



Е. Е. ХАЧИЯН

**академик НАН РА, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Строительная механика»**

Л. А. ЛЕВОНЯН

кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика»

Национальный университет архитектуры и строительства Армении

УДК 550.34, 624

МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ СЕЙСМОГРАММ И АКСЕЛЕРОГРАММ РАЗЛИЧНЫХ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ПРИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

Рассматриваются вопросы прогнозирования величин перемещений и ускорений сильных движений грунта при предположении землетрясения как мгновенного механического разрыва земной поверхности. Основываясь на современных представлениях о процессе возникновения землетрясений, предпринята попытка развить упрощенные теоретические методы, необходимые для количественного прогнозирования параметров движения грунта при сильных землетрясениях. В качестве примера рассматривается случай землетрясения, которое возникает вследствие движения внезапно вспарываемых блоков относительно друг друга в горизонтальном направлении с определенной начальной скоростью. Установлена эмпирическая зависимость между скоростью движения частиц грунта у разрыва и на определенном расстоянии от него и магнитудой землетрясения. Принимается, что при мгновенном разрыве среды влиянием инерционных перемещений пород глубинных слоев на инерционные перемещения пород верхних приповерхностных слоев можно пренебречь.

Решением волновой задачи для многослойной приповерхностной толщи получены аналитические выражения для сейсмограммы и акселерограммы грунта на поверхности земли в зависимости от физико-механических и динамических характеристик пород всех слоев толщи, коэффициентов затухания механических колебаний пород, расстояния до разрыва и магнитуды прогнозируемого землетрясения.

Полученные результаты позволяют установить не только максимальные значения перемещений и ускорений грунта с учетом локальных грунтовых условий, но и их изменения во времени и величины преобладающих периодов колебаний грунта. Метод проиллюстрирован для скального и рыхлого грунтовых оснований. На основании полученных результатов разработана методика определения синтетических акселерограмм грунтов прогнозируемых сильных землетрясений с магнитудой $M \geq 6.0$ для различных по сейсмическим свойствам строительных площадок с преобладающим периодом T_{01} от 0.1 сек. до 2 сек. Метод проиллюстрирован для скальных и рыхлых грунтовых оснований, при магнитудах $6.0 \leq M \leq 9.0$ (см таблицы 3 и 4 и рис. 3 и 4). Даны количественные оценки влияния высших форм колебаний основания на величины перемещений и ускорений. Показано, что они в 2.53 раза увеличивают ускорения грунтов вычисленные только по первой форме, а на перемещении всего 1.1 раза. При изменении магнитуды прогнозируемого землетрясения всего на одну единицу перемещения и ускорения грунтов изменяются в 2.72 раза. Перемещения и ускорения грунтов при землетрясениях с магнитудой $M=6.0$ в 20 раз меньше, чем при землетрясениях с магнитудой $M=9.0$. Перемещения и ускорения твердых и рыхлых грунтов на расстоянии $\Delta=15$ км примерно в 2 раза меньше чем у разрыва ($\Delta=0$) независимо от магнитуды землетрясения. Ускорения твердых грунтов уже

при магнитудах $M \geq 7.0$ могут достигнуть $1g$, а на рыхлых грунтах – только при $M \geq 8.0$.

Ключевые слова: землетрясение, мгновенный разрыв, начальная скорость, многослойная толща, волновая задача, преобладающие периоды, сейсмограмма, акселерограмма.

1. Введение

Одна из основных задач сейсмологии и сейсмостойкости сооружений – выявление характерных закономерностей колебаний грунтов (строительных площадок), их амплитудно-частотных характеристик и установление прогнозируемых нормативных величин перемещений и ускорений различных грунтов при сильных землетрясениях для расчета на сейсмические воздействия зданий и сооружений.

Учитывая отсутствие достаточного количества реальных записей сильных землетрясений для большинства сейсмоактивных территорий земли, позволяющих провести полноценный статистический их анализ для конкретных строительных площадок, задача изыскания путей искусственного конструирования сейсмограмм и акселерограмм сильных движений грунта, адекватно отражающих свойства реально зарегистрированных событий, представляет определенный теоретический и практический интерес. По современным представлениям землетрясение является следствием механического разрыва – вспарывания среды из-за соприкосновения двух геологических блоков (плит) с шероховатыми краями при их длительном медленном движении в противоположных направлениях. До землетрясения в некоторой области соприкосновения движущихся блоков возникают непрерывно растущие механические сдвиговые напряжения и деформации с накоплением огромного количества потенциальной энергии деформации. Когда напряжения и деформации достигают своих предельных значений происходит разрыв (землетрясение), накопленная потенциальная энергия быстро превращается в кинетическую энергию сейсмических волн, распространяющихся по всей земле. На поверхности земли сейсмические волны вызывают повсеместные механические колебания частиц грунтов, запись которых в виде сейсмограмм и акселерограмм позволяет оценить магнитуду и интенсивность землетрясения.

2. Цели, задачи, исходные параметры

Согласно исследованиям Дж. Н. Бруна [1] в прочных породах ближней зоны при мгновенном разрыве (землетрясении) возможны ускорения грунтов, превышающие $1g$ и скорости превышающие 100 см/с. Верхний предел начальной скорости частиц грунта, по его утверждению, для большей части сильных землетрясений достигнет 150 см/с. Исходя из этих выводов, с точки зрения практического применения, возникает задача: как определить значения начальной скорости колебания частиц грунтов у разрыва и на определенном расстоянии Δ для землетрясений с заданной магнитудой M . Если принимать, что значения начальной скорости частиц грунта, равные $v_{\max} = v_{\text{раз}} = 100$ см/с, указанные выше Дж. Н. Бруном, соот-

