

Ф. Ф. АПТИКАЕВ

О ВЛИЯНИИ ГРУНТОВЫХ УСЛОВИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЙ
ЭФФЕКТ В АЛМА-АТЕ ПО ДАННЫМ ВЗРЫВОВ В МЕДЕО В
1965—1967 гг.

В 1966—1967 гг. в Медео при строительстве селезащитной плотины были произведены мощные взрывы, которые регистрировались сейсмическими станциями различных организаций. 21 октября 1966 года взорваны заряды в 1689 т и 3604 т с интервалом в 3,6 сек. В Алма-Ате и ее окрестностях эти взрывы регистрировались раздельно. Часть материала о сейсмическом эффекте при этих взрывах уже опубликована [2, 4, 5]. 14 апреля 1967 года произведены взрывы зарядов общим весом около 3 кт на противоположном борту долины. Вследствие малости временного интервала между взрывами разделить их на записях на этот раз не удалось. Для предварительной оценки сейсмического эффекта при мощных взрывах в 1965 г. в Медео были произведены масштабные взрывы зарядов в 2,85 и 17 т. Эти взрывы регистрировались сетью постоянных и временных станций Комплексной сейсмологической экспедиции Института физики Земли АН СССР. Полученные данные являются ценным материалом для разработки метода инструментального микрорайонирования, тем более, что взрывы в Медео производились в эпицентральной области землетрясения, разрушившего город в 1887 г. Самым распространенным методом инструментального сейсмического микрорайонирования является амплитудный метод, основанный на корреляции сейсмического эффекта с амплитудами сейсмических колебаний, вызванных относительно слабыми источниками (микросейсмь, удары, взрывы, слабые землетрясения). Настоящая работа посвящена изучению возможностей этого метода, когда источниками сейсмических колебаний являются взрывы.

Кроме данных Института физики Земли АН СССР, нами частично использованы материалы Института геологических наук АН Казахской ССР и Таджикского института сейсмологии и сейсмостойкого строительства.

Макросейсмический эффект взрывов в пунктах установки сейсμοприемников изучался И. В. Горбуновой с участием С. И. Масарского и автора, а также И. А. Ершовым.

Существующие представления о точности амплитудного метода весьма противоречивы. Сопоставление результатов амплитудного метода микрорайонирования с сейсмическим эффектом землетрясений, имевших место на территории Алма-Аты в прошлом, позволяет в какой-то мере оценить роль некоторых факторов, определяющих точность амплитудного метода.

Погрешности, присущие амплитудному методу, вызываются в основном следующими причинами:

1. Несовершенство методики наблюдений и расчетов, в частности:

а) пренебрежение влиянием других параметров колебаний—длительности, поляризации, направления подхода волны и т. д.
 б) допущение о равномерности инструментальной сейсмической шкалы, т. е. допущение о возможности линейной экстраполяции результатов, полученных по слабым колебаниям, в область сильных движений. Правило выбора величины $\lg A/dJ$ при этом нам не известно. Здесь A —амплитуда колебаний, J —интенсивность сотрясения в баллах.
 2. Допущение, что распределение приращений балльности не зависит от особенностей сейсмических источников—их типа, координат, механизма очага и т. д.
 3. Допущение, что сейсмический эффект определяется только параметрами сейсмических колебаний, или, другими словами, допущение о применимости инструментальной шкалы на любых грунтах.

Разумеется, все эти факторы взаимосвязаны и разделение их на три группы довольно условно. Рассмотрим влияние каждой из этих групп.

При взрывах в Медве на эпицентральных расстояниях свыше 10 км получено хорошее совпадение инструментальной и макросейсмической оценок интенсивности сотрясения, а следовательно, и оценок приращения балльности. На меньших расстояниях инструментальная оценка по шкале С. В. Медведева оказывается завышенной (табл. 1). Это может

Таблица 1
 Интенсивность J сотрясения в баллах, определенная по максимальным значениям скоростей смещения и макросейсмическим данным при взрывах в Медве 21 октября 1966 года

