

Д. А. ХАРИН

**КОЛЕБАНИЯ ГРУНТА В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ВЗРЫВА И  
ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ  
ЗДАНИЙ ВЗРЫВАМИ**

В работе даны результаты сейсмических наблюдений при взрывах в различных грунтах (лесс, глина, суглинки); более подробные данные приводятся по лессам, которые должны служить основанием зданий, возводимых в г. Душанбе, с целью их изучения при действии сейсмовзрывных волн.

В программе работ Душанбинской сессии Совета по сейсмологии поставлен на обсуждение вопрос об исследовании сейсмостойкости строительных конструкций с помощью сейсмовзрывных волн. Институт сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Таджикской ССР предлагает для этой цели построить в натуральную величину секции жилых домов различной конструкции и вызывать их сотрясения взрывами различной мощности. Подобные исследования запланированы также в Узбекской и Молдавской республиках [1, 2].

Здания при испытаниях намечено доводить до серьезных повреждений, используя для этого мощное воздействие на фундамент сильных движений грунта в ближней зоне взрыва. Эта зона долго оставалась недоступной для производства в ней сейсмических измерений из-за отсутствия приборов, способных записывать, не повреждаясь, большие перемещения. Только в сравнительно недавнее время, после разработки соответствующей аппаратуры, удалось провести измерение параметров колебаний грунта в широком интервале эпицентральных расстояний, в том числе и в ближней зоне взрыва [3, 4, 5].

Рассмотрение некоторых результатов этих исследований под углом зрения практического использования в запланированных работах и является целью настоящей статьи. Исследования были проведены совместно с Институтом химической физики, Союзвзрывпромом и Институтом физики Земли в 1957 г. в Южном Казахстане. Их основной целью было изучение механизма выброса грунта и образования воронки при взрывах. Сейсмические наблюдения были поставлены попутно.

Серия сосредоточенных взрывов с весами зарядов 10, 100, 1000 и 10 000 кг была произведена на трех площадках, строение грунта которых несколько отличалось мощностью верхнего слоя лессовидного суглинка (плотность 1,6 г/см<sup>3</sup>, скорость распространения продольных волн 400 м/сек.), прикрывающего основную толщу синих глин (плотность 1,9—2,0 г/см<sup>3</sup>, скорость 1900—2000 м/сек.), простирающуюся на глубину свыше 400 м. На площадке 1 мощность суглинка достигала 15—20 м, а на площадках 2 и 3 не превышала 1,5—2,0 м. Ниже на последних двух площадках залегали буро-зеленые глины с толщиной слоя 5—7 м.

Все взрывы были на выброс. Приведенные глубины заложения зарядов, т. е. величины

$$\bar{h} = \frac{h}{\sqrt{\frac{3}{c}}}$$

где  $c$ —вес заряда в кг,  $h$ —глубина в м, взрывали в пределах 0,4—0,7, за исключением двух зарядов весом 1000 кг, заложенных на глубину 15 м ( $h=1,5$ ). Таким образом, на площадке 1 взрывы были произведены в слое лёссовидного суглинка, а на остальных в слое буро-зеленых или синих глин.

Для проектируемых работ наибольший интерес представляют данные, полученные на площадке 1, так как ее строение ближе всего совпадает с той, на которой будут воздвигнуты опытные здания. Этим опытам, естественно, уделяется большее внимание. Опытные данные по другим площадкам привлекаются для выявления особенностей волновой картины в лёссе.

Приборы расставлялись на поверхности грунта вдоль профиля на различных приведенных расстояниях:

$$\bar{r} = \frac{r}{\sqrt[3]{c}}$$

где  $r$ —в м,  $c$ —в кг.

Промежутки между приборами увеличивались вместе с ростом  $\bar{r}$ . Регистрировались колебания по вертикальной— $z$  и горизонтальной (радиальной)— $\chi$  составляющим движения. В табл. 1 показаны веса зарядов и интервалы расстояний, на которых были проведены измерения в различных грунтах.

Таблица 1

Грунт	$\frac{c}{\text{кг}}$	$\bar{r}$	$r_m$
Лёссовый суглинок	10	0,9—23	2—50
	80	1,4—70	6—300
	1000	1,0—30	10—300
Синяя глина	100	1,2—4,7	5—220
	1000	1,5—60	15—600
	10000	1,8—33	40—715

Отметим, что край воронки соответствует  $\bar{r} \sim 0,8 \div 0,85$  и что при всех более ранних исследованиях приборы располагались на приведенных расстояниях  $\bar{r} \geq 5$ .