ветствует случаю сильного землетрясения с магнитудой $M = 8.5$, и учитывать, что согласно А. Эстевой [2] зарегистрированные значения максимальной скорости частиц грунта пропорциональны e^M , где M магнитуда землетрясения, значения $v_{\max} = v_{\text{раз}}$ в первом приближении при других магнитудах $6.0 \leq M \leq 9.0$, можно представить в следующем виде:

$$v_{\max} = 100 e^{M-8.5} \text{ см/с.} \quad (1)$$

Согласно формуле (1) при $M = 8.5$ действительно имеем $v_{\max} = 100$ см/с. В работе [2] отмечается, что «Статическое поле смещений, которые определяет двойной диполь без момента, уменьшается с расстоянием пропорционально Δ^{-2} », поэтому зависимость максимального значения v_{\max} от расстояния до разрыва Δ , можно представить в виде:

$$v(\Delta) = v_{\max} \left(1 - \frac{\Delta^2}{R^2} \right). \quad (2)$$

В формуле (2) R – это протяженность области в перпендикулярном к разрыву направлении, принимаемой существенно деформированной в процессе подготовки землетрясения.

Деформации среды вне $\Delta \geq R$ областях считаются малыми и пренебрежимыми по сравнению с деформацией у разрыва. Значения R (в метрах) принимается по формуле [4]:

$$R = 5(\bar{u} + 3) \cdot 10^3, \quad (3)$$

где \bar{u} (в метрах) значение средней подвижки на поверхности земли после землетрясения [5]. Принимаются, что при землетрясениях с магнитудой $M \geq 6.0$ величина \bar{u} корректируется с магнитудой M по формуле [6]:

$$1g\bar{u} = 0.55M - 3.71. \quad (4)$$

Таким образом, для начальной скорости колебания частиц грунтов у разрыва и на расстоянии Δ от разрыва, для землетрясений с $M \geq 6.0$, ($M=6.0$ минимальных предел магнитуды при котором на поверхности земли происходит расщепление) будем иметь:

$$v(\Delta) = 100 e^{M-8.5} \left(1 - \frac{\Delta^2}{R^2} \right). \quad (5)$$

В таблице 1 приведены вычисленные по формулам (1)-(5) значения \bar{u} (м), R (км), v_{\max} , $v(\Delta)$ (см/с) для различных $\Delta < R$ эпицентральных расстояний в зависимости от магнитуды M землетрясений. В таблице 2 приведены значения скоростей колебания грунта (см/с) в зависимости от интенсивности землетрясения согласно шкале MSK-64. Сравнение табл.1 и табл. 2 показывает, что значения скоростей частиц грунта, вычисленные по формуле (5), сопоставимы с их значениями по шкале MSK-64 для интенсивностей VII-X баллов в эпицентральной зоне, а в территориях вне зоны эпицентра для землетрясений с интенсивностью V-X баллов и магнитуд $6.0 \leq M \leq 8.0$.

На рисунке 1 показаны зависимости $v(\Delta)$ для значений магнитуд $6.0 \leq M \leq 9.0$ по таблице 1 и интенсивности землетрясения по шкале MSK-64, которые по аналогии с зависимостями уменьшения максимального значения ускорений грунта в зависимости от эпицентрального расстояния, можно называть кривыми затухания интенсивности землетрясения.

Таблица 1 — Значения скоростей колебания частиц грунта в см/с в зависимости от магнитуды M и расстояния до разрыва Δ в км

Магнитуда M	Средняя подвижка, \bar{u} , м	Расстояние, R , км	Значение скорости у разрыва $v_{раз}$, см/с, $\Delta=0$	Значения скоростей $v(\Delta)$ колебания частиц грунта в см/с в зависимости от магнитуды M и расстояния до разрыва Δ в км																			
				Значения Δ , км																			
				5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
6.0	0.39	16.90	8.2	7.5	5.3	1.7																	
6.25	0.54	17.70	10.5	9.7	7.1	3.0																	
6.50	0.73	18.60	13.5	12.5	9.6	4.7																	
6.75	1.00	20.00	17.4	16.3	13.1	7.6																	
7.0	1.38	21.90	22.3	21.1	17.7	11.8	3.7																
7.25	1.90	24.50	28.6	27.4	23.8	17.9	9.5																
7.50	2.60	28.00	36.8	35.6	32.1	26.2	18.0	7.5															
7.75	3.57	32.80	47.2	46.1	42.8	37.3	29.7	19.8	7.7														
8.0	4.90	39.50	60.6	59.6	56.7	51.9	45.1	36.3	25.6	13.0													
8.25	6.73	48.60	77.9	77.1	74.6	70.5	64.7	57.3	48.2	37.5	25.1	11.1											
8.50	9.23	61.10	100	99.3	97.3	94.0	89.3	83.3	75.9	67.2	57.1	45.8	33.0	19.0	3.6								
8.75	12.68	78.40	128.4	127.9	126.3	123.7	120.0	115.3	109.6	102.8	95.0	86.1	76.2	65.2	53.2	40.1	26.0	10.9					
9.0	17.38	102.00	164.9	164.5	163.3	161.3	158.6	155.0	150.6	145.5	139.5	132.8	125.3	117.0	107.8	97.9	87.2	75.7	63.5	50.4	36.5	21.9	6.4

3. Влияние не мгновенности разрыва

При не мгновенном разрушении начальное значение скорости частиц грунта согласно Дж. Бруну [1] можно представить в виде:

$$v = v_{мг} e^{-t/\Delta t}, \tag{6}$$

где $v_{мг}$ рассмотренное выше значение начальной скорости при мгновенном разрушении среды, Δt – время полного разрушения, включая время вспарывания, которое выражается формулой

$$\Delta t = \frac{L/2}{v_s}, \tag{7}$$

где L – длина разрыва, v_s – скорость поперечной волны. Продолжительность разрушения может длиться до десятка секунд. Вспарывание начинается в последней стадии полного разрушения, когда остается еще неразрушенной небольшая часть (несколько десятков – сотен метров) линии

