

**ИЗВЕСТИЯ
АКАДЕМИИ НАУК СССР**

ФИЗИКА ЗЕМЛИ

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

5

МОСКВА · 1984

УДК 550.423

Н. А. ВИЛЬЧИНСКАЯ, В.Н. НИКОЛАЕВСКИЙ

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ И СПЕКТР СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Введение. В работе исследуются спектры колебаний, возникающих при различных механических воздействиях на песок – при ударе по свободной поверхности, при контактном взрыве, при ультразвуковом зондировании, под действием вибратора. Во всех случаях в спектрах присутствуют помимо частот источника возмущений также частоты, характерные для акустической эмиссии (АЭ) среды. Максимумы излучения АЭ соответствуют резонансным частотам, оптимальным для процессов вибрационного изменения упаковки песка. По мере распространения волны в массиве ее спектр трансформируется в спектр доминантных частот массива, соответствующих низкочастотной части АЭ. Отмечена возможность избирательного усиления за счет совпадения резонансов АЭ с собственными частотами стратификации грунта.

1. Из практики сейсморазведочных работ хорошо известно, что преобладающие частоты сейсмических волн зависят от пород массива, вмещающего очаг взрыва.

Собственная частота f_0 полости обычных взрывов

$$F_0 = \omega_0 / 2\pi, \quad \omega_0 = 2c_s / R_0 \quad (1)$$

(где ω_0 – собственная круговая частота, c_s – скорость поперечной волны, R_0 – радиус полости взрыва) намного больше наблюдаемых частот. Так, при взрыве в песке $R_0 = R_0 * W^{1/3}$, значение коэффициента $R_0 * \sim 0,3$ м/кг^{1/3} для песка плотности $\lambda = 1,8$ г/см³ [1]. Это дает величину $\omega_0 \sim 1$ кГц при $c_s = 150$ м/с взрыва заряда $W = 1$ кг ВВ. В связи с этим было предложено [2,3] считать ближнюю зону взрыва фильтром с собственной частотой, соответствующей радиусу R_p зоны разрушения. Для песчано-глинистых пород этот радиус оценивается по формуле $R_p = R_p * W^{1/3}$, $R_p \sim 10R_0 \sim 3$ м/кг^{1/3}, что приводит к нужным порядкам соответствующих частот f_0 взрыве заряда $W = 1$ кг ВВ. Вместе с тем оценки по R_p для взрыва малого заряда $W = 20$ г дают весьма высокие частоты $f \sim 400$ Гц. Другой способ оценки частот сейсмических сигналов состоит в использовании максимумов скорости смещения V_m и самого смещения u_m , т.е.

$$\Omega \sim V_m / U_m \quad (2)$$

Этот прием в случае мощных взрывов [4] дает результаты, совпадающие с оценкой по формуле (1). Например, для взрыва Салмон (3,5 кг ВВ в каменной соли) формула (2) дает $f \sim 1$ Гц для сигналов на расстоянии в 10 км, а формула (1) для $R_p = 200$ м, $c_s = 2400$ м/с приводит к значению $f \sim 2$ Гц. Если же обратиться к экспериментальным измерениям V_m и u_m для малых взрывов в

песках [5], то в отличие от формулы (1) оценка (2) дает наблюдаемую частоту $\omega \sim 150$ рад/с или $f \sim 25$ Гц.

Таким образом, расчеты преобладающей частоты при взрывах в песках по простым оценочным формулам, даже при введении измеряемых поправочных коэффициентов, не позволяют получить результат, справедливый во всем диапазоне веса заряда. Отсюда возникает необходимость изучения природы появления преобладающих частот, особенно потому, что малые взрывы в песках широко используется [4,5] для моделирования механического действия мощных взрывов в горных массивах.

С другой стороны, при разрушении материалов под нагрузкой происходит излучение характерных волн – акустической эмиссии (см., например [6]). Излучаемый при этом сигнал имеет частотный спектр, определяемый масштабом и скоростью изменения внутренней структуры материала. При любом механическом воздействии, приводящем к внутреннему разрушению массива, в том числе и при взрыве, происходит генерация волн акустической эмиссии. Поэтому вполне вероятно, что спектр излучаемого сигнала формируется не только за счет собственных частот излучателя, включая периодичность действия очага на окружающую среду, но также благодаря акустической эмиссии из неупругой ближней зоны взрыва. В этой зоне происходит массовое разрушение материала с излучением упругих сигналов как из-за возникновения разгружающих трещин (эти сигналы, излучаемые с фронта волны разрушения, хорошо видны при скоростной съемке действия взрыва в оптически прозрачных материалах [7,8]), так и при относительных подвижках фрагментов разрушенного материала.

2. Чтобы проверить эту гипотезу, обратимся к экспериментам с таким идеальным кулоновым материалом, каким является морской песок. Воздействие моря приводит к природной сортировке песчинок по гранулометрическому составу, что должно приводить к более дискретному спектру (АЭ).