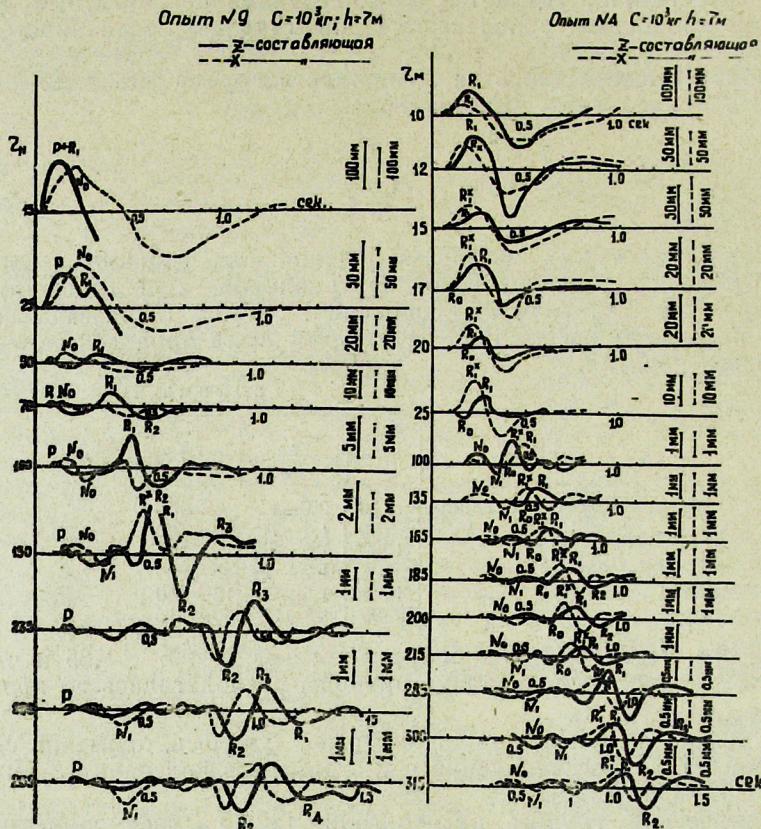
Так близко подойти к воронке взрыва удалось, применив сейсмоприемники ВБП-3, позволяющие регистрировать колебания с амплитудами до 200—300 мм [3].

Сейсмические группы располагали также сейсмоприемниками ВЭГИК, ВИБ-А и ВИБ-В. Регистрация колебаний производилась на осциллографах ПОБ-12, Н-700 и ОШ-9. Записывались смещения в диапазоне от 0,001 до 200 мм и скорости смещений грунта в диапазоне от 0,1 до 1000 см/сек.

Для изучения процесса выброса грунта применялась обычная и замедленная киносъемка. Данные ее были сопоставлены с сейсмическими наблюдениями и позволили выявить особый характер источника—(взрыва) на выброс.

На фиг. 1 показаны колебания грунта, записанные при взрывах с одинаковыми параметрами ( $C=1000$ ,  $h=0,7$ ) в лёссе и глине. Записи этих взрывов выбраны как более подходящие к планируемым камуфлетным взрывам. При взрывах с  $h=1,5$  выброса грунта не было, образовались только провальные воронки. На фиг. 1 слева указаны эпицентральные расстояния приборов и масштабы записей. Отклонение вверх соответствует движению грунта вверх и от взрыва.

Параллельное рассмотрение волновых картин, полученных на различных площадках, показывает, что на больших расстояниях колебания в обоих грунтах схожи между собой по форме. Максимальные перемещения, не превышающие 2—3 мм, отмечались ближе к концам записей. Следовательно они переносятся волнами, имеющими относительно малую скорость распространения. Периоды колебаний этих волн заключаются в пределах 0,24—0,27 сек. Фазы этих волн обозначены на фиг. 1 буквами  $R_2$ ,  $R_3$  и т. д.



Фиг. 1. Перемещения грунта на различных эпикентральных расстояниях при взрыве заряда  $C=1000$  кг на глубине 15 м:  
а—в лессе; б—в глине.

Характерной особенностью этого движения является перекачка энергии от предыдущей фазы к последующей. Фазы возникают постепенно. Например, фаза  $R_2$  появляется на осциллограммах при взрывах 1000 кг на расстоянии порядка 100 м, фаза  $R_3$ —на 300 м и т. д.

