

В. М. ФРЕМД, В. В. ШТЕЙНБЕРГ

КОЛЕБАНИЯ ГРУНТА И АППАРАТУРА ДЛЯ ЗАПИСИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Проблема изучения сильных землетрясений может быть условно разделена на две части:

- а) изучение очагов сильных землетрясений — задача сейсмологическая;
- б) исследование колебаний в ближней к очагу зоне для прогноза сейсмического воздействия — задача инженерно-сейсмологическая.

Кратко остановимся на некоторых характеристиках сильных землетрясений.

Колебания почвы интенсивностью $J=7$ баллов и выше возникают при землетрясениях с магнитудой 4,5—5 и более согласно формуле Н. Н. В. Шебалина (12):

$$J = 1,5M - 3,5 \lg H + 3,0. \quad (1)$$

Горизонтальные размеры очагов землетрясений составляют при этом от нескольких километров до нескольких сотен километров, если пользоваться соотношениями между магнитудой M и длиной L очага землетрясения согласно формулам (15, 16).

Сейсмические волны излучаются в широком диапазоне периодов от сотых долей до нескольких сот секунд. Излучаемые очагом длиннопериодные сейсмические волны характеризуют очаг в целом.

Как известно [5], период продольных колебаний основного тона T_0 связан с размерами очага землетрясения приближенным соотношением:

$$T_0(\text{сек}) \approx L(\text{км}). \quad (2)$$

Анализ записей и спектров длиннопериодных сейсмических волн позволяет получить информацию об очаге в целом, т. е. оценить размеры очагов землетрясений, их магнитуды, сейсмические моменты, величину подвижки по разрыву и сброшенные напряжения, скорости движения разрыва. Эти параметры позволяют при некоторых упрощениях оценить амплитуды и спектр смещений вблизи очага [13].

Длиннопериодные колебания при достаточно больших землетрясениях регистрируются только на значительных расстояниях и основной проблемой в настоящее время является обеспечение их неискаженной записи также вблизи очагов.

Поле короткопериодных сейсмических волн в ближней к очагу зоне определяется в основном ближайшим к точке наблюдения участком очага, размеры которого l соизмеримы с расстоянием R до точки наблюдения. Короткопериодные сейсмические волны с $T < 4-5$ сек (инженерно-сейсмический диапазон), которые и ответственны за сейсмический эффект, сильно поглощаются, рассеиваются и интерферируют в верхних, особенно неоднородных частях коры, и попытки достаточно полного

восстановления короткопериодной части спектра по записям далеких станций кажутся нам малоперспективными.

Поэтому для оценки параметров сейсмических колебаний в инженерно-сейсмологическом диапазоне периодов (от 0,05—0,1 до 4—5 сек) необходимы инструментальные наблюдения непосредственно в эпицентральных зонах.

1. *Параметры колебаний грунта.* Проведенные к настоящему времени инструментальные наблюдения позволяют оценить параметры колебаний, которые можно ожидать в ближней зоне. На рис. 1 показаны гистограммы распределения максимальных амплитуд смещений, скоро-

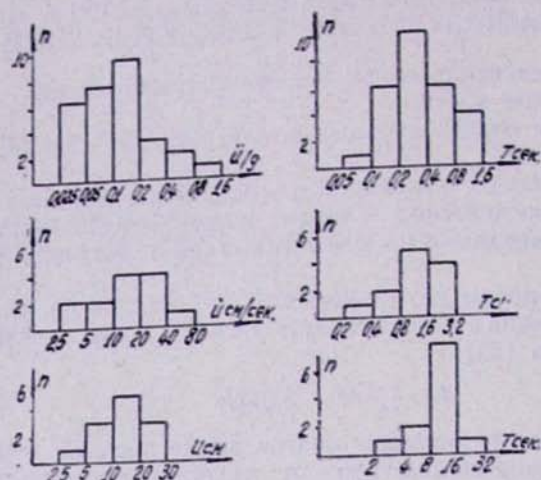


Рис. 1. Распределение максимальных единичных величин ускорений (1), скоростей (2) и смещений (3) колебаний грунтов и соответствующих им периодов при сильнейших инструментально зарегистрированных землетрясениях

стей и ускорений и соответствующих им периодов, в основном по данным сильных калифорнийских землетрясений с магнитудами $M=5-7,7$ в диапазоне эпицентральных расстояний $\Delta=5-70$ км [6,7]. Из рис. 1 следует, что при сильнейших инструментально зарегистрированных землетрясениях величины смещений достигали 20—40 см на периодах нескольких секунд. Максимальные значения скоростей колебаний 40—80 см/сек—на периодах от 3 сек и меньше. Максимальная зарегистрированная скорость колебаний 72 см/сек—отмечалась при Паркфилдском землетрясении (США) в 1966 г. в 80 м от разрыва, вышедшего на поверхность. Теоретические расчеты Брюна и Амбрасейса привели их к выводу о возможности возникновения в ближней к очагу зоне колебаний с амплитудой скорости до 100—150 см/сек и ускорений до 2g [19,20]. Приведенное на рис. 1 распределение ускорений показывает, что максимальные зарегистрированные ускорения близки к 1g ($\ddot{X}_{\max}=1,04$ g при землетрясении Сан-Фернандо, США, 1971 г.), а диапазон периодов от 0,05 до 1—1,5 сек.