АЭ плотных важных песков (усредненный размер зерен 0,3 мм) исследовалась в условиях естественного залегания. В ненарушенном массиве песка были вырыты два шурфа с расстоянием между ними 50 см. Датчики в металлическом корпусе диаметром 62 мм использовались для передачи сдвигающего усилия. Массив между шурфами сжимался соосно все увеличивающейся нагрузкой до полного разрушения. Чувствительный элемент датчиков – сегнетова соль. Резонансная частота 25 кГц. Для анализа сигналов АЭ использовался анализатор спектра FSP-80, частотный диапазон 1,5 Гц – 20 кГц. Изображение с анализатора снималось кинокамерой РФК-5. При небольшом уплотнении грунта (без видимых разрушений) регистрируются сигналы АЭ с частотой от 2 до 20 Гц. Увеличение сдвигающего напряжения (допредельная неупругость) приводит к увеличению амплитуд всех частотных составляющих в спектре сигнала в 25 Гц. Затем происходит рост частотного диапазона до 80 Гц (рис. 1.а). С началом заметных предельных деформаций в спектре АЭ уже присутствуют частоты от 2 до 20 кГц с двумя максимумами – на частотах 2-16 Гц (главный) и на 630 Гц (рис. 1,б). Когда начиналось течение грунта, первый максимум проходил на 2-10 Гц, а второй – на 1 кГц, хотя в спектре сигнала присутствуют все частоты (рис 1, в). При полном разрушении в спектре остаются частоты 2-50 Гц (рис 1, г), а высшие исчезают. Длительность описанного процесса нагружения грунта до его полного разрушения занимала 60с.

Сопоставление этих данных с АЭ гранита¹, имевшего зернистость того же порядка и представленного в основном кварцем, действительно приводит к мысли, что низкие частоты, всегда присутствующие в песке (в граните – при развале образца на части), обусловлены значительными относительными смещениями частиц в условиях их обжатия (уплотнение рыхлых песков), т.е. под действием сил сухого трения. В то же время высокие частоты АЭ сопутствуют начальным этапам трещинообразования в граните и микроразрушениям структуры песка на этапах подхода к пику прочности.

Опыт, проведенный в лаборатории, состоял в записи сигналов АЭ при квазистатическом внедрении заостренного стержня в песок, засыпанный в бассейн (40*25*25 см). Диаметр иглы 4 мм, глубина пенетрации 50 мм. Датчики АЭ, прикрепленные к стенкам из оргстекла, показали, что частоты, излучаемые в начальный момент, зависят от величины зерен (чем меньше размер зерна, тем выше частота). Продолжительность существования низкочастотных колебаний зависит и от диаметра зерен d . Если $5 \text{ мм} < d < 7 \text{ мм}$, то низкочастотные составляющие в спектре АЭ присутствуют (при данной схеме наблюдений) все время, пока продолжается пенетрация, почти с постоянной амплитудой. В то же время при $0,1 \text{ мм} < d < 0,2 \text{ мм}$ низкочастотные колебания появляются перед самым концом излучения. Продолжительность существования низкочастотных колебаний зависит от расстояния между иглой и датчиком – с ростом расстояния увеличивается длительность колебаний, а также число низких частот в спектре АЭ. Хотя последний эффект объясним плохой проводимостью сухих песков для высоких частот и дисперсией скорости, возможна и иная трактовка: сигналы низких частот генерируются в среде по мере распространения цуга к приемному датчику, где фиксируются сигналы АЭ. Если в бассейн с песком погружать иглу, в острие которой вмонтирован чувствительный элемент, принимающий сигналы АЭ непосредственно на месте разрушения, то в спектре этих сигналов стабилен именно высокочастотный максимум (рис.2): его положение, как видно из табл. 1, зависит от зернистости песка, причем при заданной зернистости на него влияет влажность – в сухих песках максимум на более высоких частотах, чем в полностью водонасыщенных

Таблица 1

Положение высокочастотного максимума сигналов АЭ при погружении датчика в полностью водонасыщенный и в сухой песок

Диаметр зерен, мм	Сухой песок	Водонасыщенный песок
$3 < d < 5$	800-630 Гц	400-500 Гц
$1 < d < 2$	1-1,25 кГц	630-800 Гц
$d < 0,25$	1,6-2 кГц	1-1,6 кГц

¹ На стадии, предшествующей разрушению образцов гранита [6], характерны частоты 1-12 кГц. А в момент появления трещин – от 100 до 800 Гц (с максимумом в 400 Гц). В конце разрушения образцов спектр сигнала сосредоточен в диапазоне от 2 до 50 Гц с максимумом на 12,5 Гц.

Пропускание импульсов ультразвуковых частот (25, 60, 150 кГц) [9] через тот же песок в естественном залегании подтверждает гипотезу, сформулированную выше. Ультразвуковой импульс по мере своего продвижения генерирует двухфронтальную волновую структуру, (см. [10]). Фронт первой волны в песке с малой (по весу $W = 14\%$) влажностью движется со скоростью $c_1 = 460$ м/с, фронт второй волны имеет скорость $c_2 = 150-220$ м/с. Она представлена низкочастотным спектром, практически совпадающим со спектром АЭ на этапе допредельной неупругости (рис. 1,а). В полностью сухом ненагруженном песке распространяется практически только вторая волна (переупаковки), а в полностью водонасыщенном, также ненагруженном, - только первая волна, причем ее скорость возрастает [10] до 1700 м/с – до скорости сейсмических волн в водонасыщенных грунтах. Существенно, что спектр волны переупаковки включает в себя и высокочастотные компоненты (около 1 кГц).

