

Томилин Н.Г., Куксенко В.С.

Физико-Технический институт РАН, Санкт-Петербург, nikita.tomilin@mail.ioffe.ru

Физические представления о разрушении горных пород и модель формирования очага процесса

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 к вопросам физики разрушения 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 длительного их воздействия. Основное время жизни нагружаемого объема приходится на развитие процесса накопления повреждений. Макро разрушение наступает при достижении критической концентрации дефектов в зоне будущего разрыва. Термофлуктуационная природа разрушения горных пород подтверждена в работе [4]. Важным следствием, вытекающим из кинетических представлений о прочности, является стохастический характер разрушения, который определяется статистикой тепловых флуктуаций [11]. Кроме того, случайность процесса вытекает из существования статистического разброса локальных значений физико-механических свойств гетерогенных материалов.

Кинетические подходы к прочности твердых тел и обширный экспериментальный материал о зарождении трещин позволили сформулировать модель развития разрушения гетерогенных материалов, в том числе горных пород [7-9]. 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 уровнем структурой неоднородности j . В процессе накопления дефектов в некоторой области их концентрация случайным образом превышает среднее для всего тела значение. При локальном достижении трещинами в некоторой области, называемой очагом разрушения, пороговой концентрации, между трещинами возникает взаимодействие, что в свою очередь стимулирует дальнейшее дефектообразование. Формируются условия, при которых очаговая зона теряет устойчивость, и образуется дефект $(j+1)$ -го ранга, соответствующего следующему размеру гетерогенности. Если в материале существует иерархия размеров гетерогенности, присущая горным породам [2], то модель предполагает подобное развитие процесса разрушения на всех имеющихся масштабных уровнях.

Случайный характер разрушения горных пород определяет выбор статистических методов его описания. Появляющиеся в процессе нагружения дефекты можно представить в виде потока дискретных событий, каждое из которых характеризуется координатой на временной оси и в пространстве, а также размером соответствующего дефекта. Такому потоку можно сопоставить сейсмическую последовательность, в которой характеристикой размера дефекта служат магнитуда или энергетический класс сейсмического события. Переформулируя двухстадийную модель с позиций статистики потока дискретных событий, считаем первую стадию удовлетворяющей условиям квазистационарного пуассоновского процесса, а нарушения этих условий являются критерием формирования очага разрушения. В качестве параметров, характеризующих пространственно-временные особенности разрушения, можно выбрать средние значения временных интервалов Δt между хронологически последовательными событиями и их коэффициент вариации $V_{\Delta t}$. Изменения этих характеристик демонстрируются на примере выделения зоны подготовки очага Симуширских землетрясений [3] (рис. 1). К моменту времени T_1 (30.09.2006) (рис. 1a) в рассматриваемой зоне (рис. 1b) достигается концентрация дефектов с M_j , достаточная для их дальнейшего стимулированного зарождения, что нарушает условия пуассоновского процесса. Эта стадия отражается в одновременном увеличении параметра $V_{\Delta t}$ и уменьшении Δt (ускорение). Образование дефекта следующего иерархического ранга (момент

времени $M_{i+1} \geq 8$) не обязательно завершает вторую, нестационарную стадию. В результате релаксации очаговой зоны, начиная с момента времени T_2 (9.02.2007) возникают обратные тенденции, т.е. одновременное увеличение Δt и уменьшение $V_{\Delta t}$. Приведенное качественное изменение рассматриваемых характеристик в дальнейшем, для краткости, будем называть образом очага разрушения. Соотношение двух соседних рангов разрушения в рассмотренном примере удовлетворяет условию:

$$M_{i+1} - M_i \approx 3 \quad (1)$$

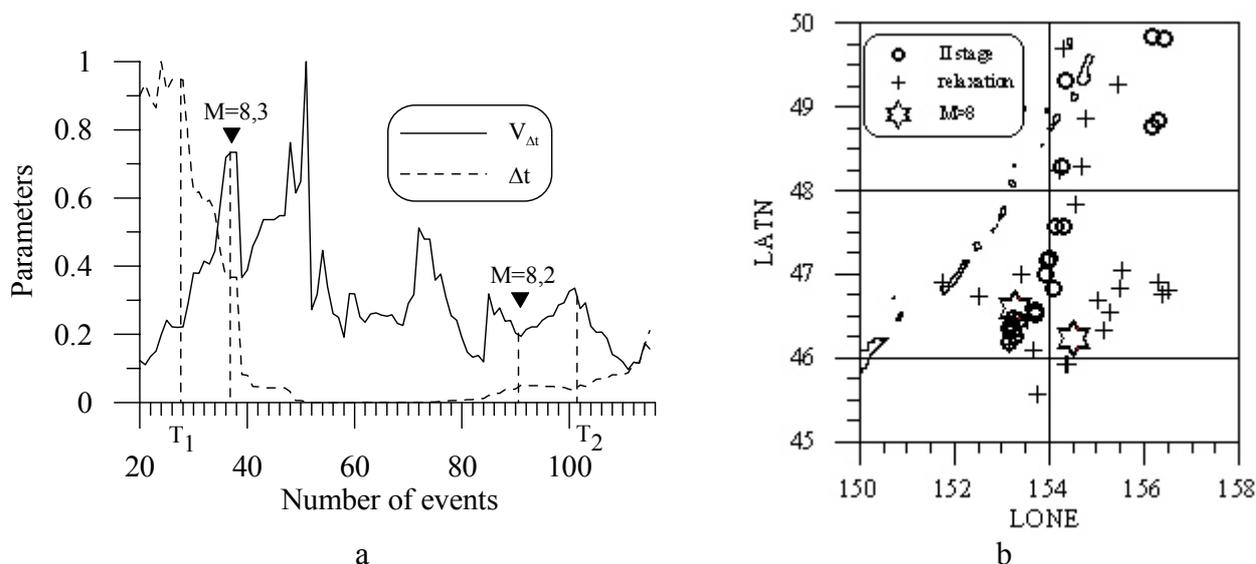


Рис. 1. Выделение очаговой области Симуширских землетрясений: а – изменение прогностических параметров; б – пространственное распределение эпицентров.

В общем случае разрушение реализуется одновременно на различных масштабных уровнях и на каждом из них в виде последовательно сменяющихся стадий. Поэтому обнаружение рассматриваемого образа очага возможно при выполнении трех условий. Они заключаются в том, что в анализируемую выборку должны входить только события, попадающие в пространственную область подготовки очага разрушения, их энергия соответствует иерархическому уровню процесса, а временная дискретность анализа гарантирует выявление всех особенностей процесса. Первые два условия заключаются в двойной, пространственно-энергетической селекции потока сейсмических событий, где критерием является получение трендов в описанном характерном изменении статистических параметров. Третье условие достигается, если статистические параметры рассчитывать для скользящих выборок фиксированного размера с шагом смещения 1 (рис. 1а).

Рассмотренная выше иерархическая модель разрушения открывает принципиально новые возможности не только для прогнозирования места, времени и энергосодержания при образовании дефекта любого масштаба, но и дает физически обоснованный критерий снятия тревоги. Привлекательным является то, что в прогностический критерий не входят физико-механические параметры горных пород, которые на рассматриваемых масштабах, как правило, не доступны для практического контроля, а лишь универсальные статистические параметры. При этом, безусловно, различие и разброс в структуре, свойствах, а также конкретные механизмы разрушения, не могут не сказываться на особенностях процесса.

Выделение очаговых стадий и прогноз землетрясений Камчатки.