Характер колебаний в пункте наблюдения зависит от размеров и глубины очага, расстояния до очага и геологических условий. При зем-

летрясениях с очагом малой магнитуды, но близко расположенным к объекту, отмечаются мощные короткопериодные колебания малой продолжительности с довольно большими единичными значениями амплитуд ускорений и скоростей. Так, например, при землетрясении 1966 г. в Матсуширо, Япония ($M=4,7$ км, $\Delta=5$ км, $H=4$ км) ускорения достигали величины $0,3$ g при относительной длительности $t=1$ сек*, а при ташкентских землетрясениях 10/V и 5/VI 1966 г. — $0,39$ и $0,28$ g при $t \approx 3-4$ сек ($M=4,5$ $\Delta \approx 2-3$ км, $H \approx 5$ км). Сейсмический эффект в указанных случаях не превышал 7 баллов. В то же время, при известных американских землетрясениях 1940 г. Эль-Центро ($M=6,7$, $\Delta \approx 20$ км, $H=17$ км) и 1949 г. Олимпия ($M=7,1$; $\Delta=40$ км, $H=70$ км) сейсмический эффект достигал 8 баллов при ускорениях $0,3$ g и длительности $t \approx 30-35$ сек. Необычно ко-

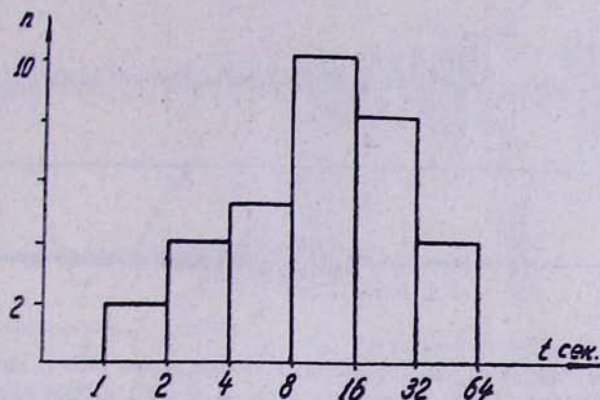


Рис. 2. Распределение длительностей колебаний при сильнейших землетрясениях

роткопериодные ($T < 0,1$ сек) продолжительные ($f \approx 30$ сек) колебания с амплитудой ускорений до $0,4$ g отмечались при сравнительно удаленном семибалльном Перуанском землетрясении 17/X 1966 г. ($M=7,5$, $\Delta \approx 200$ км [10]).

На рис. 2 изображено распределение длительностей колебаний t для 33 сильнейших землетрясений мира по данным Н. Амбрасейса [20]. Из рисунка следует, что в большинстве случаев величины длительностей лежат в диапазоне от 8—10 до 30 сек.

На рис. 3 даны копии акселерограмм Эль-Центро, Паркфилда и Перуанского землетрясения 1966 г., на рис. 4 и 5—копии акселерограмм и амплитудно-частотные спектры ускорений семибалльных ташкентских землетрясений 10/V и 5/VI 1966 г. и на рис. 6—копии велосиграммы и амплитудно-частотный спектр скорости Дагестанского землетрясения 8/VI 1970 г. интенсивностью 6 баллов.

Таким образом, в ближней к очагу зоне могут возникать колебания различного характера, вызывающие различный сейсмический эффект в зависимости от характера сотрясений и типа построек. При таком разнообразии однозначная корреляция между единичными параметрами колебаний и сейсмическим эффектом становится затруднительной. Иллюстрацией к сказанному может служить рис. 7, на котором приведены измеренные значения ускорений [12] и рассчитанные из акселерограмм скорости [15] для 33 сильнейших землетрясений. По оси абсцисс отложены истинные (наблюдаемые) макросейсмические значения интенсивности в

* t —длительность участка акселерограммы, в пределах которого величины ускорений превышают $0,03$ g [20].