Таблица 2

Положение высокочастотных максимумов сигналов АЭ при трении шероховатых поверхностей

Диаметр зерен, мм	Без давления	Под давлением 10^5 Па
$3 < d < 5$	160-200 Гц	400-630 Гц to 1,25 кГц*
$2 < d < 3$	200-315 Гц	800 Гц-1,25 кГц
$d < 0,25$	400-630 Гц	1,6-2,5 кГц

Чтобы выяснить происхождение этих частот, был проведен опыт по трению шероховатых пластин о песок. Результаты приведены в табл.2. Видно, что с ростом давления на пластину генерируемые при трении частоты возрастают от 10^2 до 10^3 Гц. Таким образом, по-видимому, собственно сухое трение на контактах также ответственно за сопутствующие высокие частоты при АЭ. Побочно выяснилось, что низкие частоты (~ 10 Гц) не могут появиться из-за трения поверхности приемника о песок. В опытах [9] подавался зондирующий ультразвуковой импульс частоты 50 или 200 Гц. В обоих режимах спектр волны переупаковки оставался неизменным. Если в массиве песка (такой влажности, что при ультразвуковом прозвучании видны обе волны – высокочастотная и низкочастотная) прорыть яму ($0,5 \times 0,5 \text{ м} \times 0,3$), то когда яма пуста, через нее не распространятся высокочастотные колебания, а низкочастотная волна (длина волны ~ 2 м) огибает яму. Если яму залить водой, то высокочастотные составляющие становятся очень четкими, с большой амплитудой, низкочастотные – исчезают совсем. Когда вода из ямы уходит, опять исчезают высокочастотные составляющие и значительно лучше становится низкочастотный сигнал. Опыт с ямой подтверждает, что в двухфазной среде волна первого рода может распространяться по жидкой фазе, волна второго рода – только по твердой фазе и при полном водонасыщении песков ухудшаются условия распространения волны второго рода (переупаковки).

* Large **panicles** are partially fragmented during displacement under a load.

Появится ли спектр, характерный для АЭ, при ударах? Для выяснения этого вопроса были проведены измерения спектров волн при тарированном ударе по слою (2 м и 15 м) того же песка. Гиря массой 24 кг падала с разной высоты. На осциллографе Н115 с датчиков СВ-12 и СГ-10 записывались колебания в разных точках поля. Спектр колебаний снимался кинокамерой с экрана анализатора спектра.

Все волновое поле можно разделить на ближнее и дальнее. В ближнем поле скорость первых вступлений меняется от 2500 до 500 м/с в зависимости от силы удара. В слое мощностью 2 м продолжительность колебаний при высоте падения гири в ближнем поле – 0,15-0,16 с. В дальнем поле волна становится двухфронтальной. Впереди идет предвестник со скоростью 1000-1500 м/с, основной низкочастотный сигнал вступает со скоростью 300-100 м/с. Длительность волны в дальнем поле 0,24-0,26 с. Фазовую скорость максимальных смещений в низкочастотном цуге, которая зависит от силы удара, можно отождествлять с третьей волной, которую иногда именовали также [11] пластической волной. Увеличение высоты падения гири увеличивает радиус границы между ближним и дальним полями, а также длительность цуга низкочастотных колебаний. Но мало влияет на спектр колебаний цуга.

Аналогичную картину наблюдал Николаев [12] в супеях: металлическая подставка увеличивала передачу энергии удара сейсмическим волнам, в результате этого возросла длительность существования колебаний в дальнем поле, частота при этом в дальнем поле осталась такой же, как при обычном ударе (гиря 5 кг с высоты 1 м) – около 80 Гц.

В непосредственной близости от места удара по поверхности песка (на расстоянии 0,8 м при высоте падения гири $H=2$ м) спектр имеет вид (рис. 3, а), характерный для АЭ на пределе прочности. На расстоянии $L=1,5$ м, $H=1,5$ м высокочастотного максимума в спектре волны уже нет (рис. 3, б). В начальный момент вступления волны во всех точках поля наибольшую амплитуду имеет частота 40 Гц, второй по величине оказывается частота 50 Гц при $L=1,5$ м и 31,5 Гц на расстоянии 6,5 м. В радиусе до 10 м от точки удара дольше всего существует частота 50 Гц. В дальних точках, начиная с 13 м (рис. 3, в), дольше всего существуют колебания 25 Гц. При сильном ударе (гиря падает с высоты 2,5 м) в спектре колебаний на расстоянии 13 м появляется частотная составляющая 12,5 Гц. При слабом ударе (высота падения гири меньше 1,5 м) наши датчики не регистрировали колебаний на 13-метровой отметке, и частота 12,5 Гц не наблюдалась.

Были проведены эксперименты на толстом слое песка (толщина 15 м). При этом медленная волна сохранила свои частоты, однако время существования цуга низких частот стало в 2-3 раза меньше. Для анализа медленных волн в одну точку помещались датчики как вертикальных (СВ-10), так и горизонтальных (СГ-12) колебаний. Были зафиксированы одинаковые скорости распространения, частоты колебаний для обеих компонент смещений также совпадали.

Является ли наблюдаемая волна поверхностной или объемной – этот вопрос требует дальнейшего изучения, поскольку волны переупаковки также могут быть поверхностными. Для насыщенной пористой среды такая ситуация теоретически оценивалась в работе [13].