Амплитуда фазы  $R_2$  сначала мала, затем она увеличивается, достигает максимума и, снова уменьшаясь по величине, исчезает на записи на расстоянии 350 м. То же повторяется, но на других расстояниях с фазой  $R_3$ , только величина максимальной амплитуды ее меньше, чем в  $R_2$ . Групповая скорость волн (290—300 м/сек.) меньше, чем фазовая (360—370 м/сек.). По ряду признаков эти фазы отождествлены с поверхностью волной Релея.

Отметим, что при взрыве 10 000 кг на площадке № 3 число фаз на записях достигло до 16, причем отчетливо проявилась дисперсия (уменьшение периодов и скоростей распространения) волн.

Начальные участки записи, полученные на разных площадках, отличаются. В лёссе на всех расстояниях совершенно отсутствуют высокочастотные колебания, в то время как в глине они хорошо прослеживаются. Еще отчетливее проявилось это различие на записях скоростей смещений. Следовательно, составы спектров колебаний в различных грунтах различны. В лёссе короткие волны взрывом не возбуждаются, вступления объемных волн плавные; в глине вступления резкие. Начиная с расстояний порядка 50—70 м в начальной части записей на обеих площадках хорошо заметны на горизонтальной составляющей низкочастотные колебания, фазы которых обозначены буквами  $N_0$ ,  $N_1$  и  $N_2$ . Наибольшие перемещения связаны с фазой  $N_1$ , соответствующей движению грунта по направлению на взрыв. Природу этих фаз полностью выяснить не удалось.

По мере приближения к эпицентру различия между величиною амплитуд колебаний в объемных и поверхностных волнах постепенно утрачиваются. Наконец, на расстояниях меньше 50 м характер записей резко меняется. Колебания становятся простыми — одно, два колебания синусоидальной формы с периодом 0,4—0,6 сек. Амплитуды этих колебаний доходят до 200—300 мм в глине и 50—60 мм в лёссе.

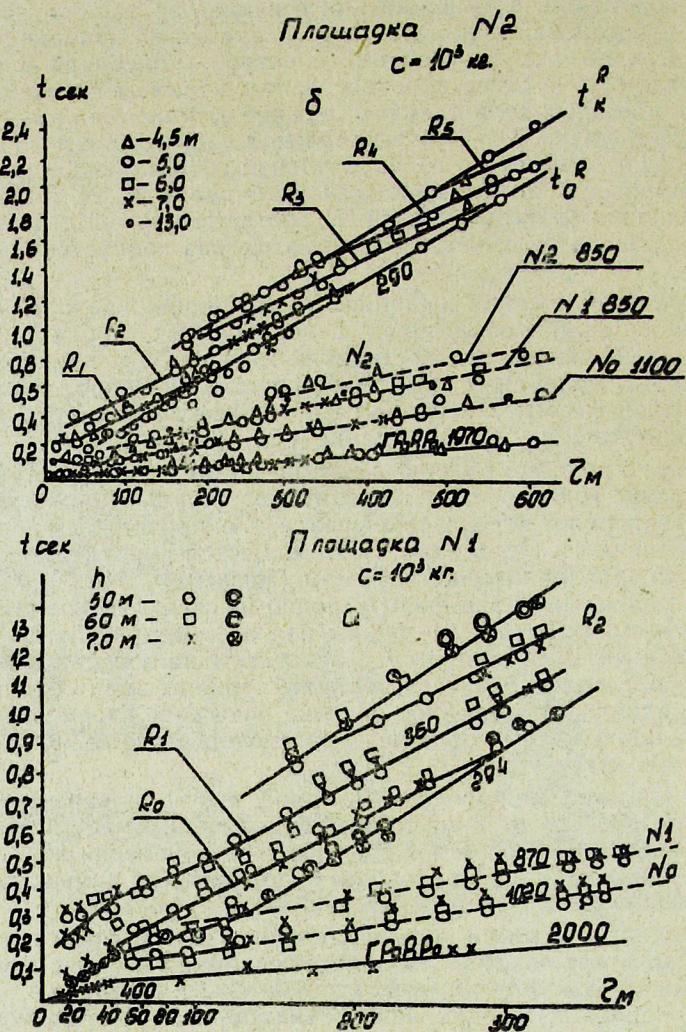
К выводу о подобии волновых картин на обеих площадках приводит и сопоставление годографов, показанных на фиг. 2. Нижние ветви годографов соответствуют вступлению фронта, т. е. продольным волнам (прямым или головным). Остальные ветви являются корреляционными. Они построены по однотипным экстремумам (фазам)  $N_0$ ,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  на записях. В дальнейшем эти фазы условно называются волнами хотя на малых расстояниях различные волны не успевают разойтись, и перемещения грунта поэтому являются результатом наложения волн. Можно заметить, что фазовые скорости, а также периоды волн одинаковы на обеих площадках. Единственное отличие, вносимое слоем лёсса, заключается в наличии вблизи от эпицентра (до расстояния 30 м) волны со скоростью 400 м/сек.