баллах, а по осям ординат—скорости, ускорения колебаний и соответствующие им расчетные интенсивности в баллах по шкале MSK-64.
Как следует из графиков (рис. 7), при одной и той же величине мак-

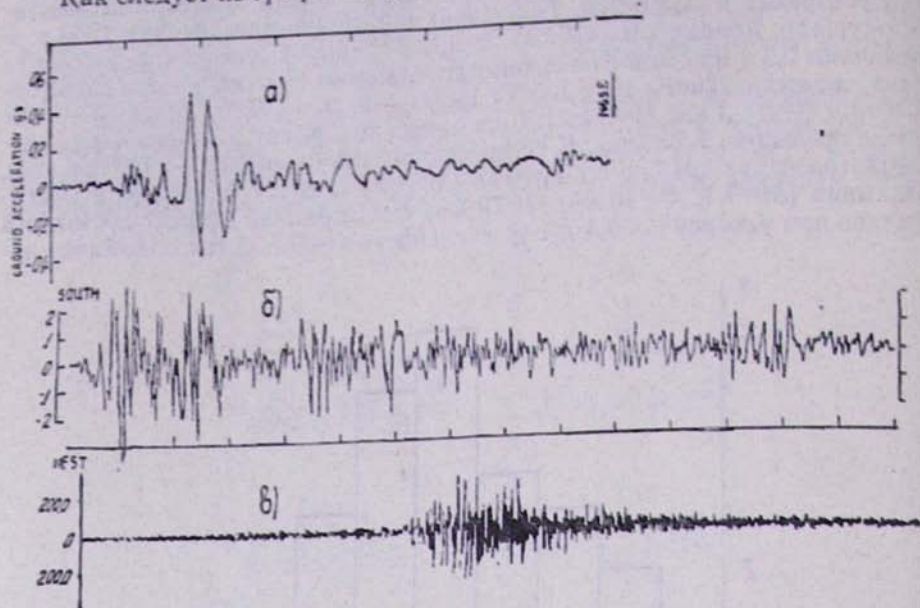


Рис. 3. Копии акселерограмм землетрясений: Паркфилдского 1966 г. интенсивностью 7 баллов (а), Эль-Центро 1940 г. интенсивностью 8 баллов (б) и Перуанского 1966 г. интенсивностью 7 баллов (в) в месте регистрации

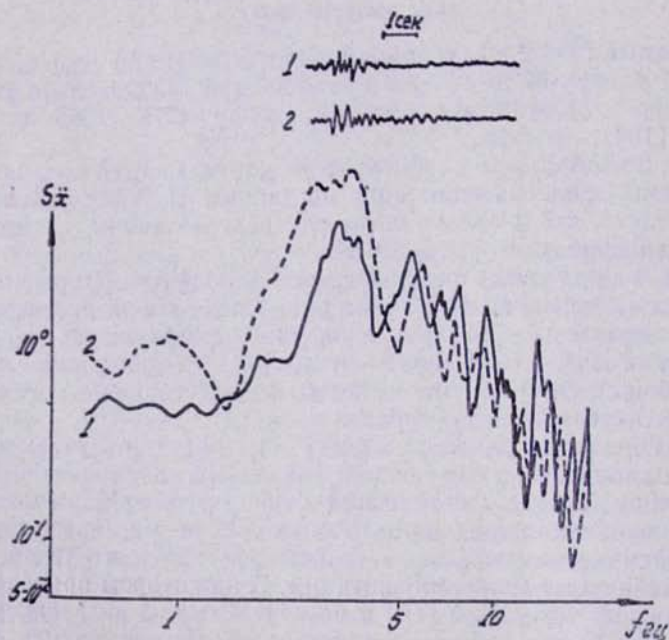


Рис. 4. Копии акселерограмм и амплитудно-частотные спектры горизонтальных колебаний, зарегистрированных в Ташкенте 10 мая 1966 г. акселерографом УАР. Интенсивность 7 баллов

сеismicкой интенсивности значения амплитуд колебаний отличаются на порядок. Особенно высокие значения ускорений и скоростей при низких наблюдаемых значениях балльности (5—6 баллов) имели место при очень близких $\Delta \leq 10$ км землетрясениях малой магнитуды ($M = 4-5$).

Так как, по-видимому, сейсмический эффект, т. е. реакция сооружений, зависит от многих факторов и не может быть точно описан любым единственным параметром, получение полной сейсмической информации,

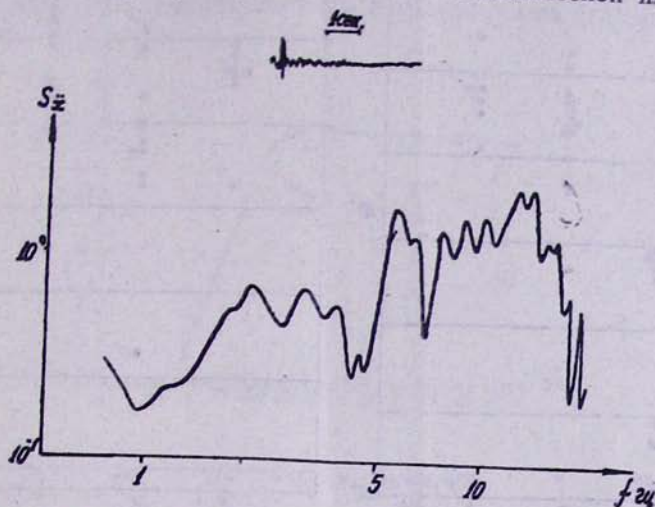


Рис. 5. Копия акселерограммы и амплитудно-частотный спектр вертикальных колебаний, зарегистрированных в Ташкенте 5/VI 1966 г. акселерографом УАР. Интенсивность 7 баллов.