На полигоне (слой песка 2 м) было проведено четыре взрыва заряда по 20 г ВВ. Волновое поле в этом эксперименте фиксировалось датчиками, расположенными по радиусу от точки взрыва с интервалом в 4 м. Цуг низкочастотных колебаний существует дольше, чем при ударе, но самое главное – спектральная картина остается неизменной. До расстояний в 17 м максимальной амплитудой обладают частотные составляющие в 50 Гц (рис. 4, а), а на расстоянии в 25 м основную энергию несет частота в 25 Гц (рис. 4, б).

Эта частота соответствует оценке по массовой скорости и величине смещений по взрывной волне и АЭ при допредельной неупругости песка на поверхности в условиях естественного залегания. Кроме того, на этих расстояниях имеется и цуг высокочастотных колебаний, которые соответствуют собственной частоте взрывного излучателя и АЭ на пределе прочности. Амплитуды волн низких частот стабилизируются. (Сравнивать амплитуды и энергии двух цугов между собой по этим записям нельзя из-за нелинейности частотных характеристик датчиков.) Для иллюстрации сказанного на рис. 5 приведены записи колебаний в слое 2 м от удара (рис. 5,а), взрыва (рис. 5,б), а также от удара в слое 15 м (рис. 5,в) на шлейфовом осциллографе от датчиков СВ и СГ, расположенных в ближнем и дальнем полях.

Поле поверхности волн от вибратора (громкоговорителя ЗД-15 в диапазоне частот от 60 до 400 Гц, запускавшегося звуковым генератором ГЗ-33) излучалось на том же полигоне (слой песка 2 м). Один датчик колебаний СВ-10 (опорный) находился постоянно на расстоянии 10 см от динамика, другой (подвижной) перемещался по радиусу до 10 см. Сигналы с обоих датчиков выводились на двухлучевой осциллограф СВ-11; на поверхности грунта фиксировались точки, в которых колебания обоих датчиков находились в фазе; расстояние между точками равных фаз есть длина поверхностной волны.

Второй датчик показывает, что в песке распространяются только волны дискретных частот; для песка при $1 \text{ мм} < d < 2 \text{ мм}$ и влажности $W=4, 2 \%$ это 150 и 370 Гц. Изменения влажности и гранулометрии песка приводят к некоторым изменениям этих частот – при влажности $W=26\%$ в мелком песке были зафиксированы частоты 180 и 402 Гц. Волны всех других частот исследуемого диапазона, зафиксированные опорным датчиком, затухают на расстоянии 50 см. В этом эксперименте замерены длины волн: $\lambda=130 \text{ см}$ при 150 Гц, $\lambda=40 \text{ см}$ при 370 Гц. Таким образом, глубина проникновения поверхностной волны в песок не превышает 1 м, что указывает на отсутствие резонанса слоя при образовании дискретных частот. Какова же природа указанных частот?

В этой связи обратимся к данным лабораторных экспериментов по погружению вибрирующей пластины в морской песок [14], засыпанный в бассейн. Оценки наименьших резонансов бассейна, исходя из его размеров и заполнения, дают: 330 Гц – первый поперечный резонанс и 470 Гц – первый продольный резонанс. Для пластины первая резонансная частота лежит выше 500 Гц. В отсутствие пригрузки пластина тонет в песке с локально максимальной скоростью на частотах 25, 145, 175 и 500 Гц, причем абсолютный максимум приходился на 25 Гц. Эти же цифры были получены Н. Я. Хархутой (см. [15]) при выборе оптимальной частоты виброуплотнения песков.

Таким образом, можно говорить, что 25 Гц другие указанные частоты являются резонансными или собственными частотами внутренней структуры песка. На этих частотах можно ожидать либо его уплотнения, либо вибрационной флюидизации массива песка, что связано с зависимостью эффективного угла трения α от частоты (при фиксированном значении скорости дилатансии L , определяемой кинематикой относительных смещений частиц песка).

На резонансных частотах внутренней структуры следует ожидать повышенной диссипации механической энергии. Действительно, в работе [16] были отмечены колоколообразные кривые зависимости затухания от частоты с максимумом, приходящимся примерно на 20 Гц.

Что же происходит, если механическое воздействие производится в резонанс с собственной частотой массива? Опыты [17] по взрыву группы зарядов дают ответ на этот вопрос. Мгновенный групповой взрыв в песчаниках выявил преобладающую частоту в 10 Гц. Если производится короткое

замедление, то оно, вообще говоря, сглаживает распределение энергии по частотам, т.е. уменьшает сейсмоопасность. Однако при совпадении интервала замедления с преобладающим периодом (0,1 с) происходит резкое усиление основного сигнала. Для сооружений, резонирующих с собственной частотой грунта, этот эффект представляет существенную опасность [18, 19] даже в условиях, когда волна слаба по известным оценкам на максимальную скорость и ускорение [4]. При этом существенным оказывается продолжительность колебаний [19], что, согласно сказанному выше является следствием совпадения резонансной частоты внутренней структуры геоматериала и слойного резонанса.

Согласно [20], заглупление заряда приводит к исчезновению низкочастотного цуга и усилению высокочастотных волн. Это качественно соответствует опытам по АЭ при сдвиге шероховатых пластинок: увеличение нормального давления подавляет низкочастотную АЭ. Обычное объяснение появления низких частот при малозаглубленном взрыве связано по Б.Г. Рулеву [20] с эффектом откола.