разрыва. До этого момента динамический эффект землетрясения – генерирование инерционных перемещений (сил) в грунте еще не проявляется. Последняя стадия разрушения (начало землетрясения) – вспарывание, по мнению авторов [1,2], происходит со сверхзвуковой скоростью и длится доли секунды, в пределах $t=0.1 \div 0.3$ с (в зависимости от магнитуды и прочности пород). Поэтому по формуле (7), например, будем иметь:

при $M=7.0$, $L=30$ км, $v_s=4000$ м/с, $\Delta t = \frac{15 \cdot 1000}{4000} = 3.75$ с,

при $M=8.0$, $L=80$ км, $v_s=4000$ м/с, $\Delta t = \frac{40 \cdot 1000}{4000} = 10$ с.

Принимая длительность вспарывания соответственно $t=0.1$ с и $t=0.3$ с, по формуле (6) получено:

$$v = e^{-\frac{0.1}{3.75}} v_{мг} = 0.973 v_{мг}, \text{ в случае } M=7.0$$

$$v = e^{-\frac{0.3}{10}} v_{мг} = 0.970 v_{мг}, \text{ в случае } M=8.0$$

Таблица 2 — Значения скоростей колебания частиц грунта в зависимости от интенсивности землетрясения по шкале MSK-64

Интенсивность в баллах	V	VI	VII	VIII	IX	X
Скорость колебания частиц грунта, в см/с	1÷2	2.1÷4	4.1÷8	8.1÷16	16.1÷32	32.1÷64

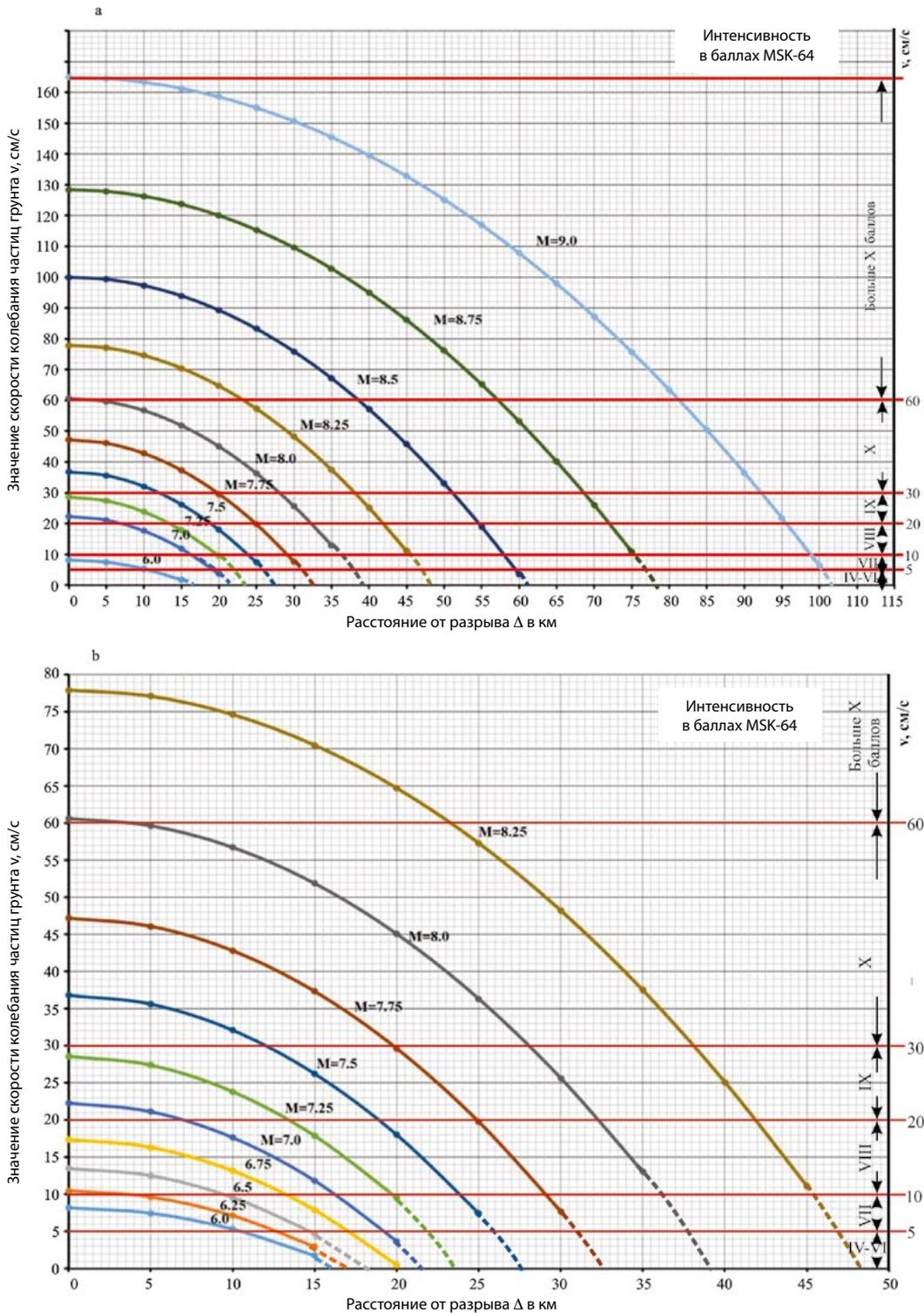


Рисунок 1 — Зависимости скоростей колебания частиц грунта от эпицентрального расстояния Δ и интенсивности по шкале MSK-64, для различных магнитуд: а – для магнитуд $6.0 \leq M \leq 9.0$, б – для магнитуд $6.0 \leq M \leq 8.25$

