

Академик М. А. САДОВСКИЙ, В. Н. КОСТЮЧЕНКО

## О СЕЙСМИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ

Еще в довоенные годы одним из авторов настоящей статьи было показано, что степень повреждений зданий наилучшим образом коррелирует с максимальной амплитудой скорости смещения дневной поверхности грунта (<sup>1</sup>, <sup>2</sup>). Было обнаружено, что закон затухания амплитуды скорости смещения с расстоянием слабо зависит от условий взрыва и свойств среды, что способствовало распространению разработанной тогда же методики прогноза сейсмического действия. Найденные пороговые значения скорости смещения, при которых возникают легкие повреждения в зданиях, нашли затем подтверждение в многочисленных исследованиях отечественных и зарубежных ученых и инженеров. Вся методика расчета сейсмического эффекта опиралась на опыт промышленных взрывов того времени. Хотя среди этих взрывов отдельные были довольно крупными, порядка 10<sup>3</sup> тонн в.в., основной диапазон изменения энергии взрыва был невелик.

При проведении более мощных взрывов, когда существенно возросли размеры сейсмически опасных зон и увеличилась продолжительность колебаний, появилась возможность на более широкой основе произвести отбор определяющих параметров сейсмической волны. Это необходимо теперь сделать потому, что возник существенный разноречивый в определении амплитудных параметров колебаний, соответствующих тому или иному уровню повреждений зданий и сооружений.

При анализе экспериментальных данных следует принимать во внимание те группы волн, которые вызывают колебания грунта с частотами, соизмеримыми с собственными частотами зданий (основной период одноэтажных и двухэтажных зданий 0,1—0,3 сек.). При взрывах зарядов 10 кт и выше в интересующем нас частотном диапазоне колебания обычно вызываются объемными (продольными и поперечными) волнами. В качестве амплитудного параметра нами использовалась максимальная скорость смещений (векторная или горизонтальная). Таким образом, частотный диапазон колебаний и максимальная амплитуда скорости смещения  $v$  — вот те параметры, которые на основе ранее развитых представлений являются определяющими.

Теперь надлежало проверить это на новом материале. В этой связи были классифицированы повреждения зданий, а в качестве меры повреждения в каждом классе бралась доля поврежденных зданий к общему количеству. Корреляция между частотой повреждаемости и скоростью смещения почвы при сейсмическом воздействии оказалась достаточно высокой; их связь может быть выражена с помощью логарифмически нормального закона распределения, который, вероятно, отражает случайный характер различия в качестве однотипных зданий (время постройки и ремонта, качество работ и т. п.). В этом случае относительное число поврежденных зданий выражается формулой

$$n = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^t e^{-t^2/2} dt, \quad (1)$$

$$t = a + b \lg v = b \lg (v/v_0).$$

Коэффициент  $b$  определяет ширину распределения, а  $v_0$  есть некоторая характерная для данного типа зданий скорость, при которой получает повреждение половина всех зданий (при  $v=v_0$ ,  $t=0$ ,  $n=0,5$ ). Величины  $b$  и  $v_0$  для каждого типа зданий можно определить, анализируя результаты наблюдений. В качестве примера в табл. 1 приведены данные о повреждениях зданий при подземном взрыве «Рулисон» <sup>(3)</sup> (глубина взрыва 2570 м, 40 кт), а также измеренные при этом взрыве на различных расстояниях максимальные значения вектора скорости  $v$  <sup>(4, 5)</sup>. Судя по данным работы <sup>(6)</sup>, горизонтальные скорости примерно в 1,2—1,5 раза меньше указанных в табл. 1.

Таблица 1

Расстояние, км	$v$ , см/сек	Число зданий		$n$ , %	$t$	Расстояние, км	$v$ , см/сек	Число зданий		$n$ , %	$t$
		всего	повреж- денных					всего	повреж- денных		
11	11	164	76	46,5	0,09	23	3	106	6	5,7	-1,58
19	5	139	6	4,3	-1,71	30	2	168	6	3,6	-1,8
20	4	818	70	8,5	-1,37	65	0,4	4000	3	0,075	-3,2

Представленные в табл. 1 данные приведены на рис. 1, 1. Сплошной и пунктирной линиям на этом рисунке соответствуют полученные по методу наименьших квадратов уравнения регрессионных прямых

$$t = -2,5 + 2 \lg v, \quad \lg v = 1,2 + 0,47t.$$

Коэффициент корреляции равен 0,97.

