

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ЗАПИСЕЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ

В идеальном случае для динамической теории расчета сейсмических нагрузок необходимо строгое решение задачи о колебаниях системы со многими степенями свободы (сооружение) под воздействием статистически осредненной переменной силы. Сейчас существуют многие приближения решения этой задачи.

Моделирование зданий и сооружений маятниковыми системами с собственными периодами и коэффициентами затуханий, соответствующими определенным типам [3, 4], представляет одно из направлений в развитии методов учета сейсмических воздействий на здания и сооружения. Нами организована для этой цели регистрация землетрясений наборами сейсмических каналов «маятник—гальванометр» с резонансными частотными характеристиками в составе сейсмических станций, ведущих регистрацию в «ждущем» режиме на Сьюльбанском инженерно-сейсмологическом полигоне трассы БАМ.

В состав станций «ждущего» режима включены каналы, регистрирующие землетрясения энергических классов не ниже 11,0 с эпицентрными расстояниями от нескольких десятков до нескольких сотен километров.

Поскольку для различных целей инженерной сейсмологии при расчетах на сейсмостойкость традиционно используются различные кинематические элементы колебаний, запись землетрясений проводилась по смещениям, скоростям, ускорениям колебаний частиц грунта. Сейсмограммы (записи смещений) получены с использованием маятников ВЭГИК, СКД, гальванометров ГБИУ; велосигаммы—с использованием маятников С5С, гальванометров ГБИУ. Для записей ускорений использовались комплекты аппаратуры, состоящие из маятников СПМ16, гальванометров ГБИУ. Однако ввиду сравнительно низкой чувствительности каналов и отсутствия в период наблюдений близких сильных землетрясений акселерограммы получены не были. Для детального изучения спектрального состава колебаний грунтов при землетрясениях в низкочастотной области нами были использованы маятники СКД, способные регистрировать колебания от 20 сек и ниже. Регистрация резонансных составляющих колебаний грунтов проводилась на частотах 0,5, 1, 2, 5 гц. Сейсмические станции «ждущего» режима оборудованы осциллографами Н700 и Н010 (только для записи скоростей).

Параметры приборов станций «ждущего» режима приведены в табл. 1.

Таблица 1

Кинематические элементы	Тип маятника	Число каналов	T_1	T_2	D_1	D_2	σ^2	U_{max}
Смещение почвы	ВЭГИК	2	2	0,1	0,5	5	0,1	3500
	СКД	2	20	0,2	0,5	12	0,1	250
Скорости	С5С	8	5	0,00733	0,55	0,7	0,1	10
Ускорение	СПМ—16	2	30	0,1	0,35	5	0,006	1
Резонансные каналы								
Основная частота								
0,5 гц	ВЭГИК	—	2	0,2	0,2	5	0,1	760
1 гц	ВЭГИК	—	1	0,2	0,2	7	0,1	2900
2 гц	ВЭГИК	—	0,5	0,2	0,2	7	0,1	2200
5 гц	ВЭГИК	—	0,2	0,1	0,2	1,5	0,05	7600

Амплитудно-частотные характеристики сейсмических каналов показаны на рис. 1. Каналы, регистрирующие одноименные кинематические элементы однотипными приборами, идентифицированы.

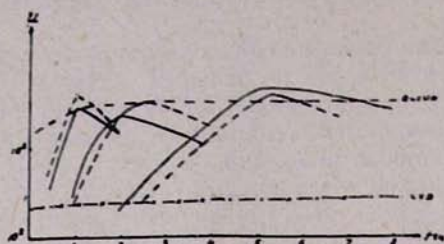


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики сейсмических каналов (АЧХ). Пунктирными линиями показаны АЧХ резонансных каналов, полученные по отношению спектров входного и выходного сигналов

Первоначально запускающим устройством для станций служил усилитель осциллографа ИСО. На выходе усилителя стояло мощное реле, выдерживающее на контактах не менее 10 ампер. В дальнейшем сигнал на вход усилителя осциллографа ИСО подавался предварительно усиленным широкополосным усилителем, собранным по схеме, приведенной в [2].

Для увеличения порога срабатывания запускающего устройства, работающего без предварительного усилителя, было увеличено число витков обмоток катушек маятников ВЭГИК на входе. Их сопротивление составляло не менее 300 ом. Катушки пяти маятников запускающего устройства для увеличения ЭДС входного сигнала соединялись последовательно.