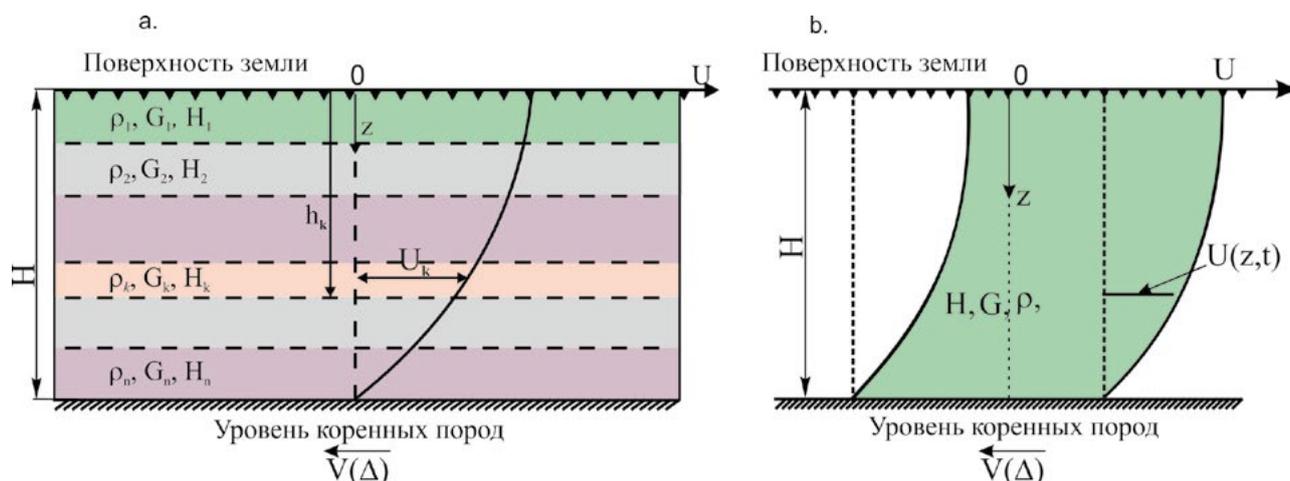


Рисунок 2 — Схематическое изображение деформированной среды на расстоянии Δ после образования разрыва – землетрясения

Как видим, не мгновенность разрыва приводит к незначительному уменьшению начальной скорости колебания частиц грунта и, следовательно, к такому же смягчению эффекта землетрясения на поверхности земли.

4. Синтетические сейсмограммы и акселерограммы грунта

На основании выше полученных результатов, для произвольного вертикального разреза грунтовой толщи (литологической колонки), показаны на рис 2а, где Н – общая мощность приповерхностной толщи, $v(\Delta)$ – начальная скорость движения блоков на расстоянии Δ от разрыва, ρ_k, G_k, H_k – плотность, модуль сдвига и мощность k-ого слоя, функции перемещения слоев $U_k(z,t)$, ($k=1 \dots n$), в перпендикулярном к разрыву направлении, будут удовлетворять волновым уравнениям [7]:

$$G_k \frac{\partial^2 U_k}{\partial z^2} - \rho_k \frac{\partial^2 U_k}{\partial t^2} + \eta_k \frac{\partial^3 U_k}{\partial z^2 \partial t} = 0, \quad (8)$$

$k = 1, 2, \dots, n$

со следующими начальными и граничными условиями.

Начальные условия задачи:

$$\begin{aligned} \text{при } t = 0 \quad U_k(z, 0) &= 0 \\ \text{при } t = 0 \quad \frac{\partial U_k(z, 0)}{\partial t} &= v(\Delta). \end{aligned} \quad (9)$$

$k = 1, 2, \dots, n$

Граничные условия задачи будут:

$$\begin{aligned} \text{при } z = 0 \quad \frac{\partial U_1(0, t)}{\partial z} &= 0, \\ \text{при } z = H \quad U_n(H, t) &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

2n-2 условия **непрерывности перемещений и касательных напряжений** на уровнях раздела слоев будут:

$$\begin{aligned} U_k(h_k, t) &= U_{k+1}(h_k, t) \\ G_k \frac{\partial U_k(h_k, t)}{\partial z} &= G_{k+1} \frac{\partial U_{k+1}(h_k, t)}{\partial z}, \end{aligned} \quad (11)$$

$k = 1, 2, 3, \dots, n - 1$

В работе [7] представляя решения задач (8) в виде

$$U_k(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} U_{ki}(z) q_i(t), \quad (12)$$

$k = 1, 2, 3, \dots, n$

где $U_{ki}(z)$ – функция только от координаты z, а $q_i(t)$ – функция только от времени t. Путем решения системы уравнений (8) с учетом условий (9)-(12), в работе [7] получены следующие выражения для перемещений (сейсмограмма) и ускорений (акселерограммы с учетом сравнительной малости величины коэффициента затухания) колебаний частиц грунта:

$$\begin{aligned} U_k(z, t) &= v(\Delta) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{U_{ki}(z)}{P_i} \delta_i e^{-n_i t} \sin p_i t \\ U_k''(z, t) &= v(\Delta) \sum_{i=1}^n U_{ki}(z) p_i \delta_i e^{-n_i t} \sin p_i t, \end{aligned} \quad (13)$$

$k = 1, 2, \dots, n,$

где:

$$\delta_i = \frac{\sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \rho_k U_{ki}(z) dz}{\sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \rho_k U_{ki}^2(z) dz} \quad (14)$$

$$h_k = \sum_{i=0}^k H_i, \quad h_0 = 0, \quad h_1 = H_1, \quad h_n = H.$$

Способ определения функций $U_{ki}(z)$ и значения преобладающих периодов T_{oi} ($i = 1, 2, \dots, n$) приведены в работе [8].

