные исследования акустической эмиссии при деформировании образцов из различных типов горных пород, а также анализ сейсмологических баз данных горных ударов и землетрясений продемонстрировали устойчивость данного физического критерия относительно физико-механических свойств материалов и масштаба процесса в диапазоне упругого энерговыделения ($10^{-12} - 10^{16}$ J).

Список литературы

- [1] С.Н. Журков. Вестн. АН СССР 3, 42 (1968).
- [2] И.С. Томашевская, Я.Н. Хамидулин. Изв. АН СССР. Физика Земли 5, 12 (1972).
- [3] V.A. Petrov, A.N. Orlov. Int. J. Fract. **11**, 5, 881 (1975).
- [4] М.А. Садовский, Т.В. Голубева, В.Ф. Писаренко, М.Г. Ширман. Изв. АН СССР. Физика Земли 2, 3 (1984).
- [5] М.А. Садовский, Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. Наука, М. (1987). 100 с.
- [6] В. Gutenberg, С. Richter. Seismicity of the earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press, Princeton (1954). 158 p.
- [7] Н.Г. Томилин, В.С. Куксенко. Иерархическая модель разрушения горных пород. Науки о Земле: Физика и механика геоматериалов. Вузовская книга, М. (2002). С. 116.
- [8] В.С. Куксенко, С.А. Станчиц, Н.Г. Томилин. Механика композит. материалов 3, 536 (1983).
- [9] V. Kuksenko, N. Tomilin, E. Damaskinskaya, D. Lockner. Pure Appl. Geophys. **116**, 2, 253 (1996).
- [10] К.А. Воинов, А.С. Краков, В.С. Ломакин, Н.И. Халевин. Изв. АН СССР. Физика Земли 10, 98 (1987).
- [11] К.А. Воинов, А.С. Краков, Н.Г. Томилин, Д.И. Фролов. ФТПРПИ 1, 22 (1987).