№ пункт-та	Пункт наблюдения	Эпицентр- альное расстоя- ние, км	J^* инстр.	$J_{\text{макр.}}$
1	Селевая станция	0.4	10—11	7—8
2	Дом отдыха „X лет Казахстана“	1.1	8	6
3	Поселок Медве	1.4	7	6
4	Турбаза „Горельник“	1.7	7	5—6
5	Дом отдыха „Просвещенец“	1.8	6	5
8	Астрономическая обсерватория	7.5	6—7	5—6
10	Пр. Ленина, 103	10.6	3	2
17	С/ст. „Алма-Ата“	15.3	4	4
16	Пр. Коммунистический—ул. Гоголя	15.2	3	4
18	Пр. 50-летия Октября—ул. Панфилова	16.1	3	3
19	С/ст. „Талгар“	17.1	1—2	2—3
22	Микрорайон 6	18.2	2	2—3

быть связано с неправильным выбором шага инструментальной шкалы для условий г. Алма-Аты. Сопоставление данных о скоростях смещения с макросейсмическим эффектом показало, что приросту интенсивности сотрясения на 1 балл соответствует увеличение амплитуды колебаний в 2,5—3 раза, т. е. $\lg A/dJ = 0,4 \div 0,5$. Отметим, что как для скоростей смещения, так и для ускорений общепринято другое соотношение [4, 6] $\lg A/dJ = 0,3$.

Впрочем, известны работы, где приводятся данные о более интенсивном изменении амплитуд на балл сейсмической шкалы. Б. Гутенберг и К. Рихтер [3] приводят формулу $M_L = 1 + 2/3J$, где M_L —

* По шкале Медведева для взрывов.

так называемая локальная магнитуда, соответствующая на малых эпицентральных расстояниях поперечным волнам. Согласно этой формуле, $\lg A/dJ=2/3$.

Поскольку факторы, определяющие величину шага инструментальной шкалы $\lg A/dJ$, нам не известны, то, выбирая то или иное значение, мы совершаем некоторую ошибку. Для города Алма-Аты неопределенности в выборе шага шкалы соответствует среднеквадратичная погрешность микрорайонирования около четверти балла.

При оценке приращения балльности мы приняли $\lg A/dJ=0,4$. В качестве эталонной была выбрана сейсмическая станция «Талгар» (скальный грунт). На рис. 1 показаны максимальные значения ампли-

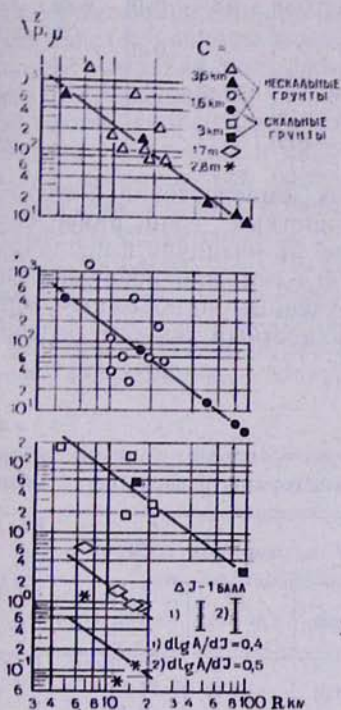


Рис. 1. Максимальные амплитуды продольных волн на вертикальной составляющей при взрывах в Медео

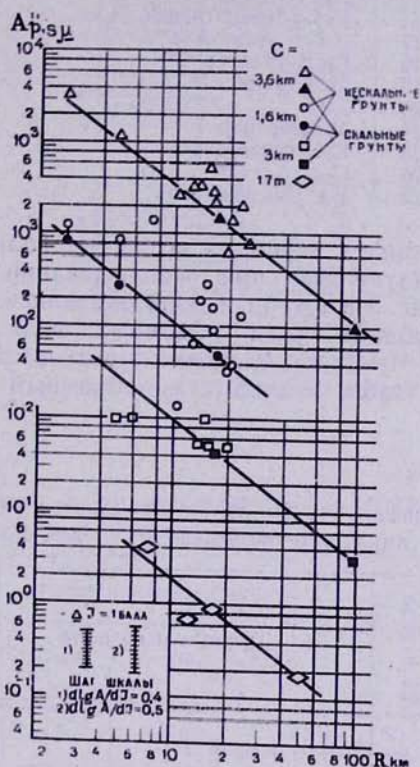


Рис. 2. Максимальные амплитуды объемных волн на горизонтальных составляющих при взрывах в Медео

туд смещения для продольных волн на вертикальной составляющей при разных взрывах. Приращения балльности, соответствующие этим амплитудам, приведены в табл. 2. Записи на горизонтальных компонентах обрабатывались отдельно. Поскольку при взрывах на малых эпицентральных расстояниях отделить продольные волны от поперечных трудно, наши данные относятся к совокупности тех и других.