Таким образом, можно сделать вывод, что волновая картина, в основном, определялась мощной толщей синих глин. Вместе с тем наличие слоя лёсса сказалось на составе спектра — исчезновении короткопериодных колебаний, а также привело (как будет видно из дальнейшего) к общему снижению амплитуд перемещений во всех волнах.

Это, однако, относится только к слуху, когда взрыв произведен в лёссе. Каково будет влияние лёсовой прослойки такой же мощности на спектр и амплитуды упругих волн, возбужденных взрывом в более плотных (менее пористых) средах, неясно. Бессспорно, существенное увеличение толщины слоя лёсса приведет к тому, что волновая картина на не очень больших расстояниях будет определяться лёсом, а не подстилающими породами, так как головные волны или не будут приходить в эти точки наблюдений вообще, или же будут подходить со значительным опозданием. Возможно, что слой лёсса вызовет и интерференционные поверхностные волны, если только сильное затухание, присущее лёссе, не поглотит их.

Из изложенного вытекает необходимость в заблаговременном определении строения грунта и, в частности, толщи лёсса на выбранной для опытов площадке. Иначе не будет уверенности в том, что при взрывах, произведенных на различных расстояниях от здания, будут приходить

одинаковые типы волн. Можно предполагать, что для этих целей предпочтительнее бурение скважин, чем проведение сейсмической разведки на такой же глубине. Последняя, вероятно, осложнится отмеченной выше плохой проходимостью продольных волн, а ее точность снизится плавными вступлениями в лёссе.



Фиг. 2. Сводные годографы колебаний грунта при взрывах зарядов весом 1000 кг: а—площадка № 1 — лёссе; б—площадка № 2—глина; h—глубина заложения зарядов в м.

Обратимся теперь к объяснению длиннопериодного движения вблизи эпицентра. Ранее, при изучении взрывов в водонасыщенных песках, нами было подмечено, что выбросу грунта предшествует по времени куполообразное поднятие его в эпицентральной области, причем видимый диаметр купола во много раз превышает диаметр образованвшейся воронки. Подобное явление было установлено и при взрывах в лёссе и в глине.

На фиг. 3 показаны отдельные кадры, заснятые при взрыве заряда 1000 кг на глубине 15 м. Первый кадр (фиг. 3 а) соответствует начальной стадии развития купола, второй (фиг. 3 б)—средней стадии, при которой уже наметился диаметр будущего выброса. Для получения коли-

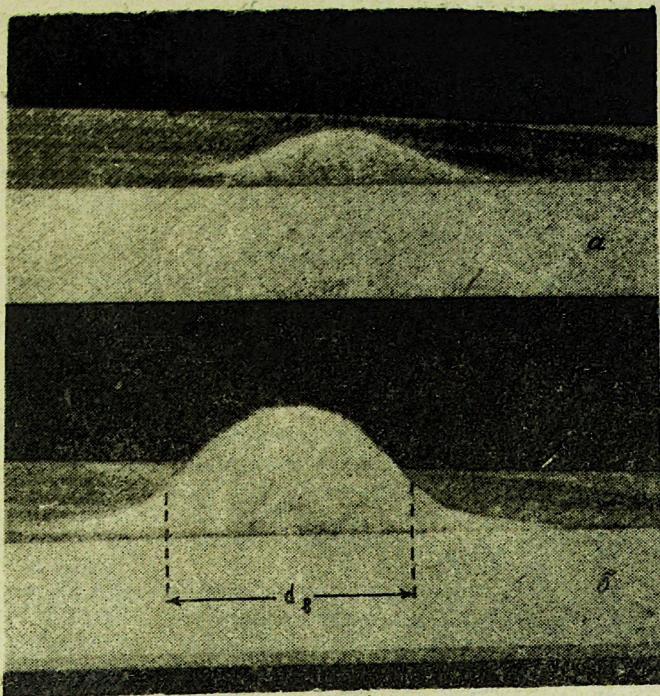
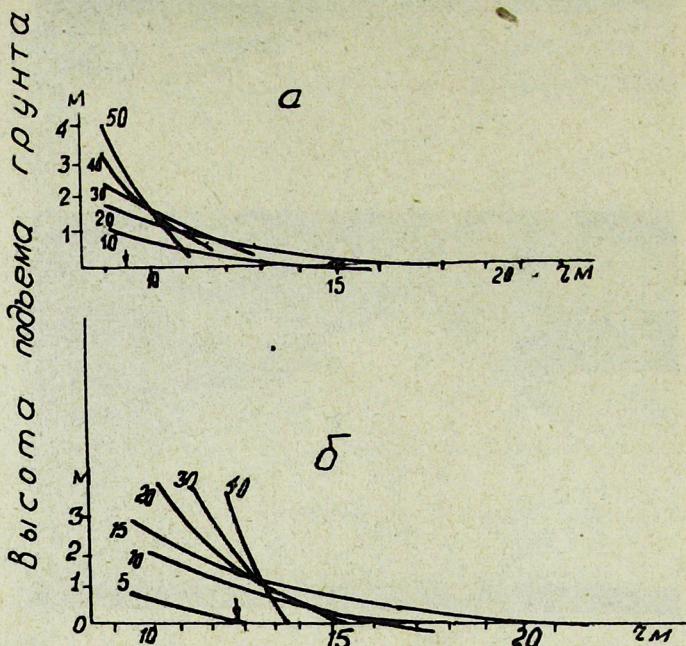