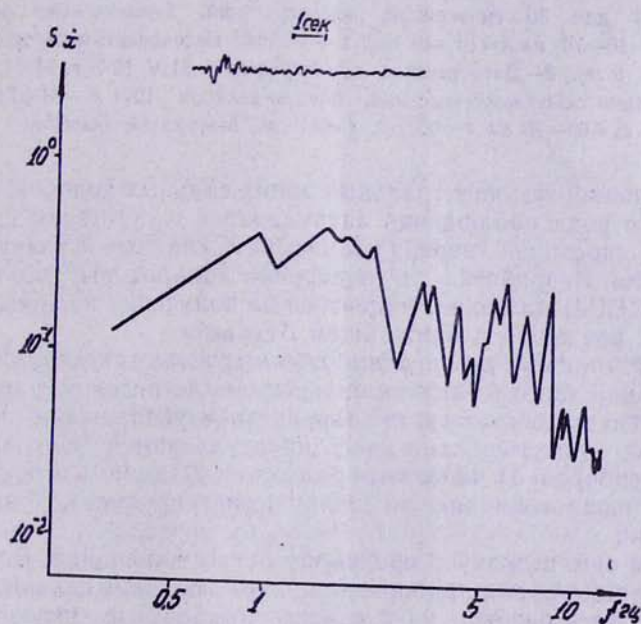


Рис. 6. Копия велосигранмы и амплитудно-частотный спектр горизонтальных колебаний, зарегистрированных в Дагестане 8/VI 1970 г. осциллографом ИСО-П. Интенсивность 6 баллов

т. е. записей колебаний в широком частотном и динамическом диапазонах—генеральная линия развития в современной инженерной сейсмологии. Она требует организации постоянных станций для регистрации сильных землетрясений в сейсмически активных зонах и инструментальной

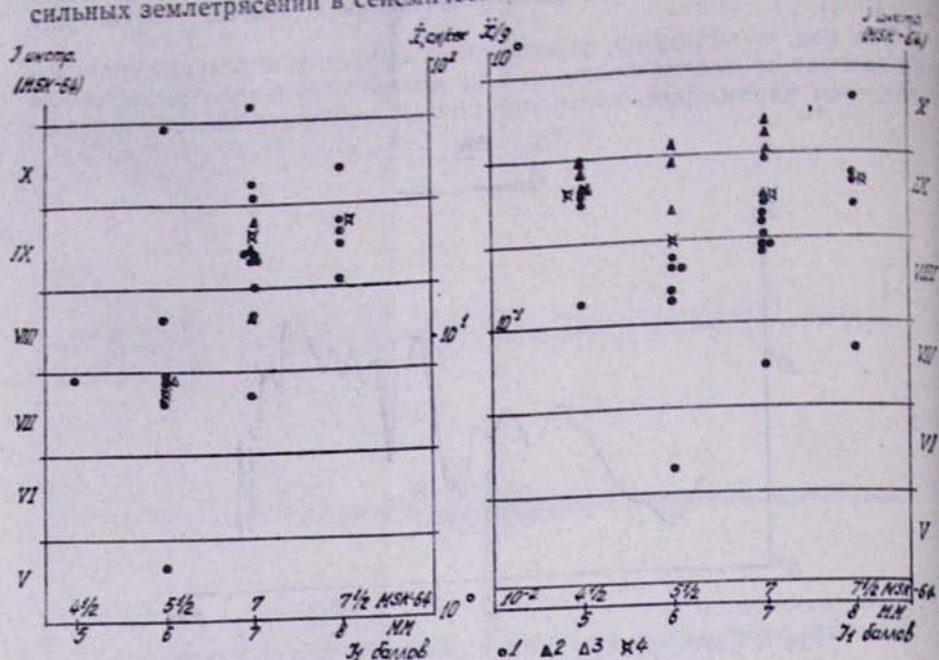


Рис. 7. Сопоставление балльности (шкала MSK-64), рассчитанной из величин ускорений и скоростей колебаний ($J_{инстр.}$) с макросейсмической интенсивностью (по шкалам ММ и MSK-64) для 36 сильнейших землетрясений. 1—«обычные» землетрясения $M=5-7,7$, $\Delta=10-70$ км, $t=10-40$ сек; 2—близкие высокочастотные толчки $M=4-5$, $\Delta < 10$ км, $t \leq 5$ сек; 3—Дагестанское землетрясение 31/V 1970 г. $M=4,2$, $\Delta=7$ км, $t=2$ сек; 4—Камчатские землетрясения, ноябрь-декабрь 1971 г. $M=7,2$ и $M=7,7$, $\Delta=60-70$ км, $t=32$ сек, $t=41$ сек; 5—средние значения

ных исследований в эпицентральных зонах сильных толчков. Развитие в СССР такого рода наблюдений затруднялось отсутствием специальной аппаратуры, способной уверенно записывать сильные и разрушительные землетрясения. Разработка и внедрение аппаратуры ждущего типа (ИСО-ИМ, ССРЗ) позволяет надеяться на получение полноценных записей сильных движений в ближайшем будущем.