При взрывах в напряженных массивах может происходить высвобождение упругой энергии из областей такого масштаба, что возникают инфразвуковые колебания частотой 1 Гц или менее, как это имеет место при горных ударах [21].

Традиционно считалось, что сигналы АЭ генерируются при внутреннем трещинообразовании. При этом излучаемые частоты определяются линейным масштабом событий и скоростью звука; по оценкам, они равны 10 - 10³ кГц. В опытах В. И. Куликова [7,8] фронт разрушения излучал сигналы 1 МГц. Как правило, экспериментальное изучение АЭ сводилось к подсчетам количества сигналов (сильных, слабых, средних) за определенные промежутки времени и по их количеству судили о приближении разрушения. Непрерывный частотный анализ сигналов АЭ применялся меньше – эти работы требуют более сложной специальной аппаратуры [22].

В данной работе АЭ понимались сигналы, излучаемые средой при ее квазистатическом нагружении. В песке появляются слабые колебания практически при любом уровне напряжений, т.е. и при тех, которые находятся в области упругости, оцениваемой по условию, что средние упругие деформации значительно превосходят остаточные. При каждой необратимой подвижке излучаются сигналы АЭ, происходит неравновесное проскальзывание. Оценивать частоту сигнала будем по [23]: $f \sim V/l$. Максимальной скорости смещения $V=0,75$ м/с, приблизительно оцененной по чувствительности датчика и величине сигнала на нем, и частоте 25 Гц соответствует масштаб излучателя $l \sim 3$ мм. Средний диаметр песчинок $d=0,3$ мм, а поэтому перестройка с излучением сигнала коснулась сразу 8-10 зерен песка. Опыты по нагружению оптически прозрачных сред [24, 25] выявили, что нагрузка в песке из-за дилатансионного распора распределяется по отдельным нагруженным конструкциям. Под действием ультразвука резко снижается [26] сухое трение на контактах частиц, имевшиеся структурные образования теряют устойчивость и превращаются (в силу дилатансии [25]) в объемный источник звука. При подвижках, включающих отдельные зерна, частота излучаемого сигнала возрастает примерно в 10 раз. Поющие пески, по Багнольду [27], излучают звук с максимальной частотой 265 Гц (пустыня Калахари) и 1 кГц (Северный Уэльс), но максимальные амплитуды соответствовали частотам, на порядок меньшим.

Таким образом, все изложенные здесь данные говорят о наличии некоторых резонансных частот, связанных с микроструктурой песка и ее перестроениями. Наличие этих частот нужно учитывать и в прикладных задачах геомеханики. В этой связи возникает проблема построения адекватной математической модели для указанных эффектов.

Авторы признательны А. А. Гвоздеву, Л. Д. Лившицу, А. В. Николаеву и Ю. И. Васильеву за полезные дискуссии. Авторы также благодарят сотрудников ВМНПО «Союзморинжгеология» Г. Н. Гамперта и Ю. С. Жинова за помощь при проведении экспериментов.