Результаты обработки данных приведены на рис. 2 и в табл. 3. Данные по поверхностным волнам (рис. 3) представляют особый интерес, так как периоды поверхностных волн при взрывах в Медео

Таблица 2

Прирост балльности по отношению к скальному грунту, определенный по изменению амплитуды A_p^* для продольных волн на вертикальной составляющей

№ пункта	Пункт наблюдения	ΔI при взрывах зарядов:					$\Delta I_{\text{средн}}$
		3,6 км	1,6 км	3 км	17 м	2,8 м	
6	Дом отдыха № 2	-0,3	-0,2	-0,7			-0,4
8	Астрономическая обсерватория	+0,4	+1,6				+1,0
10	Пр. Ленина, 103	-0,6	-0,4				-0,5
11	Погранучилище		-1,5				-1,5
12	Пр. Ленина, 89	-0,7	-0,6		0,0	-0,9	-0,6
13	Ул. Кооперативная		-1,4	-1,5			-1,4
17	С/ст. "Алма-Ата"	+1,5	+1,6	+0,9			+1,3
19	С/ст. "Талгар"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	М. Станица	-0,2			0,0		-0,2
20	ТЭХ						0,0
24	Микрорайон 1	-0,4	0,0				-0,2
25	Кольцевая дорога			-0,5			-0,5
26	С-з "Акса́й"	+1,0	+1,4				+1,2
27	Ул. Крыжницкого	+0,0	+0,2				+0,1

ближе к периодам объемных волн сильных землетрясений. Результаты, полученные при использовании поверхностных волн, приведены на рис. 3 и в табл. 4. Они оказались, несмотря на различия в периодах колебаний (для объемных волн $T=0,2 \div 0,4$ сек, для поверхностных — $T=1 \div 2$ сек), близкими к результатам, полученным по объемным волнам. В табл. 5 данные по объемным и поверхностным волнам осреднены.

Таблица 3

Прирост балльности по отношению к скальному грунту, определенный по изменению амплитуды смещений A_p^* для объемных волн горизонтальной составляющей

№ пункта	Пункт наблюдения	ΔI при взрывах зарядов				$\Delta I_{\text{средн}}$
		3,6 км	1,6 км	3 км	17 м	
6	Дом отдыха № 2*	0,0	+1,0	-1,2		-0,1
7	ГЭС			-0,8		-0,8
8	Астрономическая обсерватория		+2,4		+0,4	+1,4
10	Пр. Ленина, 103	-0,2				-0,2
11	Погранучилище		-2,2			-2,2
12	Пр. Ленина, 89	+0,4	-0,2		-0,8	-0,2
14	Пр. Абля—ул. Фурманова			-0,2		-0,2
15	Пр. Ленина, 14	+0,6				+0,6
16	Пр. Коммунистический—ул. Гоголя	+0,7	+1,2			+0,9
17	С/ст. "Алма-Ата"	+1,2	+1,7	+0,6		+1,2
18	Пр. 50-летия Октября—ул. Панфилова	+0,4	+0,6			+0,5
19	С/ст. "Талгар"	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	Микрорайон 6	+0,2	0,0			+0,1
23	Микрорайон 5			-0,4		-0,4
24	Микрорайон 1	-0,6	-0,2			-0,4
27	Ул. Крыжницкого	0,0				0,0

* Две станции, разнесенные примерно на 100 м.