2. Аппаратура для регистрации сильных землетрясений. Рассмотрим аппаратуру для записи близких сильных землетрясений с точки зрения ее соответствия требованиям, предъявляемым указанными в § 1 задачами. Наиболее существенными здесь представляются следующие характеристики приборов: 1) частотный диапазон; 2) динамический диапазон; 3) максимальная величина сигнала, регистрируемого с допустимыми искажениями.

Сделаем еще несколько предварительных замечаний. Все используемые в настоящее время приборы для записи близких сильных землетрясений могут быть разбиты на 2 класса—приборы с непосредственной (механической, оптической) регистрацией и приборы с дистанционной (гальванометрической, магнитной) регистрацией. Способ регистрации

определяет возможности формирования частотной характеристики канала записи и оказывает существенное влияние на эксплуатационные и метрологические показатели сейсмографа. Вместе с тем, при любых способах регистрации колебания почвы воспринимаются инерционной механической системой, содержащей массу, упругий и демпфирующий элементы. Регистрирующая часть сейсмографа за счет обратной связи может ослабить ограничения, накладываемые этой инерционной системой—сейсмометром. Однако для всех существующих сейсмографов сильных движений влиянием системы регистрации на сейсмометр можно пренебречь.

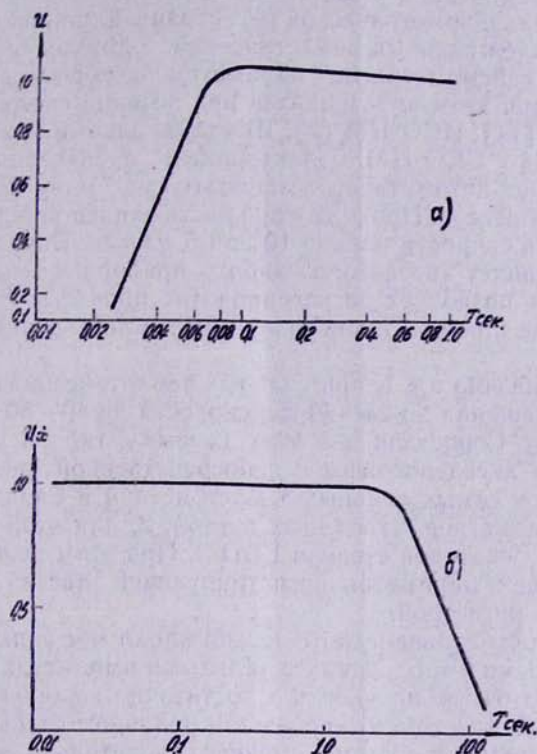


Рис. 8. Типовые амплитудно-частотные характеристики. а—акселерограф ССРЗ; б—велосиграф С5С ($T = 5 \text{ сек}$)—ГВ-IV-B-3. ($f_g = 120 \text{ гц}$)

Практически всегда ограничения на максимальную величину регистрируемого сигнала накладывает сейсмометр (при условии достаточной вибропрочности всей аппаратуры), а на динамический диапазон—регистрирующая часть сейсмографа.

Из приборов с непосредственной регистрацией в СССР и за рубежом в настоящее время используются акселерографы, работающие в режиме ожидания. Основные параметры наиболее распространенных акселерографов (1, 14, 22) приведены в табл. 1. Частотная характеристика акселерографов (рис. 8, а) открыта в область низких частот, а сверху ограничена собственной частотой акселерометра.

До последнего времени в СССР использовались акселерографы УАР с оптической регистрацией. Сейчас им на смену пришли автоматические сейсмографы ССРЗ для регистрации сильных и разрушительных

землетрясений. Прибор ССРЗ позволяет записать на фотопленку до 10 сейсмических процессов при скорости регистрации 6 или 3 мм/сек. Продолжительность одного цикла записи до 50 сек. Магнитоэлектрический стартер с собственной частотой 3 гц включает прибор на регистрацию при скорости колебаний почвы около 0,5—1 см/сек. Сейсмограф надежно герметизирован. Автономное питание обеспечивает время работы прибора, ограниченное лишь сроком службы батарей (не менее 6 месяцев).