Рисунки

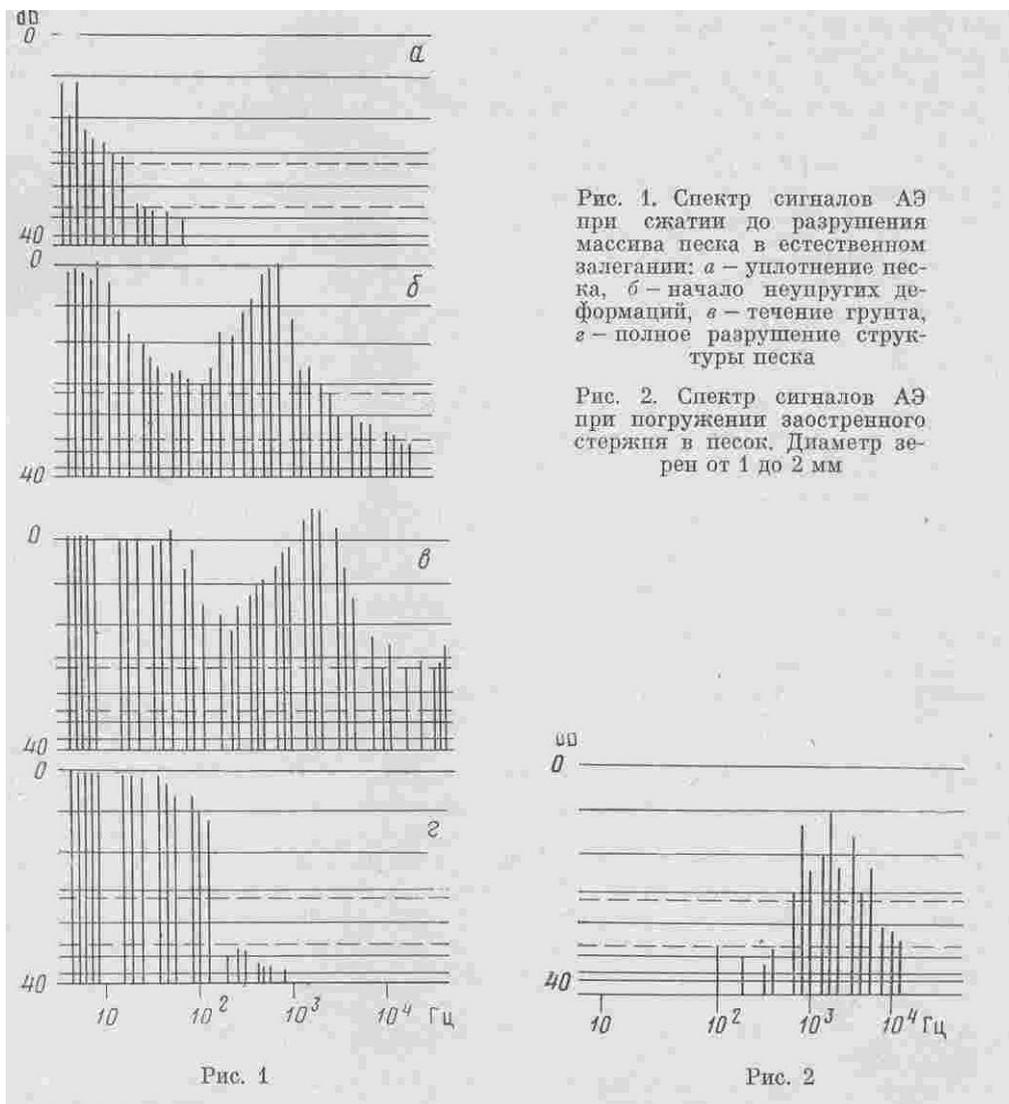
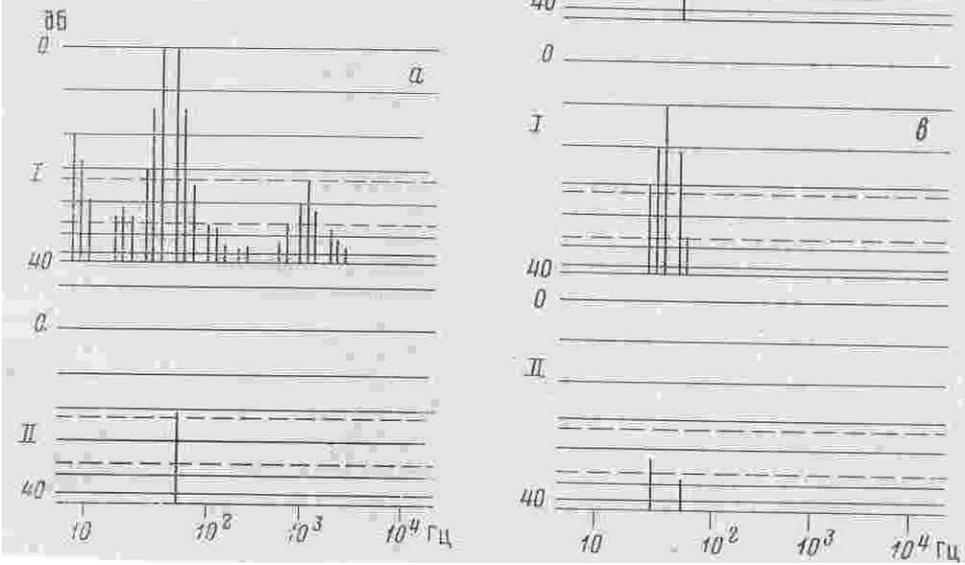


Рис. 3. Спектр колебаний, возбужденных гирей, падающей с высоты H на песчаный слой мощностью 2 м. L — расстояние от точки удара; датчики СВ-10: I — спектр в момент достижения максимума амплитуд колебания, II — спектр низкочастотного дуга. a — $H=2$ м, $L=0,8$ м; b — $H=1,5$ м, $L=1,5$ м, c — $H=1,5$ м, $L=13$ м