Для проверки статистической значимости предложенного критерия проанализирована база данных (БД) сейсмического режима региона Камчатки за период 1962–2001 гг. Необходимыми параметрами более 70 000 землетрясений являются: время, координаты и энергия в диапазоне $10^4 - 10^{16}$ Дж. Рассмотренный алгоритм выделения очаговых зон был применен ко всем сейсмическим событиям с $\lg E \geq 14$ (табл. 1). Выбор энергетического порога анализируемых событий будет прокомментирован ниже. Из рассмотренных 36 землетрясений в 32 случаях

Таблица 1. Выделение очаговых зон землетрясений с $\lg E \geq 14$

Дата	LATN	LONE	Z, км	$\lg E$, Дж	Протяженность области подготовки очага, км		t_{pr} сут	t_{rel} сут	Примечания
					LONE	LATN			
1962/12/26	53.85	168.32	10	15	510	500	19	9	
1963/05/26	55.14	160.05	0	14.4	300	240	5.5	3	
1964/12/26	51.6	157.36	145	14.1	400	740	2	6	
1966/01/28	51.35	157.22	130	14.1	Очаговая зона не выделяется				
1966/04/08	50.97	158.17	50	14	300	440	8	5	
1969/11/22	57.7	163.5	25	15.3	310	800	10.5	3	
1971/01/29	51.94	150.5	550	16.1	700	1000	245	52	
1971/11/24	52.77	159.66	100	15.9	550	700	1	1	
1971/12/15	55.85	163.35	25	15.4	500	600	1	1.6	
1972/05/27	54.82	157.48	450	14	Очаговая зона не выделяется				
1972/08/04	49	155.6	25	14.1	420	820	0.9	0.9	
1973/02/28	50.4	156.7	70	15.5	470	600	0.13	-	Коллективный процесс
1973/03/12	50.8	157.2	70	14.4					
1973/04/12	50.7	157.6	70	14.2					
1975/12/21	51.84	151	550	15	940	750	1.16	1.7	
1977/09/21	51.63	155.37	235	14	440	760	5	22	
1980/01/23	52.23	160.4	14	14.1	500	800	0.04	3	
1982/05/31	55.07	165.48	40	14	490	800	1.3	1.7	
1983/07/24	53.78	158.63	175	14.4	520	800	1.5	3	
1983/08/17	55.65	161.53	102	15.4	500	800	1.5	1	
1984/12/28	56.18	163.44	19	14	Очаговая зона не выделяется				
1985/03/06	55.09	162.46	46	14.2	Очаговая зона не выделяется				
1988/02/29	54.98	167.38	40	14.3	190	150	55	23	
1989/04/11	49.53	159.09	40	14.3	240	830	8	45	
1990/11/06	52.94	170.93	36	14.5	Без анализа, событие на пространственном краю БД				
1991/03/08	60.9	167.2	35	14.4	550	540	200	94	
1991/04/08	52.36	158.21	139	14	490	470	1.2	2	
1992/03/02	52.76	160.2	20	14.6	400	700	45	24	Коллективный процесс
1992/03/05	52.77	159.95	31	14					
1992/07/13	50.78	158.13	20	14	450	630	5	12	
1993/06/08	51.2	157.8	40	14.9	580	800	45	1	Коллективный процесс
1993/11/13	51.79	158.83	40	14.6					
1996/01/01	53.9	159.43	0	14.3	150	600	0.08	27	
1997/12/05	54.64	162.55	10	15.5	370	650	0.6	22	Коллективный процесс
1997/12/05	53.68	161.85	24	14.2					
1999/03/08	51.93	159.72	7	14.3	100	400	9	20	
2001/02/07	52.28	153.66	476	14.2	780	800	3	1	
1987/01/03	54.58	162.19	26	11.7	100	140	0.5	1.7	