Для самой простой однослойной толщи с параметрами G, ρ, H (рис. 2 b) задача существенно упрощается:

$$U(z, t) = U_1(z, t) \quad 0 \leq z \leq H. \quad (15)$$

Удовлетворяя граничным и начальным условиям (7) и (9) для однослойной толщи будем иметь:



Таблица 3 — Максимальные значения перемещений U_{\max} и ускорений U''_{\max} грунта при магнитуде $M=7.0$ и на расстоянии $\Delta=15$ км, в зависимости от преобладающего периода основания T_{01} в сек

Преобладающий период колебаний основания T_{01} , сек	Декремент затухания грунта Φ	Категория основания по сейсмическим свойствам согласно [9]	С учетом трех форм колебаний			С учетом только первой формы колебания, при $t=T_{01}/4$, с		Отношения перемещений и ускорений с учетом трех форм колебаний к их значениям только по первой форме	
			Время достижения максимума t , с	Максимальное перемещение грунта, U_{\max} , см	Максимальное ускорение грунта, U''_{\max} в долях g	U_{\max} , см	U''_{\max} , в долях g	Для перемещений	Для ускорений
0.1	0.3	I	0.02	0.23	1.34	0.22	0.90	1.0	1.5
0.15	0.3	I	0.04	0.37	1.45	0.33	0.60	1.1	2.4
0.25	0.3	I	0.06	0.63	0.92	0.56	0.36	1.1	2.6
0.3	0.3	II	0.08	0.74	0.72	0.67	0.30	1.1	2.4
0.35	0.3	II	0.08	0.87	0.61	0.78	0.26	1.1	2.4
0.4	0.3	II	0.1	1.0	0.58	0.89	0.22	1.1	2.6
0.45	0.2	II	0.12	1.14	0.52	1.03	0.20	1.1	2.5
0.6	0.2	III	0.15	1.6	0.42	1.37	0.15	1.2	2.7
0.7	0.2	III	0.18	1.8	0.35	1.60	0.13	1.1	2.7
0.8	0.2	III	0.21	2.04	0.30	1.83	0.12	1.1	2.6
1	0.2	IV	0.24	2.56	0.25	2.28	0.09	1.1	2.7
1.2	0.2	IV	0.3	3.1	0.21	2.74	0.08	1.1	2.7
1.4	0.2	IV	0.36	3.61	0.18	3.20	0.07	1.1	2.7
1.7	0.2	IV	0.42	4.4	0.15	3.88	0.05	1.1	2.7
2	0.2	IV	0.48	5.16	0.12	4.57	0.05	1.1	2.7

$$U_i(z) = \cos \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} z,$$

$$p_i = \frac{2\pi}{T_{0i}} = \frac{2i-1}{2H} \pi \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \frac{2i-1}{2H} \pi v_s, \quad i = 1, 2, \dots$$

$$\delta_i = \frac{\int_0^H \cos \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} z dz}{\int_0^H \cos^2 \frac{2i-1}{2} \frac{\pi}{H} z dz} = \frac{4(-1)^{i+1}}{(2i-1)\pi}$$

где: T_{0i} – преобладающий период i -ой формы свободных колебаний однородного основания высотой H , G -модуль упругости слоя, ρ – плотность слоя, $v_s = \sqrt{G/\rho}$ – скорость распространения волн сдвига в слое.

Общее решение задачи (13) в этом случае для перемещений и ускорений частиц грунта на поверхности земли $Z = 0$, будет:

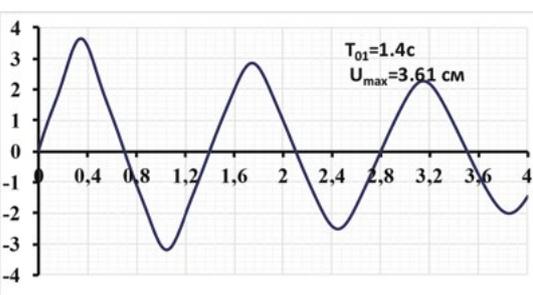
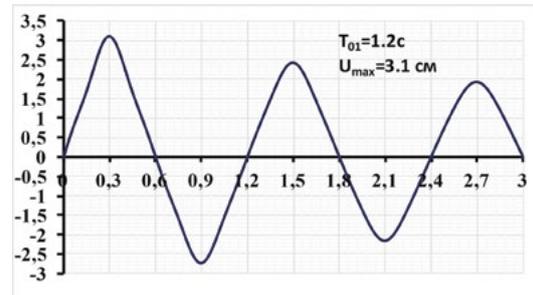
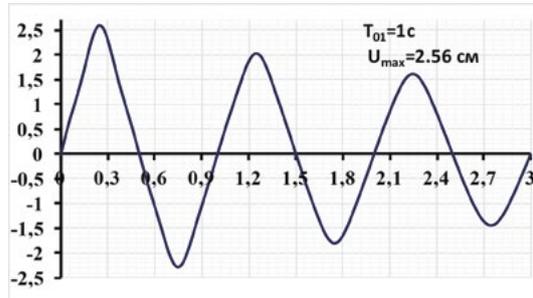
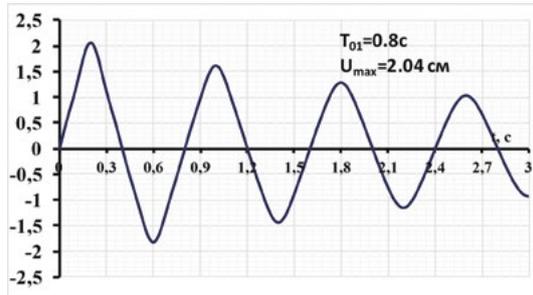
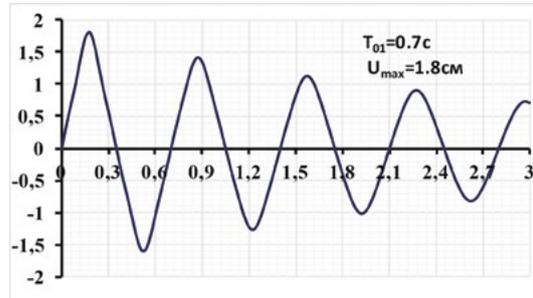
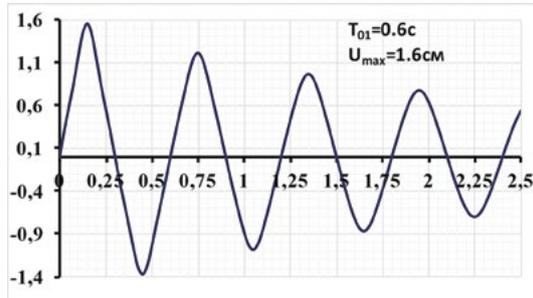
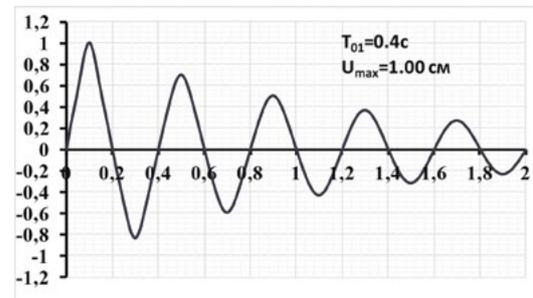
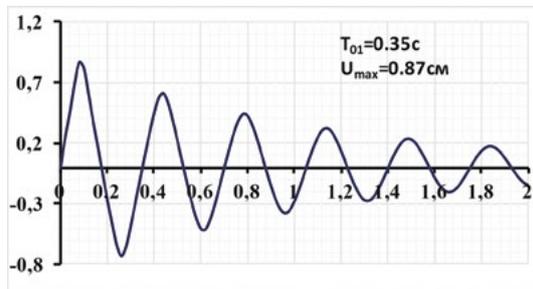
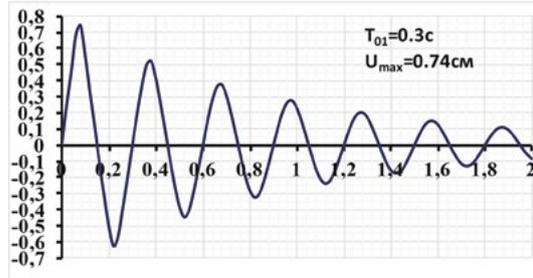
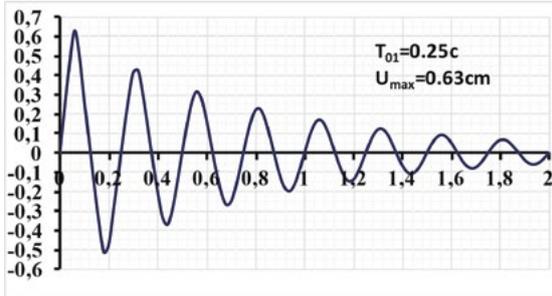
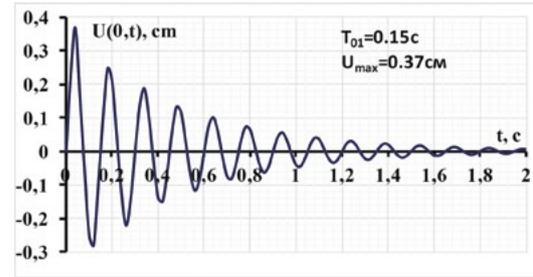
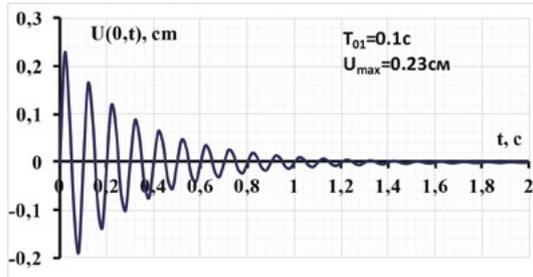
$$U(0, t) = 100e^{M-8.5} \left(1 - \frac{\Delta^2}{R^2} \right) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{T_{0i}}{2\pi} \delta_i e^{-\frac{\theta_i t}{T_{0i}}} \sin \frac{2\pi}{T_{0i}} t$$

$$U''(0, t) = 100e^{M-8.5} \left(1 - \frac{\Delta^2}{R^2} \right) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\pi}{T_{0i}} \delta_i e^{-\frac{\theta_i t}{T_{0i}}} \sin \frac{2\pi}{T_{0i}} t$$

где: θ_i – коэффициент поглощения энергии по i -ой форме колебания толщи грунта.

5. Применение предложенного метода прогнозирования параметров колебания движения на поверхности земли

В качестве примеров вычислим сейсмограммы $U(t)$ и акселерограммы $U''(t)$ основания для грунтов I-IV категорий по



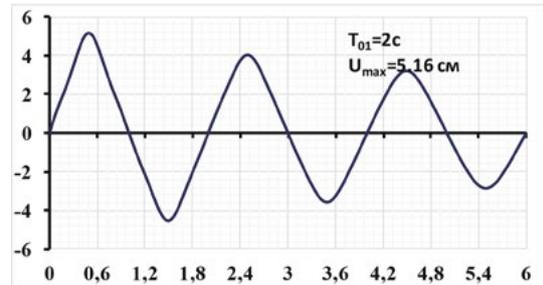
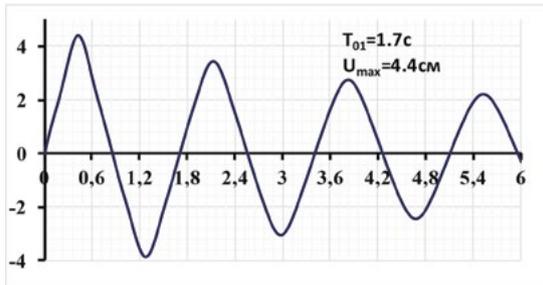