Анализ первичного материала показывает, что грунты оказывают влияние не только на амплитуду колебаний, но и на их частотный состав. Следовательно, оценки приращения балльности, произведенные по амплитудам смещения, скорости и ускорения, в общем случае будут различными. Это вносит некоторую неопределенность в получаемые результаты, поскольку регистрирующая аппаратура пропускает без искажений ограниченную полосу частот. Сравнение результатов, полученных по скоростям и амплитудам смещений, показало, что во втором случае значения прироста балльности систематически оказываются заниженными в среднем на 0,4 балла. Чтобы уравнять результаты, мы увеличили приращения балльности, полученные по амплитудам смещения, на 0,4 балла (табл. 5). Оставшаяся после введения этой поправки дисперсия характеризует погрешность, связанную с неполнотой корреляции изменений амплитуд смещения и скорости, а также с особенностями соотношения спектра сейсмических колебаний и частотных характеристик регистрирующей аппаратуры. По данным табл. 5 эта погрешность оценивается среднеквадратичным значением около 0,3 балла. Таким образом, суммарная погрешность, связанная с

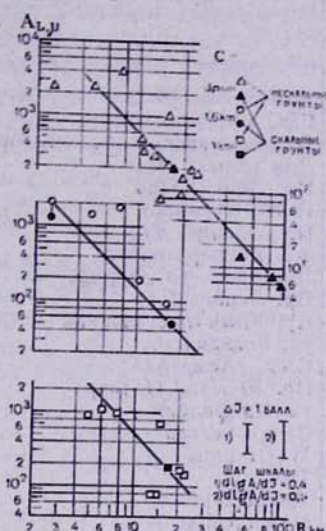


Рис. 3. Максимальные амплитуды поверхностных волн при взрывах в Медео

Таблица 4

Прирост балльности по отношению к скальному грунту, определенный по изменениям амплитуды смещения ΔL для поверхностных волн

№ пункта	Пункт наблюдения	ΔL при взрывах зарядов			$\Delta L_{\text{средн}}$
		3,6 кг	1,6 кг	3 кг	
6	Дом отдыха № 2*	-0,1	+0,9	-1,0	-0,1
7	ГЭС			-0,3	-0,3
8	Астрономическая обсерватория	+1,4	+2,2		+1,8
9	Дом отдыха № 1			0,0	0,0
10	Пр. Ленина, 103	-0,1	+0,4		+0,2
11	Пограничное	-0,4			-0,4
12	Пр. Ленина, 89	-0,2			-0,2
13	Ул. Кооперативная	-1,4		-1,2	-1,3
14	Пр. Абая + ул. Фурманова			-1,4	-1,4
17	С/ст. "Алма-Ата"	+1,6		+1,3	+1,4
18	Пр. 50-летия Октября — ул. Паффилова	0,0	+0,6		+0,3
19	С/ст. "Талгар"	0,0	0,0	0,0	0,0
22	Микрорайон 6	0,0			0,0
24	Микрорайон 1	-0,6			-0,6
25	Кольцевая дорога			+0,4	+0,4
26	С-з "Акса́й"	+0,6			+0,6
27	Ул. Крыжницкого	+0,7			+0,7

* Две станции, разнесенные примерно на 100 м.

Таблица 5

Приращении балльности по отношению к скальному грунту, определенные по изменением амплитуд смещений A и скоростей смещений $\dot{u}$

пункта №	Пункт наблюдения	Эпицентрально- ное расстояние, км	$\Delta A(A)$	$\Delta \dot{u}$	$\Delta M_{\text{средн}}$
6	Дом отдыха № 2	4.9	+0.2	+0.4	+0.3
7	ГЭС	6.0	-0.1	+0.4	+0.2
8	Астрономическая обсерватория	7.5	+1.9	+1.4	+1.7
9	Дом отдыха № 1	7.6	-0.4	-0.2	-0.4
10	Пр. Ленина, 103	10.6	+0.2	-0.2	0.0
11	Погранучилище	10.6	-0.7	-0.2	-0.7
12	Пр. Ленина, 89	12.5	+0.1	-0.2	0.0
13	Ул. Кооперативная	14.0	-1.0	-1.1	-1.0
14	Пр. Абая — ул. Фурманова	14.1	-0.4	0.0	-0.2
15	Пр. Ленина, 14	14.9	+1.0	+1.6	+1.3
16	Пр. Коммунистический — ул. Гоголя	15.2	+1.3	+1.4	+1.4
17	С/ст. «Алма-Ата»	15.3	+1.7	+1.6	+1.7
18	Пр. 50-летия Октября — ул. Панфилова	16.1	+0.8	+1.1	+1.0
19	С/ст. «Талгар»	17.1	0.0	0.0	0.0
20	М. Станица	18.0	-0.2	+1.1	+0.7
21	ТЭЦ	18.0	+0.4	+1.1	+0.8
22	Микрорайон 6	18.2	-0.4	0.0	-0.2
23	Микрорайон 5	18.2	0.0	0.0	0.0
24	Микрорайон 1	18.5	0.0	0.0	0.0
25	Кольцевая дорога	22.8	+0.4	-0.2	+0.1
26	С-з «Акса́й»	23	+1.3	+1.1	+1.2
27	Ул. Крыжицкого	25	+0.8	+0.8	+0.8