Поскольку ЭДС обмоток катушек маятников пропорциональна скорости движения, а максимальные скорости колебаний большинства грунтов при землетрясениях приходится на диапазон частот 2—5 гц, запускающие маятники работали с собственным периодом колебаний 0,5 сек. Это позволило регистрировать землетрясения с максимальной амплитудой не менее 4 мм на частоте 1 гц, что соответствует землетрясениям $k=12,5$ на расстоянии 500 км.

На скальном и валунно-галечниковом мерзлом с песчаным заполнителем грунтах (т. н. 1, 3) для регистрации в ждущем режиме составляющей NS смещений установлены сейсмоприемники ВЭГИК, СКД с двумя уровнями увеличений (3500; 250) и двумя частотными диапазонами (20÷1; 20—0,2 гц), составляющей NS скоростей (маятники С5С), ускорений (маятники СПМ 16). Маятники резонансных каналов NS компоненты настроены на частоты 5, 2, 1 и 0,5 гц.

Станциями ждущего режима зарегистрировано 4 землетрясения: 1) 23.09.76 г. 9^h50^m03.6^s, $K=13$, $\Delta=390$ км; 2) 2.11.76 г. 14^h55^m59.6^s, $K=14$, $\Delta=350$ км; 3) 24.11.76 г. 18^h33^m35^s $K=13$, $\Delta=40$ км; 4) 25.11.76 г. 9^h44^m35.5^s, $K=10$, $\Delta=400$ км.

Изучались как сами записи землетрясений, так и их спектры. Пример записи землетрясения 23.09.76 г. широкополосным каналом ВЭГИК и резонансных составляющих приведен на рис. 2. Приращение балльности для валунно-галечникового мерзлого грунта по записям смещений от 4 землетрясений составляет $(0,75 \pm 0,25)\delta$, что удовлетворительно согласуется с результатами, полученными по записям

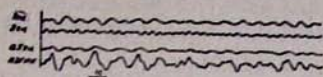


Рис. 2. Сейсмограмма землетрясения
23. 09. 76 г.

слабых ($K=7-8$) землетрясений станциями непрерывного режима. Записи резонансных каналов характеризуются достаточно установившимися колебаниями со сравнительно постоянным амплитудным уровнем в некотором временном интервале. Это характерно для колебательных процессов, длительность которых достаточна для того, чтобы в сейсмическом канале закончился переходный процесс. Максимальные амплитуды колебаний разных резонансных каналов сформировываются в различные моменты времени. Характерным для этих записей является то, что преобладающие частоты колебаний не всегда совпадают с собственными частотами резонансных каналов. Записи резонансных каналов с собственными частотами, близкими к преобладающим частотам землетрясений, характеризуются либо частотами, близкими к преобладающим частотам землетрясений, либо частотами, промежуточными между преобладающими частотами землетрясения и собственными частотами резонансных каналов. Частоты записей высокочастотных резонансных каналов (5 гц) соответствуют собственным частотам этих каналов.

Анализом результатов, полученных по разным сейсмическим каналам на определенных типов зданий установлено, что для колебаний разных зданий при землетрясениях характерен, во-первых, не одинаковый временной интервал амплитуд с максимальным уровнем, во-вторых, частоты их колебаний в общем случае могут не соответствовать как собственным частотам колебаний зданий, так и преобладающим частотам землетрясений. Последнее обстоятельство приводит к тому, что в общем случае отношение максимальных амплитуд колебаний зданий и сооружений к амплитудам подстилающих их грунтов не определяется ни максимальным значением амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) колебаний сооружений, ни значением АЧХ на частоте, соответствующей максимальным амплитудам колебаний грунтов. Это нами подчеркивалось ранее при натурных наблюдениях за колебаниями зданий [5].

По общепринятой методике [1] рассчитаны спектры колебаний. Спектры смещений колебаний скального грунта на частотах, больших 6—8 гц, имеют значения, меньше 10% максимального уровня, чем затрудняется их интерпретация. Кроме того, как показано в работе [5] спектры в низкочастотной области ($f < 1$ гц) значительно искажены и целесообразно представлять спектры скоростей и ускорений, уровни и частоты максимумов которых определяются более надежно.