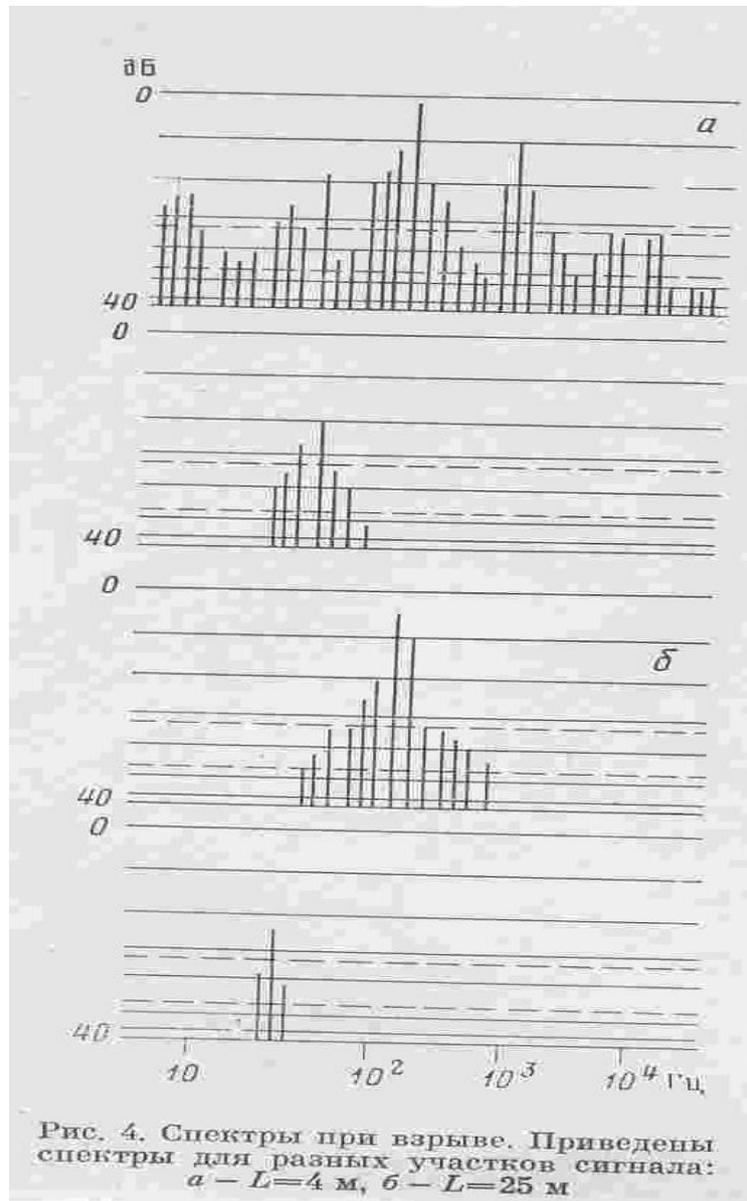


Рис. 4. Спектры при взрыве. Приведены спектры для разных участков сигнала:
 а - $L=4$ м, б - $L=25$ м

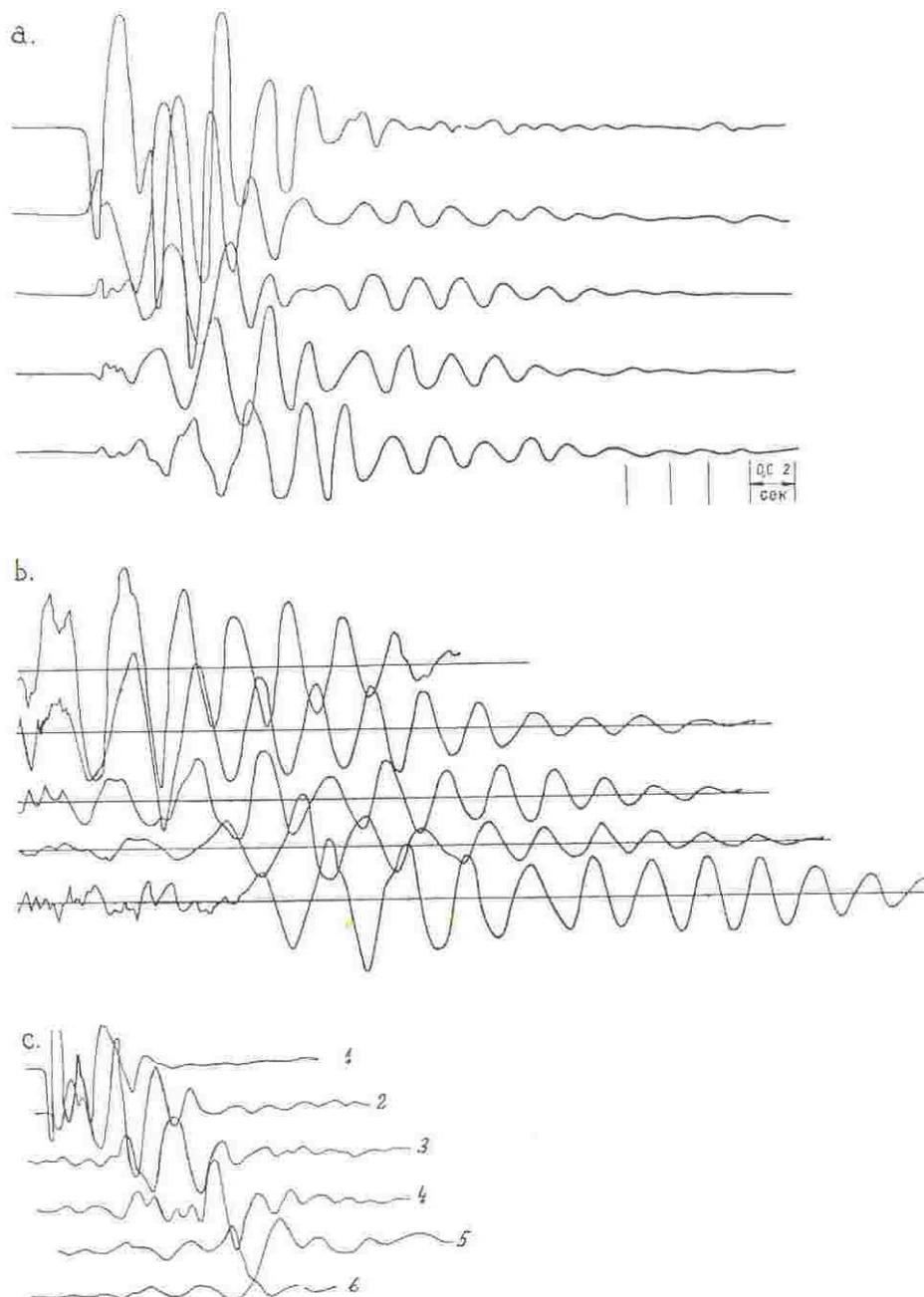


Figure 3. Oscillations excited by an identical shock at the sand mass 2 m (a) and 20 m (c) thick. Underlayer is formed by dolomites. Oscillations excited by a microexplosion in soil mass 2 m thick (b).