Непосредственная регистрация используется также в некоторых сейсмографах, записывающих смещения почвы. Это разработанные в США приборы Кардера [23], стационарные сейсмографы СМР [1], эпицентральная сейсмическая станция ЭСС [11]*.

Каналы с гальванометрической регистрацией, широко используемые в СССР при записи сильных землетрясений, комплектуются магнитоэлектрическими сейсмометрами, параметры которых сведены в табл. 2 [14]. Запись при этом производится при помощи светолучевых осциллографов Н-700 [14], ИСО-ИИМ [2]. Шестиканальный магнитоэлектрический осциллограф ИСО-ИИМ с электронным пускателем и отметчиком времени позволяет автоматически записать на одну фотопленку до 5 сейсмических процессов. Продолжительность записи каждого процесса—30 или 60 сек при скорости пленки 10 или 5 мм/сек. Внутреннее электропитание обеспечивает автономную работу прибора в течение 6 месяцев. Качество записи позволяет регистрировать процессы с частотами до 25 гц. Включение прибора происходит при землетрясениях силой 2—2,5 балла и выше.

Как было указано в § 1, при сильных землетрясениях в ближней зоне возможны смещения до 24—40 см, скорости до 40—80 см/сек и более, ускорения до 2 g. Сопоставление этих данных с табл. 1 показывает, что практически все акселерографы с непосредственной регистрацией пригодны для записи самых сильных землетрясений в ближней зоне. Из остальных сейсмометров, указанных в табл. 2, для этой цели пригодны лишь ОСП и до некоторой степени ВБП-3. При этом необходимо принимать во внимание и параметры регистрирующей части сейсмографа, в частности гальванометров.

Для того чтобы гальванометрический канал мог записать колебания почвы с указанными в табл. 2 максимальными амплитудами, необходимо обеспечить достаточную прочность и достаточно хорошую балансировку гальванометра. Дело в том, что во всяком реальном гальванометре центр тяжести чувствительной системы смещен относительно оси ее вращения (разбаланс). При этом сам гальванометр, в зависимости от соотношения между собственной и вынуждающей частотами, ведет себя при землетрясении, как акселерометр, велосиметр или измеритель смещений. Этот вопрос подробно рассмотрен в [7].

Выводы работы [7] легли в основу выбора гальванометров для установленных примерно на 20 сейсмических станциях ЕССН СССР автоматических велосиграфов с сейсмометрами С5С и осциллографами ИСО-ИИМ**. Эти приборы регистрируют на двух уровнях чувствительности (4 и 0,16 сек) скорости колебаний почвы по трем взаимно перпендикулярным составляющим. Частотная характеристика каналов записи изображена на рис. 8, б. Частота гальванометров $fg=120$ гц.

Здесь же следует упомянуть о разрабатываемом в ИФЗ АН СССР

* Изготовлена и испытана опытная партия станций ЭСС.

** Осциллограф ИСО-ИИ используется так же на станциях инженерно-сейсмометрической службы.

О И ОКБ ИГИС АН АрмССР новом вибрографе, в котором в качестве чувствительных элементов используются специально разбалансированные инерционные системы, подобные подвесным системам магнитоэлектрических гальванометров [3, 4]. Преимуществами таких систем являются возможности регулировки затухания в широких пределах и унификация акселерометров, велосиметров и измерителей смещений.

Открытые в сторону длинных периодов характеристики акселерографов с непосредственной регистрацией (рис. 8, а) в принципе пригодны для записи сильных землетрясений как в сейсмологическом, так и в инженерно-сейсмологическом диапазонах частот, хотя ускорения в длиннопериодной части спектра очень малы. Напротив, сейсмометры, перечисленные в табл. 2, если они используются с сравнительно высокочастотными гальванометрами, допускающими удовлетворительную разбалансировку, имеют амплитудную частотную характеристику, постоянную лишь до частот порядка f_3 (0,2—0,3 гц для сейсмометра С5С).

Говоря о частотном диапазоне сейсмографов и, в частности, акселерографов с непосредственной регистрацией, следует помнить о возможности работать на длиннопериодном склоне частотной характеристики канала. Интегрирование и двойное интегрирование записей в принципе позволяет выделять колебания с периодами, в несколько раз большими собственного периода сейсмометра при достаточной стабильности и точности канала. Однако при этом могут возникать ошибки до 100% и более, если интервал интегрирования сравним с периодом выделяемой волны. А ведь именно такое положение и возникает, если мы хотим выделить периоды 30—60 сек на записях, реальная длительность некоторых (см. § 1) близка к этой величине.

Выделению длиннопериодных колебаний на записях акселерографов препятствует также их низкий динамический диапазон. Так, например, по данным [20], максимальное смещение почвы на периоде 30 сек может составить до 30—40 см. Это соответствует ускорению порядка 1 см/сек². Из табл. 1 следует, что такие ускорения не смогут быть прочтены на записях акселерографов с максимальным регистрируемым ускорением 1—2 g. Регистрация ускорений в достаточно широком интервале амплитуд требует динамического диапазона канала не менее 80 db.