Предложенная нами ранее [5] эмпирическая формула для отношения амплитуд колебаний зданий и грунтов в зависимости от формы спектров колебаний грунта и АЧХ здания, справедлива для зданий, крутизна АЧХ колебаний которых не ниже 10 дБ/октаву. Нами проверена применимость этой формулы для резонансных сейсмометрических каналов по записям землетрясений с использованием их спектров. Вычисленные и реально зарегистрированные амплитуды колебаний (табл. 2) удовлетворительно совпадают для каналов, имеющих значение крутизны АЧХ колебаний (рис. 1), соответствующее таковой для зданий.

Амплитуды колебаний зданий в этих случаях следует уменьшать на величину отношения максимальных значений АЧХ резонансных каналов и зданий.

Таблица 2

Расчетные и истинные отношения амплитуд колебаний				
$f, \text{гц}$	0,5	1	2	5
$\frac{A_{\text{рез}}}{A_{\text{гр}}}$ ист.	1,15	0,456	0,41	0,023
$\frac{A_{\text{рез}}}{A_{\text{гр}}}$ расч.	0,89	0,762	0,32	0,154
%	23	67	22	570

Как уже отмечалось ранее, для исследования вопроса о наличии низкочастотных составляющих колебаний грунтов при землетрясениях проводилась параллельная регистрация колебаний обычным сейсмометрическим каналом (ВЭГИК) и широкополосным (СКД). Спектры записей приведены на рис. 3в. Удовлетворительное совпадение этих спектров в низкочастотной области свидетельствует о том, что на далеких эпицентральных расстояниях в спектрах колебаний мерзлых грунтов нет низкочастотных составляющих порядка 0,2—0,1 гц с амплитудами, имеющими значимые величины. Поскольку амплитудно-частотная характеристика колебаний мерзлого грунта, как отмечается ниже, имеет невысокий уровень и максимумы на частотах более 1 гц, то и в спектрах колебаний скальных грунтов не содержится низкочастотных составляющих порядка 0,1 гц.

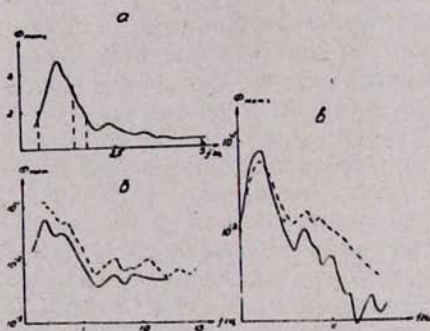


Рис. 3. Спектры скоростей и смещений землетрясения 23. 09. 76 г., зарегистрированного различными приборами,

а спектр Фурье и линейчатый спектр, полученный по резонансным каналам;

б спектр скорости, полученный по велограмме (сплошная линия), и спектр скорости (пунктирная линия), рассчитанный по сейсмограмме;

в спектры смещений, полученные по сейсмограммам с использованием приборов ВЭГИК (сплошная линия) и СКД (пунктирная линия).

Существенным при оценке частотного анализа колебаний грунтов и сооружений является вопрос о надежности определения АЧХ по отношениям спектров входного и выходного сигнала. По спектрам широкополосного канала ВЭГИК и резонансных каналов определены эмпирические АЧХ резонансных каналов. Расчетные и эмпирические АЧХ в области значимых частот показали удовлетворительное совпадение (рис. 1), что свидетельствует о корректности способа определения АЧХ с использованием реальных спектров, как и совпадении линейчатых спектров колебаний по резонансным каналам с широкополосным спектром (рис. 3,а). При этом ввиду того, что модули значений спектров Фурье пропорциональны не амплитудам слагающих гармоник, а спектральным плотностям ($\Phi = \frac{dA}{d\omega}$) [6], сравнение спектра широкополосного канала проводилось со спектрами (их максимальными значениями) резонансных каналов.

Спектры скоростей колебаний, полученные расчетом по спектрам смещений, удовлетворительно согласуются со спектрами, определенными по велосиграммам (рис. 3,б), что свидетельствует о правомерности такого пересчета для спектров записей, полученных с использованием аппаратуры, аналогичной примененной.

Спектры скоростей колебаний скального грунта (рис. 4) имеют максимальные значения на частотах 1—2 гц, для спектров скоростей колебаний рыхлого мерзлого грунта характерно наличие максимумов на тех же частотах. Расчетные спектры ускорений (рис. 4) колебаний скального и мерзлого валунно-галечникового грунтов имеют два сравнимых по величине максимума на частотах (1—2 и 8—10 гц).