Рис.5

Записи колебаний: а) - удар гири $H=2$ м, расстояние между датчиками $L=2$ м., мощность слоя $h=2$ м, влажность $W = 26\%$; б)-взрыв $L=4$ м, $h=2$ м, $W=26\%$; в)- $H=1$ м, $h=15$ м. Между датчиками 2 м., $W=20\%$; 1-5 датчики СВ-10, 6-9- датчики СГ-12

Литература

1. Адушкин В. В. Влияние плотности и влажности песчаного грунта на размеры котловой полости при камуфлетном взрыве. – Физ. Горения и взрыва. 1979, т. 15, № 3, с. 107-116.
2. Гурвин И. И. К теории сферического излучателя сейсмических волн. – Изв. АН СССР. Физика Земли. 1965, № 10, с. 15-56.
3. Гурвин И. И., Левянт В. Б., Молотова Л. В. Экспериментальные амплитудные характеристики взрыва. – Изв. АН СССР. Физика Земли, 1966, № 3, с. 33-43.
4. Родионов В. Н., Адушкин В. В., Костюченко В. Н., Николаевский В. Н., Ромашов А. Н., Цветков В. М. Механический эффект подземного взрыва. М.: Недра, 1971ю 221 с.
5. Докучаев М. М., Родионов В. Н., Ромашов А. Н. Взрыв на выброс. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 108 с.
6. Воронина И. Ю., Епифанов В. П. Акустические исследования структурных изменений гранита при осевом сжатии. – Акуст. Журн., т. 26, в. 3, с. 371-376.
7. Куликов В. И. Скорость фронта разрушения и динамические напряжения на нем при взрыве в прочных средах. – Докл. АН СССР, 1983, т. 268, № 2, с. 332-336.
8. Николаевский В. Н. Динамическая прочность и скорость разрушения. – В кн.: Удар. Взрыв и разрушение. М.: Мир, 1981, с. 166-203.
9. Вильчинская Н. А. Волна переупаковки песков и акустическая эмиссия. – Докл. АН СССР, 1982, т. 262, № 3, с. 568-572.
10. Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т., Зотов Г. А. Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970. 335 с.
11. Васильев Ю. И., Щербо М. Н. Пластические волны сдвига в грунте. Изв. АН СССР. Физика Земли, 1965, № 10, с. 63-71.
12. Николаев А. В. Сейсмические свойства грунтов. М.: Наука, 1965. 183 с.
13. Бондарев Э. А. О волнах Рэлея в уплотняемых пористых средах. – Тр. 5-й Сессии Уч. Совета по народнохоз. Использов. Взрыва, 1965. Илим, с. 15-22.
14. Gomes L., Graves L. Stabilization of beach sand by vibration – Highway Res. Board, Bull № 325. Wash D. C. 1962, p. 44-54.
15. Шаталова И. Г., Горбунов Н. С., Лихтман В. И. Физико-химические основы вибрационного уплотнения порошковых материалов. М.: Наука, 1965. 161 с.
16. Kondner R., Ho M. M. Energy dissipation of a cohesive soil by the fourier transformation of stress relaxation response. – Transactions of the society of rheology, 1965, v. 9, p. 1. p. 145-157.
17. Заякин В. Н. Исследование сейсмического действия короткозамедленных взрывов. Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1981. 82 с.
18. Medearis K. dynamic characteristics of ground motions due to blasting. – Bull. Seismol. Soc. Amer., 1979, v. 69, № 2, p. 627-639.
19. Шамин В. М. К вопросу о сейсмическом действии мощных взрывов. – Докл. АН СССР, 1969, т. 185, № 6. С. 1280-1281.
20. Рулев Б. Г. Динамические характеристики сейсмических волн при подземных взрывах. – В кн.: Взрывное дело. М.: Недра, 1968, № 64/21, с. 109-158.
21. Петухов И. М., Смирнов В. А. И др. Геофизические исследования горных ударов. М.: Недра, 1975, 136 с.
22. Ohnaka M., Mogi K. Frequency characteristics of acoustic emission. – J. Geophys. Res., 1982, v. 87, № B5, p. 3873-3884.

23. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука, 1981. 208 с.
24. Roosmanith H., Pand Shukla A. Photoelastic investigation of dynamic load transfer in granular media. – Acta Mechanica, 1982, v. 42, p. 211-225.
25. Определяющие законы механики грунтов. Сб./Под ред. Николаевского В. Н. М.: Мир, 1975. 230 с.
26. Архангельский М. Е. Уменьшение сухого трения посредством ультразвуковых колебаний. – Изв. АН СССР. Мех. Тв. Тела, 1969, № 2.
27. Bagnold R. A. The shearing and dilatation of dry sand and the “Singing” mechanism. – Proc. Roy. Soc., 1966, v. 295 A, p. 49-63.

Всесоюзное морское
научно-производственное объединение
Союзморинжгеология
Академия наук СССР
Институт физики Земли
Им. О. Ю. Шмидта

Поступила в редакцию
23.VI.1983