Для регистрации сильных и разрушительных землетрясений в ближней зоне можно рекомендовать акселерометры с электрическим выходом. Удовлетворительные динамический и частотный диапазоны могут при этом быть обеспечены пьезоэлектрическими приборами [6]. Разработанный в ИФЗ АН СССР трехкомпонентный пьезоэлектрический акселерометр АПТ-1 [8] имеет следующие основные параметры: чувствительность 0,3—0,5 в/g максимальное регистрируемое ускорение 2—3 g, динамический диапазон 80 db, максимальный период колебаний, регистрируемых с постоянной чувствительностью—5—7 сек.

Принципиальные ограничения по максимальному периоду регистрируемых колебаний могут быть преодолены за счет использования нового пьезоэлектрического датчика с резонансным возбуждением [9, 10]. От известных этот датчик отличается тем, что в нем резонансные колебания пьезоэлемента модулируются по амплитуде измеряемым воздействием. При этом датчик оказывается чувствительным к колебаниям самых низких частот, вплоть до постоянных давлений. Следует все же отметить, что, практически, до сих пор регистрация длиннопериодных колебаний в эпицентральной области сильного землетрясения не обеспечена аппаратурой.

Регистрационные возможности сейсмографов сильных движений существенно зависят от способа записи. В этой связи необходимо кратко

Таблица 1

Параметры некоторых акселерографов с непосредственной регистрацией

Тип, страна	Собственная частота, <i>гц</i>	Чувствительность, <i>мм</i>	Максимальное регистрируемое ускорение (двойная амплитуда)	Динамический диапазон	Способ и носитель записи	Скорость протяжки носителя, <i>см/сек</i>
AR-240, США	15—25	76; 152; 304	2	40	Оптическая, фотобумага 300 <i>мм</i>	2
RFT-250, США	15—25	19, 38; 76	2	40	Оптическая, фотопленка 70 <i>мм</i>	4
МО-2, США	33	15	1	35	Оптическая, фотопленка 35 <i>мм</i>	1,5
SMAC—E, Япония	20	5	2	40	Механическая, лента 35 <i>мм</i>	0,25
УАР, СССР	22	16	2	35	Оптическая, фотобумага 60 <i>мм</i>	1
ССРЗ, СССР	30—40	12; 50	3	40	Оптическая, фотопленка 60 <i>мм</i>	0,6

Таблица 2

Параметры сейсмометров, используемых для гальванометрической регистрации близких землетрясений

Тип	Собственный период, <i>сек</i>	Приведенная длина, <i>см</i>	Рабочее затухание	Максимальная регистрируемая амплитуда колебаний почвы	Чувствительность преобразователя, $\frac{\text{в. сек}}{\text{м}}$
ВЭГИК	1	10	0,6	1 <i>мм</i>	20
СМ-3	1,5	8	0,6	5 <i>мм</i>	18
С5С	5	42	0,6	15 <i>мм</i>	13
ВВП-3	2	100	0,7	200 <i>мм</i>	0,1
ОСП	0,2	—	7	140 <i>см/сек</i>	15 (КЭМС)

становиться на магнитной записи сильных землетрясений. Используемый в США акселерограф с магнитной записью RMT-280 [13] имеет чувствительность 5 v/g при собственной частоте акселерометров 15—20 $гц$. Частотная модуляция обеспечивает динамический диапазон не ниже 40 $дб$. Магнитная запись и запоминание используются и в японском регистраторе случайных событий SR-2101. В СССР также ведутся работы по использованию магнитной записи в сейсмографах сильных движений. Предпочтительным здесь представляется применение цифровой магнитной записи, обеспечивающей динамический диапазон 60—80 $дб$.

Наш обзор был бы неполным, если бы мы не упомянули о простых и надежных приборах—сейсмоскопах. Американские сейсмоскопы Вилмота [23], так же как и советские приборы АИС и СБМ (14), позволяют получить сведения о максимальных величинах реакций простейших механических систем на колебания почвы при землетрясении и тем самым оценить интенсивность последнего. Большой интерес представляет работа [24], в которой показано, что сейсмоскоп в принципе может дать информацию не только о максимальных воздействиях, но и обо всем процессе колебаний, в том числе, при некоторых условиях, и об амплитудно-временных характеристиках этого процесса.

Заключение

1. Анализ инструментальных данных и теоретические расчеты указывают на возможность возникновения в ближайшей к очагу зоне амплитуд колебаний 20—40 $см$, 100—150 $см/сек$ и до 2000 $см/сек^2$ в диапазоне периодов от 4—5 до 0,1 $сек$. Длительность фазы интенсивных колебаний в зависимости от магнитуды землетрясения, близости очага к объекту и глубины варьирует от 1 $сек$ до нескольких десятков секунд.