Рисунок 3 — Синтетические сейсмограммы колебаний различных оснований (грунтов), при $M=7$, $\Delta=15$ км

сейсмическим свойствам с преобладающими периодами T_{0i} от 0.1 сек до 2.0 сек, согласно нормам сейсмостойкого строительства Республики Армения [9]. Сводные величины максимальных значений U_{max} и U''_{max} по формулам (17) с учетом трех форм колебаний и только по первой форме при $M=7.0$, $\Delta=15$ км, $R=21.9$ км, приведены в таблице 3. Соответствующие искусственные сейсмограммы и акселерограммы приведены на рис. 3 и 4.

Для однородного поверхностного слоя, как видно из (16), величины периодов колебаний T_{0i} отличаются в 3 и 5 раза, поэтому моменты времени наступления максимальных амплитуд отдельных членов рядов (17) во времени и по направлению (знаки δ_i) совпадают. Это приводит к значительному росту суммарной величины рядов особенно для ускорений $U''(t)$. Графически это показано на рис. 5 для ускорения $U''(t)$, вычисленного по формуле (17) по первой, второй и третьей формам колебания в отдельности и при их совместном действии (суперпозиции) для случая $T_{01}=0.25$ с. при тех же исходных параметрах: $M=7.0$, $\Delta=15$ км, $\Theta_1=\Theta_2=\Theta_3=0.3$.

Как видно из данных таблицы 3 и рис.3 и 4 для твердых грунтов ($T_{01}<0.45$ сек.) и рыхлых грунтов ($T_{01}>0.45$ сек.), учет высших форм колебаний основания приводит к увеличению максимальных значений ускорений на поверхности, вычисленных только по первой форме колебания, в среднем на 2.53 раза, а для максимальных значений перемещений грунта всего в 1.1 раза. При этом продолжительность интенсивных колебаний на рыхлых грунтах в 1.5 раза больше, чем на твердых грунтах. Одна из причин этого явления заключается в том, что перемещения прямо зависят от периодов T_{0i} , а ускорения – обратно пропорциональны T_{0i} . Кроме того для твердых грунтов ($T_{01}=0.25$ сек.) периоды второй и третьей форм колебаний согласно формуле (16) равны: $T_{02}=0.083$ с., $T_{03}=0.05$ с. Как видим, они очень высокочастотные по сравнению с их значениями для рыхлых грунтов. Возникновение таких высокочастотных колебаний на поверхности земли многими специалистами считается маловероятным и не представляющим опасность для большинства надземных сооружений. Поэтому, по-видимому, их учет в формулах (17) для скальных грунтов с периодами T_{02} и T_{03} меньше чем на 0.1 с., можно считать нереальным, т. е. за расчетную величину ускорения твердого грунта, можно принимать с учетом только первой формы колебаний. Для рассмотренного примера оно будет равно 0.66g.

Отметим еще одно обстоятельство в пользу такого вывода. Значения коэффициентов внутреннего трения n_2 и n_3 для второй и третьей форм колебаний (из-за отсутствия

экспериментальных исследований, касающихся процессов внутреннего трения по высшим формам поперечных колебаний горных пород), были приняты как для первой формы, что также может привести к большим погрешностям. В литературе имеются мнения, что если даже такие высокочастотные колебания на поверхности земли возникают, то они очень быстро затухают и могут оказывать какое-то влияние на формирование суммарной акселерограммы грунта только в узкой очаговой зоне землетрясения.