На рис. 4,в приведена амплитудно-частотная характеристика колебаний валунно-галечникового грунта (т. н. 3), полученная по отношению спектров колебаний одноименных кинематических элементов. Ее максимальное значение (~ 3) относится к частотам 1,5; 6,5 гц.

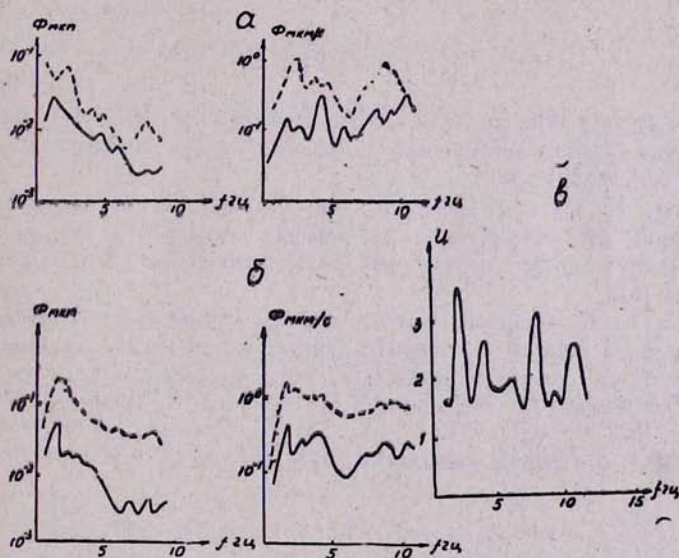


Рис. 4. Спектры скоростей и ускорений колебаний скального (а) и мерзлого (б) грунтов. АЧХ колебаний мерзлого грунта (в). Сплошные линии—спектры землетрясений 1, 2; пунктирные—спектры землетрясений 3, 4

Реально наблюдаемые отношения максимальных амплитуд смещений колебаний двух рассматриваемых грунтов несколько меньше 2-х и могут быть равны максимальному значению АЧХ валунно-галечникового грунта в случае совпадения частот максимумов спектров колебаний скального грунта и АЧХ рыхлого грунта.

Результаты анализа экспериментального материала, относящиеся к сейсмической опасности зданий и сооружений, показывают практическую возможность прогноза амплитудного уровня их колебаний в конкретных грунтовых условиях. Амплитуды колебаний по различным кинематическим элементам однотипных сооружений в разных грунтовых условиях будут различаться между собой неодинаково. При одних и тех же сейсмических воздействиях продолжительность колебаний разных сооружений будет не одинакова. Это может приводить в конечном итоге к несоответствию одних только амплитуд колебаний сооружений остаточным деформациям в их элементах при равных прочностях.

К сожалению, из-за малого объема полученного экспериментального материала не удалось провести анализ амплитудно-частотного состава колебаний сооружений, продолжительности колебаний, соотношения амплитуд колебаний от интенсивности землетрясений, их эпицентрального расстояния, механизмов очагов и других факторов. Необходимо дальнейшее продолжение натурных наблюдений в этом направлении.

Применение в дальнейшем для регистрации землетрясений в различных грунтовых условиях для целей сейсмического микрорайонирования автоматической сейсмической станции «Обь-автомат», оснащенной анализатором колебаний, позволит наряду с основной целью проводить изучение спектральных составляющих колебаний для целей прогноза амплитудно-частотного состава колебаний определенных типов зданий.

Институт Земной коры и атмосферы
СО АН СССР

ЛИТЕРАТУРА

1. Грудева Н. Г., Малиновская Л. Н., Наймарк Б. Н. Приближенное вычисление спектров сейсмических колебаний. Сб. Вычислительная сейсмология, вып. 3, М., «Наука», 1967.
2. Дараган С. К., Султанов Д. Д., Недошвили Н. И. Применение общего сейсмометра для одновременной регистрации перемещения, скорости и ускорения движения почвы при взрывах. Сб. Сейсмические приборы, вып. 8, М., «Наука», 1975.
3. Медведев С. В. Инженерная сейсмология. Госстройиздат, М., 1962.
4. Назаров А. Г. Метод инженерного анализа сейсмических сил. Ереван, 1956.
5. Потапов В. А. Анализ спектральных закономерностей совместных колебаний грунтов и зданий при сейсмических воздействиях в Прибайкалье. Автореф. дисс. М., 1978.
6. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М., 1962.