Рис. 3. Куполообразное поднятие грунта, порожденное вблизи эпицентра взрыва расширением газообразных продуктов: а—начальная стадия; б—средняя стадия;  $d_2$  —диаметр воронки выброса.

чественных данных и сопоставления их с показаниями сейсмических приборов, установленных вблизи эпицентра, был произведен обмер кинопленок в периферийной части купола. Результаты этого обмера в различные времена (через 5—10 кадров, т. е. через 0,1—0,2 сек.) показаны на фиг. 4 в виде кривых, соответствующих вертикальным перемещениям грунта на различных расстояниях. На фиг. 4 указаны также край воронки и место установки ближайшего сейсмоприемника ВБП.

Рассмотрение фигуры приводит к следующим выводам. Движение по вертикали в периферийной части купола является знакопеременным. Сначала (до 15—20 кадров, т. е. 0,3—0,4 сек.) грунт поднимается повсюду, затем поднятие его продолжается только в центре купола, окраинные же части его опускаются вниз. Об этом свидетельствуют пересечения кривых. Вблизи края воронки амплитуда подъема и опускания грунта достигает 1,5—2,0 м. На пленках подъем грунта с постепенно уменьшающейся амплитудой прослеживается до расстояний порядка 20 м, т. е. в два раза превышает радиус воронки выброса. Естественно предположить, что такое движение грунта происходит и на более удаленных рас-

стояниях, однако вследствие малости амплитуд уловить его на пленках нельзя. Из отсутствия надежных реперов уверенно проследить и замерить горизонтальные движения грунта не удалось, однако, оно бесспорно существует и также является знакопеременным. Развитие и исчезновение купола является сравнительно длительным процессом. Наибольший диаметр купола достигал через 0,4—0,5 сек, причем опускание происходило медленнее, чем подъем.



Фиг. 4. Движение грунта вблизи края воронки выброса в различные моменты времени по данным киносъемки (I кадр — 0,0208 сек.): 1—край видимой воронки; 2—место установки ближайшего прибора ВБП; а—взрыв заряда весом 1000 кг на глубине 15 м; б—взрыв 1000 кг на глубине 7 м.

Сопоставление данных, полученных при киносъемке с перемещениями грунта, записанными сейсмическими приборами вблизи эпицентра, дает удовлетворительную корреляцию как по времени, так и по величинам перемещений и объясняет происхождение фазы  $R_1$  на составляющей  $Z$  и фаз  $R_1^x$  и  $N_0$  по  $X$ , как особого поверхностного движения грунта, порожденного расширением газообразных продуктов взрыва. Этим же объясняется и отсутствие короткопериодных колебаний на малых расстояниях. Возможно они и существуют, но с относительно меньшими амплитудами и при загрублении приборов выпадают из наблюдений.

Кроме того, из этого анализа вытекает, что взрыв вблизи поверхности земли следует рассматривать как сложный источник, имеющий две стадии развития различной длительности. Первая стадия (центрально симметричная) короткой длительности излучает продольную волну сжатия и вторая (осесимметричная) сопровождается более длительным поверхностным возмущением. Не исключено, что при планируемых испытаниях здания при близких мощных взрывах будут вовлекаться в движение

ние возмущением такого типа. Поэтому следует запланировать при работах производство киносъемки с расстановкой в эпицентральной области специальных реперов.