факторами, отнесенными нами к первой группе, составляет не менее 0,4 балла. Здесь не учтена погрешность экстраполяции полученных данных в область сильных движений.

Погрешность, связанную с факторами, отнесенными нами ко второй группе, можно оценить, сравнивая результаты, полученные по различным взрывам (табл. 2, 3, 4). При взрывах, произведенных в одном месте, среднеквадратичное отклонение результата отдельного определения приращения балльности составляет около 0,4 балла. Очевидно, это минимальная оценка. При землетрясениях особенности волновой картины, связанные с расположением гипоцентра и механизмом очага, будут еще заметнее. Например, при взрывах 1966 и 1967 гг. в пунктах 10, 11, 12, 14, расположенных по левому берегу реки Малой Алмаатинки южнее проспекта Абая, сейсмический эффект был слабее, чем на сейсмической станции «Алма-Ата» в среднем на 2 балла (инструментальная и макросейсмическая оценки совпадают). При землетрясении же 21 декабря 1958 г., по данным Э. М. Антоненко [1], сейсмический эффект на этом участке был даже выше, чем на станции «Алма-Ата», на 1 балл. Аналогичные расхождения наблюдаются при оценке сейсмического эффекта сильнейших землетрясений 1887 и 1911 гг.

Обработав материалы об афтершоках Матсуширского землетрясения, опубликованные Институтом землетрясений в Токио [10], мы нашли, что при регистрации серии афтершоков на фиксированной точке среднеквадратичное отклонение инструментальной и макросейсмической оценок сейсмического эффекта составляет около 0,6 балла японской шкалы. Эта цифра характеризует совместную ошибку макросейсмического и инструментального опреде-

лений. Считая эти оценки равнозначными, получим, что погрешность, связанная с индивидуальными особенностями землетрясений, даже относящихся к одной серии афтершоков, составляет около 0,4 балла японской шкалы. Таким образом, можно утверждать, что приращение балльности зависит от особенностей сейсмического источника. Средне-квадратичное отклонение приращения балльности при этом составляет около 0,5 балла.

Роль грунта не сводится только к увеличению или уменьшению амплитуды колебаний и деформации спектра приходящих волн. Одинаковые ускорения вызывают различные разрушения в зависимости от свойств грунтов. Существуют различные инструментальные шкалы для скальных и рыхлых пород [12]. Из материалов, опубликованных Институтом землетрясений в Токио [10], следует, что землетрясениям равной интенсивности на станции «Вакахо» соответствуют вдвое меньшие значения ускорений, чем на станции «Матсуширо-С». Расстояние между этими станциями составляет всего около 7 км. Таким образом, сейсмический эффект, вызванный одинаковыми колебаниями, может в зависимости от грунтовых условий измениться, по крайней мере, на 0,5 балла. Эта оценка согласуется с данными А. Дворака [9], установившего, что на прочных грунтах повреждения в зданиях при скорости смещения 13,5 см/сек не наблюдаются, в то время как в неблагоприятных условиях разрушения начинаются уже при скорости 10 см/сек.

А. В. Николаев [7] при исследовании сейсмических свойств грунтов обнаружил, что приращения балльности лучше коррелируются не с изменениями амплитуд, а с такими свойствами грунтов, как скорость распространения сейсмических волн, поглощение и т. п.