удалось выделить области подготовки очагов и определить следующие параметры: протяженность области, длительности нестационарной стадии (t_{pr}) и периода до начала релаксации очаговой области (t_{rel}), которые в сумме определяют длительность тревоги. В четырех случаях наличие физически обоснованного критерия снятия тревоги позволило “не пропустить” афтершоки, энергия которых сравнима (с позиций ранговости разрушения) с основным толчком. В результате анализа соотношение между соседними рангами разрушения эмпирически было определено как:

$$\lg (E_{j+1}/E_j) \approx 5 \quad (2)$$

Именно из условия (2) и представительности регистрации сейсмических событий, которая для большей части зоны контроля составляет $\lg E = 9$, и был выбран энергетический порог

анализируемых событий. В зонах, где порог представительности регистрации ниже, возможно выделение областей подготовки очагов сейсмических событий более низких энергий (последняя строка табл. 1).

На рис. 2 приведена зависимость длительности очаговой стадии разрушения горных пород (t_{pr}) в широком диапазоне упругого энерговыделения. Существенно меньшими по сравнению с полученной эмпирической зависимостью являются значения в случаях проскальзывания по готовому разлому в лабораторных образцах и для землетрясений Камчатки. Можно предположить,

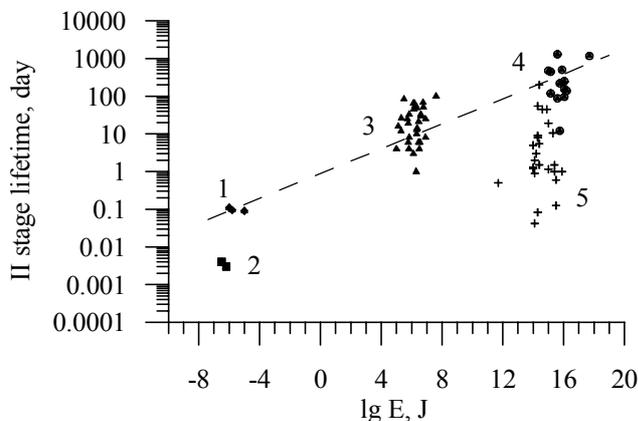


Рис.2 Зависимость длительности очаговой стадии разрушения горных пород от упругого энерговыделения:

- 1 – формирование макроразрыва в образце [7];
- 2 – явление stick-slip по готовому разлому в образце [6];
- 3 – горные удары (ЗАО “СУБР”) [5];
- 4 – землетрясения регионов Китая [10];
- 5 – землетрясения региона Камчатки.

что и во втором случае структурные нарушения играют большую роль в закономерностях подготовки и развития очага разрушения. Имеющийся при этом значительный разброс значений t_{pr} , связан, по нашему мнению, с различием в механизмах разрушения и требует дополнительных исследований.

Подтверждение статистической значимости рассмотренного критерия выделения областей подготовки очагов землетрясений, позволило предложить его в качестве прогностического признака. На основе оперативно получаемой информации о сейсмическом режиме Камчатки и согласно процедуре, принятой в КФ ГС РАН, в 2006 г. был осуществлен выборочный прогноз сейсмических событий (табл. 2). При этом не ставилась задача мониторинга и прогноза всех землетрясений с энергией выше заданной, что требует ресурсов значительного коллектива. Задача состояла в практической проверке принципиальной возможности прогнозирования событий различных энергий и отработке методики. Так, например, на начальном этапе диапазон прогнозных значений по энергии составлял полпорядка, что приводило к ошибкам (строки 1 и 2). В дальнейшем он был увеличен до одного порядка, что, видимо, более адекватно соответствует точности определения энергии. Отметим факт успешного прогноза событий (строки 4 и 5), относящихся к двум соседним рангам разрушения, которые произошли практически в одном месте, что является подтверждением предложенной иерархической модели разрушения горных пород.

Таблица 2. Документированные результаты прогнозирования землетрясений.