В результате обработки осциллограмм были получены значения периодов и амплитуд для перемещений и скоростей перемещений грунта в разных волнах на различных расстояниях от эпицентра. На фиг. 5 и 6 для иллюстрации нанесены в двойном логарифмическом масштабе величины амплитуд вертикальных перемещений грунта для волн  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , и т. д. и горизонтальных перемещений в волне  $N_1$ , полученные в лёссе и глинах при взрывах 1000 кг на глубинах 4,5—7 м.

Из фигур видно, что законы затухания колебаний с расстоянием (наклоны прямых) различны для разных волн. Быстрее всего затухает длиннопериодное движение (фаза  $R_1$ ) — куполообразное поднятие грунта вблизи эпицентра. Отметим, что также быстро убывает на малых расстояниях и продольная короткопериодная волна. Всего слабее затухают максимальные перемещения в группе колебаний, соответствующих поверхности волне (фазы  $R_2$ ,  $R_3$  и т. д.). Вместе с тем законы затухания однотипных волн на разных площадках в пределах точности наблюдений оказались одинаковыми. Однако абсолютные величины амплитуд колебаний грунта в разных волнах в лёссе в 2—3 раза меньше, чем в глине.

Тождественность волновых картин в лёссе и в глине в данных геологических условиях позволяет подойти к прогнозу вероятных параметров грунта в планируемых работах, опираясь на более многочисленные наблюдения в глине, где была выяснена зависимость колебаний грунта и от веса зарядов. Эти зависимости в виде приближенных эмпирических формул сведены в табл. 2.

Зависимости изменения перемещений и скоростей перемещений грунта от приведенной глубины заложения зарядов не определены из-за малой вариации глубин. Заметим только, что в глине при взрыве 1000 кг на глубине 15 м амплитуды перемещений возросли в 1,5—2 раза по сравнению с более мелкими взрывами. Однако неясно, явилось ли это следствием лучшей упаковки заряда, или же причиной увеличения амплитуд послужило изменение каких-либо физико-механических свойств грунта на больших глубинах.

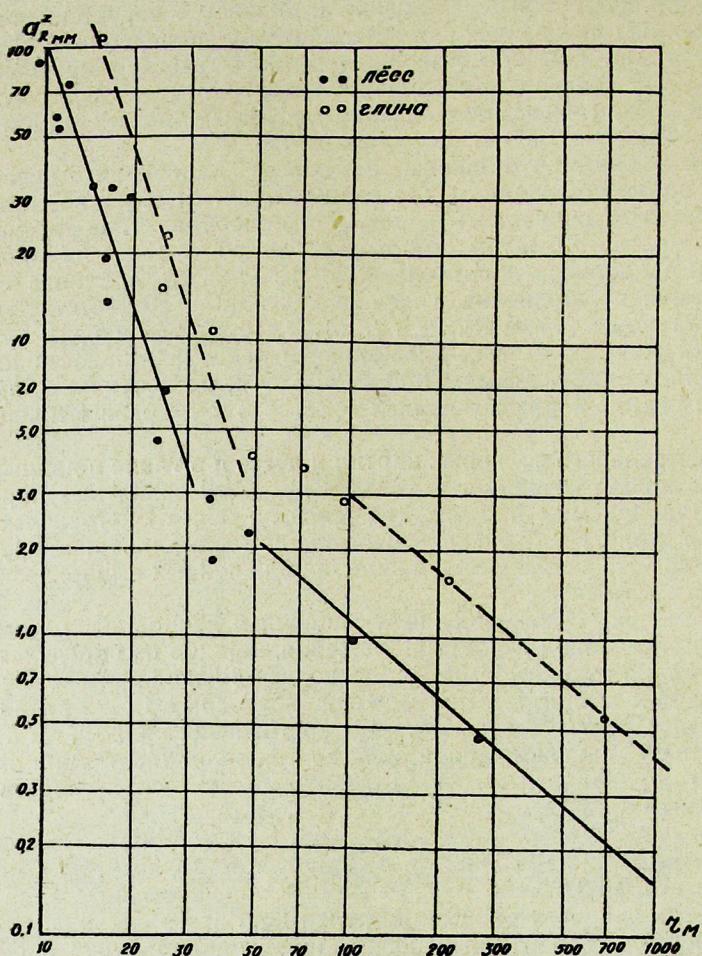
Для расчета необходимых весов зарядов и расстояний воспользуемся результатами исследований М. А. Садовского [6], который выявил, что начальные незначительные повреждения зданий обычного типа наблюдаются, когда скорости смещений грунта достигают значений 15 см/сек. Будем считать, что серьезные повреждения зданий будут происходить при троекратном увеличении скорости, т. е. при ее значении 45 см/сек.