Темные кружки на рис. 1 — данные о повреждении штукатурки при взрыве «Рулисон» <sup>(7)</sup>. За исключением одной точки (взята в скобки), эти данные хорошо согласуются с приведенными в табл. 1, т. е. в настоящем примере речь идет в основном о так называемых легких повреждениях, при которых появляются трещины в штукатурке.

Разброс экспериментальных данных на рис. 1 характеризуется средним квадратичным отклонением  $\sigma = 0,125$  точек от прямой  $\lg v = 1,2 + 0,47t$ , что соответствует изменению максимальной скорости в 1,3 раза. Учитывая, что точность определения максимальных скоростей при подземных взрывах обычно невысока (возможны отклонения от ожидаемых значений  $v$  в 1,5—2 раза), можно использовать зависимости, аналогичные полученной выше, для прогноза количества поврежденных при взрыве зданий. Точность такого прогноза будет зависеть прежде всего от точности прогноза максимальной скорости, причем точность определения количества поврежденных зданий заметно уменьшается при малых  $n$  или  $v$ .

Эта особенность кривой распределения хорошо видна на рис. 2, где в логарифмическом масштабе приводится зависимость  $n$  от  $v$ . Кружками представлены экспериментальные данные, сплошной линией — зависимость (1), в которой  $t = 2 \lg (v/18)$  ( $v$  в см/сек). Наклон кривой  $n(v)$  резко возрастает при малых  $n$ , что сильно снижает точность прогноза в этой области. Однако, если на больших расстояниях от взрыва нет очень крупных населенных пунктов, ошибка в оценке общего числа поврежденных зданий будет определяться областью средних  $n$  и поэтому вряд ли будет превышать ошибку в определении максимальных скоростей.

При проведении взрывов небольшой мощности, когда число зданий, подвергающихся воздействию сейсмических колебаний, невелико, зависимость  $n(v)$  можно использовать для оценки вероятности появления тех или иных повреждений. При этом, учитывая отмеченную выше зависи-