Свойства грунта оказываются существенно зависящими от амплитуды вибраций. По данным [9], Окамото [8], прочность грунта на сдвиг при сильных вибрациях уменьшается в несколько раз. При слабых же вибрациях изменение свойств грунта незаметно. В сильно увлажненных грунтах при скорости смещения около 8 см/сек иногда наблюдается явление разжижения. Классическим примером землетрясения, сейсмический эффект которого определен разрушением грунтов, является землетрясение в Ниигата [11].

Аномально высокое затухание сейсмических волн южнее проспекта Абая, о котором говорилось выше, может быть связано с наличием тектонических нарушений. Для слабых источников, расположенных на юге, этот участок характеризуется снижением сейсмического эффекта. Однако при сильном землетрясении с этими нарушениями могут быть связаны новые подвижки, что приведет к резкому усилению сейсмического эффекта.

Заключение. Свойства грунта, влияющие на сейсмический эффект, можно разделить на две группы. Факторы первой группы вызывают изменение амплитуды и других параметров сейсмических колебаний, которые могут быть учтены соответствующими инструментальными шкалами. К таким факторам, в первую очередь, относятся акустическая жесткость грунта и совокупность параметров, определяющих его резонансные свойства—мощность слоев, соотношение скоростей распространения сейсмических волн в этих слоях и т. д.

Параметры грунта, относящиеся ко второй группе, сами могут зависеть от параметров сейсмических колебаний. Сюда относится прежде всего способность рыхлых грунтов изменять свои физико-механические свойства под воздействием сейсмических колебаний—просадка, уменьшение прочности на сдвиг, явление разжижения и т. д.

Амплитудным методом учитываются параметры грунта, относящиеся к первой группе. Параметры второй группы должны учитываться

отдельно на основании геологических и гидрогеологических изысканий и изучения физико-механических свойств грунта.

Точность амплитудного метода без учета параметров грунта, отнесенных ко второй группе, не выше 0,8 балла. Если влияние этих параметров полностью учтено, то точность амплитудного метода микрорайонирования теоретически может достигнуть 0,5 балла. Это соответствует максимально возможной точности макросейсмической оценки, которая лимитируется различиями в волновой картине землетрясений.

Комплексная сейсмологическая экспедиция
Института физики Земли АН
СССР

ЛИТЕРАТУРА

1. Антоенко Э. М. Макросейсмическое обследование землетрясений на территории города Алма-Аты. Сб. «Сильные землетрясения Средней Азии и Казахстана», вып. I, 1970.
2. Аптикаев Ф. Ф. и др. Результаты научных наблюдений при взрыве в Медео. Вестник АН Каз. ССР, №5, 1967.
3. Гутенберг Б., Рихтер К. Магнитуда, интенсивность, энергия и ускорение как параметры землетрясений. Сб. «Слабые землетрясения» ИЛ, 1961.
4. Ершов И. А. Колебания грунтов г. Алма-Аты при взрыве в Медео. Сб. «Сейсмическое движение грунта», Изд. «Наука», 1970.
5. Лаврова Н. И. и Лавров И. М. Колебания зданий при взрыве. Сб. «Сейсмическое движение грунта». Изд. «Наука», 1970.
6. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. Госстройиздат, 1962.
7. Николаев А. В. Сейсмические свойства грунтов. Изд. «Наука», 1965.
8. Окамото Ш. Несущая способность песчаного грунта и горизонтальное давление земли во время землетрясения. Сб. «Международная конференция по сейсмостроительству», Госстройиздат, 1961.
9. Dvorak A. Experimentelle Bestimmung der Intensität von Sprengungerschütterungen. Geofys. sb., 12, 1965.
10. Kanai K. et al. Strong Earthquake Motion Records in Matsushiro Earthquake Swarm Area. Univ. Tokyo. Pt. 1, 1967; pt. 2, 1968.
11. Kawasumi H. et al. General Report on the Niigata Earthquake of 1964. Tokyo Electrical Engineering College Press, 1968.
12. Neumann F. Earthquake Intensity and Related Ground Motion. Univ. of Wash. Press, 1954.