Одновременно с расчетом расстояний будем оценивать и вероятные амплитуды перемещений грунта на этих же расстояниях, чтобы заранее знать, какими приборами придется пользоваться для замера колебаний.

Расчет проведем для сосредоточенных зарядов с весами 1, 10 и 30 т, на глубинах  $h \leq 7$ . Расчет сделаем для горизонтальной составляющей движения грунта, представляющей наибольшую опасность для зданий. Результаты расчета сведены в табл. 3.

Расчет показывает, что нелегко вызвать повреждения зданий, особенно серьезные, на выбранной площадке (лёссе). Дело в том, что волна  $N_1$  и цуг поверхностных волн отчетливо формируется в грунте на сравнительно больших расстояниях (60—100 м для  $N_1$  и 150—200 м для  $R_2$ ,  $R_3$  и т. д.). Поэтому расстояния, отмеченные в табл. 3 звездочкой (\*), являются, по сути дела, фиктивными. На этих расстояниях указанных волн не будет. Повреждения на малых расстояниях будут вызывать-

ся, в основном, продольной волной и распространением куполообразного поднятия грунта в эпицентре, а это движение резко отличается по форме и продолжительности от колебаний грунта при землетрясениях.



Фиг. 5. Зависимость вертикальных перемещений грунта в фазе  $R_1$  (купол) и максимальных перемещений в фазах  $R_2, R_3, R_4$  и т. д. (поверхностная волна) от эпикентральных расстояний в разных грунтах.

Следует также иметь в виду, что расчет выполнен для сосредоточенных зарядов. Можно предполагать, что рассредоточение их в линии вызовет уменьшение величин колебаний грунта вообще и в том числе и в куполообразном поднятии. Следовательно, и в этой группе следует ожидать уменьшения скоростей, и такого типа взрывы придется еще более приближать к зданиям. Правда, взрывы предполагается делать камуфлированными. Поэтому можно ожидать некоторого увеличения перемещений и скоростей. Предположим, что увеличение параметров колебаний грунта за счет камуфляжности скомпенсирует снижение за счет рассре-

Таблица 2

Параметр колебаний грунта	Эмпирическая формула	Примечание
Скорость перемещений в продольной волне, составляющая Z	$u^z_p = \frac{600}{K_1} \left( \frac{c}{r} \frac{1}{3} \right)^2 \text{ см/сек.}$	Для глин $K_1=1$ , для лёсса $K_1=3$
То же, составляющая X	$u^z_{N_0} = \frac{900}{K_1} \left( \frac{c}{r} \frac{1}{3} \right)^{2,3} \text{ см/сек.}$	То же
Перемещение в продольной волне, составляющая Z	$a_p^z = \frac{500}{K_1} \left( \frac{c}{r} \frac{1}{3} \right)^3 \text{ мм}$	" "
То же, составляющая X	$a_x^z_{N_0} = \frac{300}{K_1} \frac{c^{0,825}}{r^{2,3}} \text{ мм}$	" "
Перемещение в фазе $R_1$ (купол), составляющая Z	$a^z_{R_1} = \frac{3 \cdot 10^5}{K_1} \frac{1}{r^3} \text{ мм}$	Формула получена для заряда с=1000 кг
Скорость перемещений в фазе $N_1$ , составляющая X	$u^x_{N_1} = \frac{700}{K_2} \left( \frac{c}{r} \frac{1}{3} \right)^{1,7} \text{ см/сек.}$	По данным площадки 3. Для глин $K_2=1 \div 2$ , для лёсса $K_2=2 \div 3$
Перемещение в фазе $N_1$ , составляющая X	$a_x^z_{N_1} = \frac{100}{K_2} \frac{c^{0,675}}{r^{1,7}} \text{ мм}$	Волна $N_1$ , отчетливо проявляется при $r > 60 \div 100 \text{ м}$
Скорость перемещения в поверхностной волне (фазы $R_2$ , $R_3$ и т. д.), составляющие Z и X	$u_{R_2} = 100 \frac{c}{r} \frac{1}{3} \text{ см/сек.}$	Поверхностная волна формируется при $r > 100 \text{ м}$ . Для глин $K_a=1$ , для лёсса $K_a=2 \div 3$
Перемещения в поверхностной волне, составляющие Z и X	$a_{R_2} = \frac{10}{K_3} \frac{c}{r} \frac{1}{2} \text{ мм}$	