	Параметры прогноза			Спрогнозированные события		
	Время	lgE, Дж	Пространство LONE, LATN, Z, км	Время	lgE, Дж	Пространство LONE, LATN, Z, км
1	11.01-18.01.06	11.6–12.2	Определена графически	14.01.06	11.3	160.24, 57.23, 11
2	2.02–9.02.06	11–11.5	163.7–166.8, 54–56.5, 1-100	6.02.06	12.1	164.02, 56.2, 5
3	14.02–4.04.06	13–14	163.5–167, 54.5–56.5, 5-50	12.04.06	13.2	164.76, 56.05, 21
4	17.04–29.05.06	11.3–12.3	161.3–163.8, 51.7–56.5, 5-100	24.05.06	11.8	162.32, 55.43, 36
5	29.05–26.10.06	13.2–14.2	161.3–163.8, 51.0–57.0, 5-100	17.08.06	13.3	162.18, 55.54, 57

Заклучение

Используя кинетические представления о прочности твердых тел, многоуровневости структуры горных пород и сформулированную на их основе иерархическую модель разрушения горных пород, разработана методика прогнозирования сейсмических явлений. Формализован универсальный критерий формирования локального очага разрушения гетерогенных материалов. Предыдущие 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. Отличительной особенностью предложенной методики являются физически обоснованный критерий снятия тревоги и возможность прогноза энергии не только выше заданной, но и определенного энергетического диапазона. Полученное в данной работе значение вероятности выделения областей подготовки очагов равно 0.89 позволяет судить о принципиальной возможности прогнозирования землетрясений Камчатки, что и было подтверждено практически.

Авторы благодарят КФ ГС РАН за предоставленные исходные материалы по сейсмичности Камчатки и обсуждение полученных результатов. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-05-00542).

Список литературы

1. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вест. АН СССР. 1968. №3. С. 42-46.
2. Садовский М.А., Голубева Т.В., Писаренко В.Ф., Ширман М.Г. Характерные размеры горной породы и иерархические свойства сейсмичности. // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1984. №2. С. 3-15.
3. Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Спирин А.И., Фролов Д.И. Катастрофические Симуширские землетрясения 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г. // Тез. докл. межд. науч. симп. "Проблемы сейсmobезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири". Южно-Сахалинск. 2007. С. 27.
4. Томашевская И.С., Хамидулин Я.Н. Предвестники разрушения образцов горных пород. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1972. №5. С. 12-20.
5. Томилин Н.Г., Воинов К.А. Контроль состояния породного массива на основе анализа вариации временных интервалов (ВВИ) между сейсмическими событиями // Методические основы контроля состояния породного массива и прогноза динамических явлений. Национ. геофиз. комит., РАН. М.: 1994. С. 7-24.
6. Томилин Н.Г., Дамаскинская Е.Е., Павлов П.И. Кинетический характер stick-slip при деформировании горных пород // Тезисы докладов I Международной школы-семинара «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород». Красноярск. 2001. С. 13.
7. Томилин Н.Г., Дамаскинская Е.Е., Павлов П.И. Разрушение горных пород как многоуровневый процесс. Физика Земли. 2005. №8. С. 69-78.
8. Томилин Н.Г., Дамаскинская Е.Е., Павлов П.И. Статистическая кинетика разрушения горных пород и прогноз сейсмических явлений. // ФГТ. 2005. Т.47. №5. С. 955-959.
9. Томилин Н.Г., Куксенко В.С. Статистическая кинетика разрушения горных пород: энергетическая иерархия процесса // Физика Земли. 2004. №10. С. 16-25.
10. Томилин Н.Г., Павлов П.И., Ma Jin. Прогнозирование землетрясений на примере анализа сейсмичности регионов Китая // Тез. докл. межд. конф. "Научное наследие академика Г.А. Гамбурцева и современная геофизика". Москва. 2003. С. 111-112.
11. Petrov V.A., Orlov A.N. Contribution of thermal fluctuations to the scattering and the gauge effect of longevity. // Int. J. Fract. 1975. V.11. №5. P. 881-886.