2. Сейсмический эффект плохо коррелируется с величинами отдельных параметров колебаний и зависит от интенсивности (амплитуд), частотного состава и длительности процесса колебаний. Все эти факторы должны быть учтены при составлении новой сейсмической шкалы интенсивности.

3. Анализ фактических данных о колебаниях грунтов и рассмотрение параметров аппаратуры указывают на предпочтительность использования акселерографов для регистрации колебаний почвы как в сейсмологическом, так и в инженерном (от 0,05—1 до 4—5 $сек$) диапазоне периодов.

4. Перспективным является использование акселерометров с электрическим выходом и магнитной записи, позволяющей расширить частотный и динамический диапазоны и автоматизировать обработку данных.

Ордена Ленина Институт физики Земли АН СССР

ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский В. Т. и др. Аппаратура и методика наблюдений на сейсмических станциях СССР. Изд. АН СССР, 1962.
2. Борисевич Е. С. и др. Модернизированный инженерно-сейсмический осциллограф ИСО—ПМ. В сб. «Сейсмические приборы», вып. 7, изд. «Наука», 1973.
3. Борисевич Е. С., Киринос Д. П., Фрейд В. М. Устройство для измерения и регистрации смещений, скоростей и ускорений. Авт. св. № 295099, бюлл. изобретений № 7, 1971.

4. Борисевич Е. С., Кирнос Д. П., Фрейд В. М. Зеркальный рамочный крутильный вибромтр. В сб. «Сейсмические приборы», вып. 6, изд. «Наука», 1972.
5. Парийский Б. С., Радченко В. П., Кейлис-Борок В. И. Продольные волны, возникающие при разрыве. В сб. «Вычислительная сейсмология», вып. 1, изд. «Наука», 1966.
6. Санани И. Б. и др. Пьезоэлектрический сейсмограф. Тр. Гидропроекта, сб. 20, 1971.
7. Фрейд В. М. К возможности использования гальванометров для записи сильных землетрясений. В сб. «Сейсмические приборы», вып. 6, изд. «Наука», 1972.
8. Фрейд В. М., Галстян Г. Е., Забелин М. В. Трехкомпонентный пьезоэлектрический акселеромтр АПТ-1. В сб. «Сейсмические приборы», вып. 6, изд. «Наука», 1972.
9. Фрейд В. М. Пьезоэлектрический датчик колебаний. Авт. св. № 338868. Бюлл. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, тов. знаки», № 16, 1972.
10. Фрейд В. М. Пьезоэлектрический акселеромтр с резонансным возбуждением. В сб. «Сейсмические приборы», вып. 7, изд. «Наука» (в печати).
11. Шнирман Г. Л. Эпицентральная сейсмическая станция. Тр. ИФЗ АН СССР, № 35 (202), 1964.
12. Шебалин Н. В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании. В кн. «Сейсмическое районирование СССР», изд. «Наука», 1968.
13. Штейнберг В. В. и др. Параметры колебаний грунта при Дагестанских землетрясениях 1970 г. В сб. «Параметры колебаний грунта при землетрясениях», изд. «Наука», 1973.
14. Информационный справочник по сейсмической аппаратуре, вып. 2, изд. ИФЗ АН СССР, 1970.
15. Tocher D. Earthquake energy and ground brekage. Bull. Seism. Soc. Am. V. 48, 1958.
16. Iida K. Eartquake energy and earthquake fault. J. Earth. Sci. N. 7, 1959.
17. Strong motion earthquake accelerograms. A report on research conducted under a grant from the Natinal Science Foundation. Pasadena, California, 1969.
18. Cloud W., Perez V. Strong motion and accelerograms. Proc IV World Conf. Earth. Eng. Chile, 1969.
19. Brune. J. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. J. Geophys. Res. V. 75, N. 26, 1970.
20. Ambraseys N. Maximum intensity of ground movements caused by faulting. Proc. IV World Conf. Earth. Eng. Chile, 1969.
21. Lee K. L., Monge J. E. Effect of soil conditions on damage in the Peru earthquake of October 17, 1966. Bull. Seism. Soc. Am. V. 58, N. 3,
22. Eisenberg A., McEvilly T. V. Comparison of some widely-used strong-motion earthquake accelerometers. Bull. Soc. Am. V. 61, N. 2, 1971.
23. Rodgers G. S., Milne W. G. Bone M. N. The strong-motion seismograph network in western Canada, 1970. Publ. of Earth Phys. Branch, V. 41, N. 2, Ottawa, 1970.
24. Trifunac M. D., Hudson D. E. Analysis of the station No. 2 seismoscope record—1966, Parkfield, California, earthquake. Bull. Seism. Soc. Am. V. 60, N. 3 1970.