Таблица 3

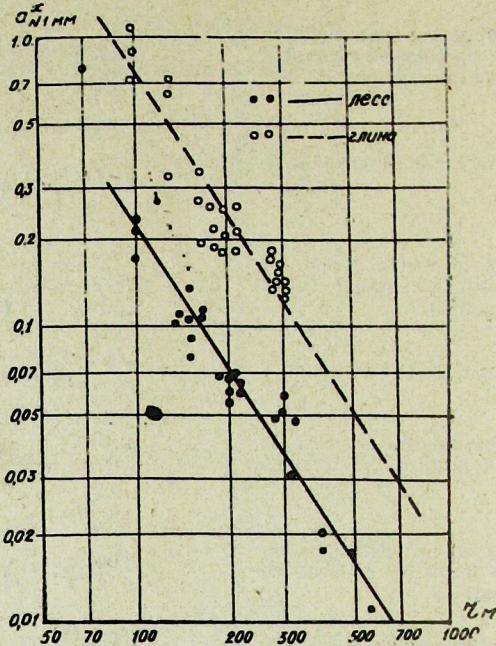
Характер повреждений зданий	Величина скоростей перемещений грунта $u_x$ , см/сек.	Вес заряда, т	Расстояние для волн, м			Амплитуда перемещения грунта на этих расстояниях, мм		
			$N_0$	$N_1$	$R$ макс.	$N_0$	$N_1$	$R$ макс.
Легкий	15	1	36	63*	66*	8	—	—
		10	80	138	140	8,3	5,7	3,5
		30	115	214	200	8,3	5,5	4,3
Серьезный	45	1	23	33*	22*	21,1	—	—
		10	50	72*	48*	21,3	—	—
		30	71	110	70*	21,6	16,7	—

доточения. Тогда указанные в таблице значения расстояний можно рассматривать как предельные.

Нужно также отчетливо представлять себе, что волновая картина в описываемых опытах определялась в главных чертах мощной толщей синих глин. Геологическое строение запланированной площадки пока не известно. Поэтому на ней может быть иное соотношение между параметрами различных волн. Это еще раз подчеркивает необходимость сейсмического изучения площадки.

При производстве испытаний для создания плоской волны и вовлечения в движение большой толщи грунта намечены линейно-рассредоточенные и двухъярусные взрывы. Замысел этот представляется реальным, но все же, поскольку таких попыток раньше не делалось, следует проверить такую возможность опытным путем, хотя бы и со сравнительно малыми зарядами. При этих опытах приборы, естественно, должны устанавливаться по профилю на разных отметках в специально подготовленных шурфах.

Чтобы приблизиться к волновой картине и продолжительности процесса колебаний, свойственным землетрясениям, нужно взрывы производить дальше от зданий. При этом автоматически будет отпадать необходимость в рассредоточении зарядов для осуществления плоской волны. Рассредоточение будет полностью определяться возможностью получения камуфлажа. Однако удаление от зданий повлечет за собой увеличение веса зарядов для получения серьезных повреждений.



Фиг. 6. Зависимость горизонтальных перемещений грунта в фазе  $N_1$  от эпикентральных расстояний в разных грунтах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Шагинян. Методика исследования сейсмостойкости сооружений с помощью сейсмовзрывных волн. Тезисы докладов Душанбинской сессии Совета по сейсмологии, Душанбе, 1962.
2. Я. М. Айзенберг. Некоторые соображения о натурных исследованиях зданий с использованием мощных возбудителей колебаний. Тезисы докладов Душанбинской сессии Совета по сейсмологии, Душанбе, 1962.
3. Б. Г. Рулев, Д. А. Харин. Сейсмографы для регистрации больших перемещений. Тр. Ин-та физики Земли, № 16 (183), М., 1961.

4. Д. П. Кирнос, Б. Г. Рулев, Д. А. Харин. Сейсмограф ВЭГИК для работы по инженерной сейсмологии и регистрации близких землетрясений, Тр. Ин-та физики Земли, № 16 (183), М., 1961.
5. Н. В. Кузьмина, А. Н. Ромашев, Б. Г. Рулев, Д. А. Харин и Е. И. Шемякин. Сейсмический эффект взрывов на выброс в несальных связных грунтах. Тр. Ин-та физики Земли, № 21 (188), М., 1962.
6. М. А. Садовский. Простейшие приемы определения сейсмической опасности массовых взрывов. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1946.

Институт физики Земли АН СССР.