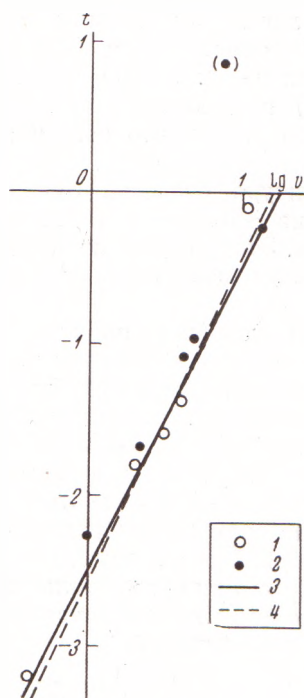


Рис. 1

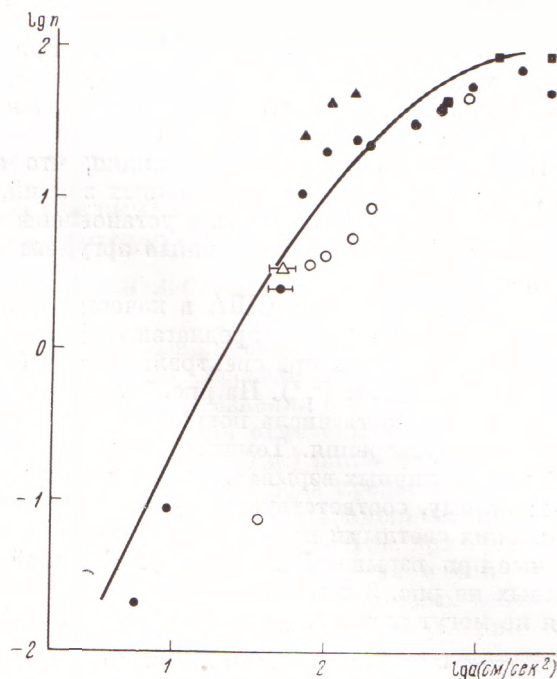


Рис. 3

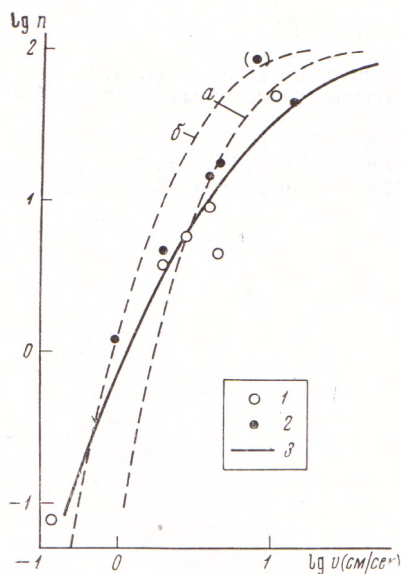


Рис. 2

Рис. 1. Логарифмически-нормальный закон распределения числа  $n$  поврежденных зданий при взрыве «Рулисон». 1 — данные табл. 1, 2 — данные (7), 3, 4 — регрессионные прямые:  $t=2,5+2 \lg v$  (3),  $\lg v=1,2+0,47 t$  (4)

Рис. 2. Зависимость числа  $n$  поврежденных зданий от максимальной скорости  $v$ . а, б — зависимость от максимальной горизонтальной скорости числа одноэтажных (а) и двух — трехэтажных (б) зданий, получивших легкие повреждения; 1—3 — то же, что на рис. 1

Рис. 3. Зависимость числа поврежденных зданий от псевдоускорения (8)

мость особенности кривой  $n(v)$ , в простейших случаях можно ввести некоторое пороговое значение скорости, ниже которой вероятность появления повреждений будет невелика, и, следовательно, можно считать, что при таких скоростях сейсмические колебания не будут представлять опасности для зданий. Ясно, что введение критической скорости тем эффективнее, чем уже распределение  $n(v)$ . Для сравнения на рис. 2 пунктиром показаны зависимости  $n(v)$  для одноэтажных (а) и двух — трехэтажных зданий (б), полученные при мощных подземных взрывах. Видно, что

пунктирные кривые  $a$  и  $b$  проходят вблизи экспериментальных точек, причем при больших  $v$ , т. е. вблизи взрыва, где располагались небольшие населенные пункты, результаты наблюдений хорошо описываются зависимостью  $n(v)$  для одноэтажных зданий, а при малых  $v$  — зависимостью для двух — трехэтажных зданий. Распределение  $n(v)$  при более детальной классификации по типам зданий становится более узким, что облегчает определение критических скоростей.

Из характера распределения видно, что амплитуда скорости смещения, отвечающая 50% поврежденных зданий, равна  $\sim 10$  см/сек и близка к тем значениям, которые были установлены ранее. Этот результат можно рассматривать как весьма важный аргумент в пользу выбранного амплитудного параметра.

В последние годы в США в качестве критерия повреждения зданий при подземных взрывах предлагаются так называемые псевдоускорения, которые получаются при спектральной обработке осциллограмм колебаний поверхности Земли (<sup>3</sup>, <sup>8</sup>). На рис. 3 представлена заимствованная из работы (<sup>8</sup>) зависимость числа поврежденных зданий от величины максимального псевдоускорения. Темными точками показаны результаты наблюдений при различных взрывах, а сплошная кривая, приведенная в работе (<sup>8</sup>), по-видимому, соответствует средним значениям. На этом же рисунке для сравнения светлыми кружками показаны более поздние результаты, полученные при взрыве «Рулисон» (<sup>3</sup>). Большой разброс экспериментальных данных на рис. 3 свидетельствует, по-видимому, о том, что псевдоускорения не могут служить универсальным критерием повреждений.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
3 XII 1973

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> М. А. Садовский, Сейсмический эффект взрывов, М., 1939. <sup>2</sup> М. А. Садовский, Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов, М. — Л., 1946. <sup>3</sup> Ф. Хольцер, В сборн. пер. Подводные и подземные взрывы, М., 1974. <sup>4</sup> P. C. Loux, Proc. Symp. Eng. Nucl. Expl., v. 2, 1069 (1970). <sup>5</sup> A. D. Thornbrough, Peaceful Nucl. Expl. II, Proc. Panel., 1974, p. 235. <sup>6</sup> L. Van der Horst, ibid., p. 183. <sup>7</sup> L. Lee, R. E. Skjei, Proc. Symp. Eng. Nucl. Expl., v. 2, 1083 (1970). <sup>8</sup> N. E. Nadolski, Bull. Seismol. Soc. Am., v. 59, 2, 487 (1969).