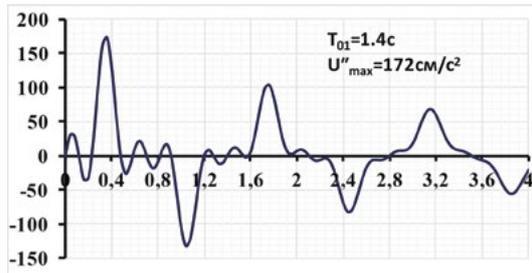
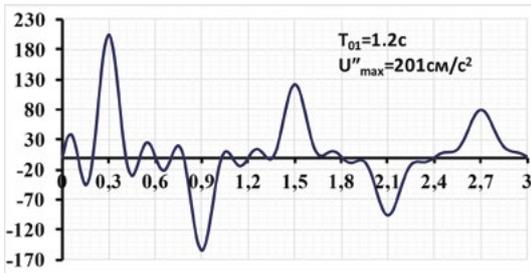
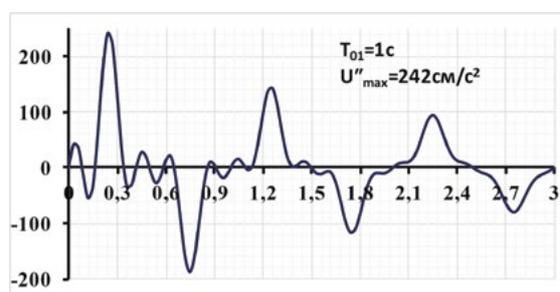
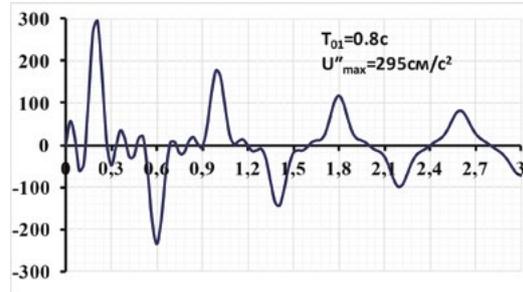
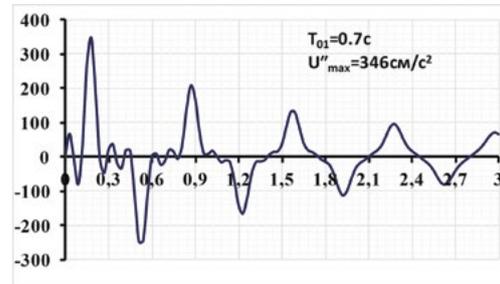
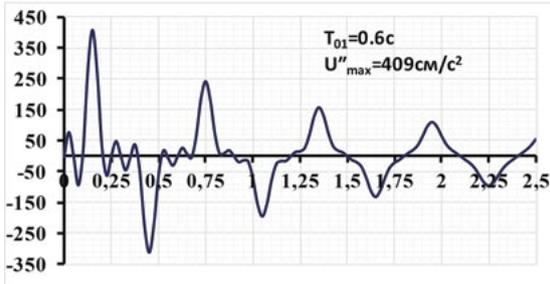
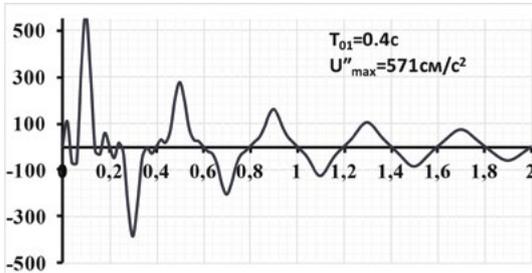
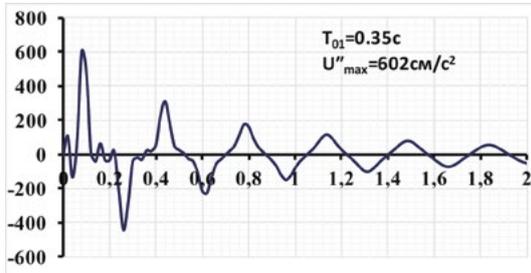
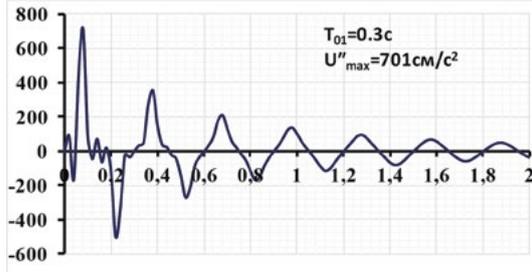
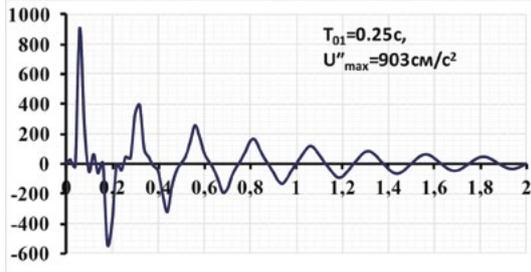
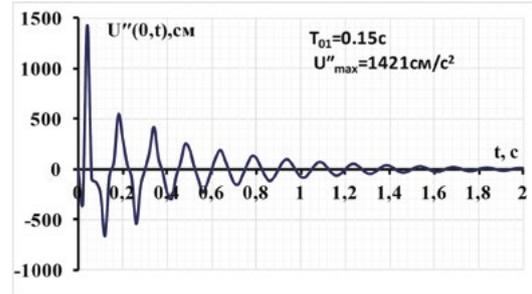
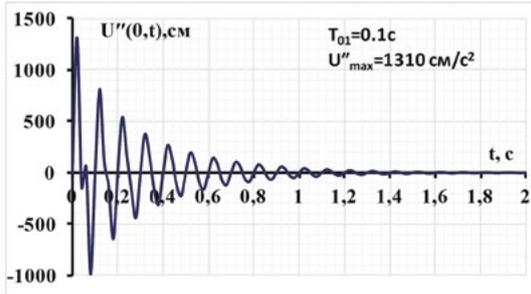
Перемещения и ускорения грунтов в эпицентральной зоне

В Таблице 4 приведены максимальные значения перемещений и ускорений твердых и рыхлых грунтов у разрыва $\Delta=0$ и на расстоянии $\Delta=15$ км от разрыва в зависимости от магнитуды землетрясения M . Из Таблицы 4 видно, что у разрыва (в эпицентральной зоне) значения ускорений твердых грунтов уже при магнитудах $M \geq 7.0$ могут достигнуть одного g , а при рыхлых грунтах – только при магнитудах $M \geq 8.0$. При предельной магнитуде сильного землетрясения $M=9.0$ значения ускорений твердых грунтов могут достигнуть до $8g$, а при рыхлых грунтах ускорения могут достигнуть $2g$.

Из таблицы 4 также видно, что величины перемещений и ускорений твердых и рыхлых грунтов на расстоянии $\Delta=15$ км, примерно в два раза меньше, чем у разрыва независимо от магнитуды землетрясения. При увеличении магнитуды землетрясения на одну единицу, величины перемещений и ускорений грунтов возрастают в 2.73 раза. Перемещения и ускорения грунтов при землетрясении с магнитудой $M=6.0$ в 20 раз меньше, чем при землетрясении с магнитудой $M=9.0$.

Основные результаты

- В статье разработана методика прогнозирования величин перемещений и ускорений сильных движений грунта при предположении землетрясения как мгновенного разрыва земной поверхности.
- На основании анализа работ [Брун, Ломниц, Сингх, Касахара, Хачиян, Эстева, Wells, Coppersmith] начальное значение скорости испаривания блоков v в зависимости от магнитуды прогнозируемого землетрясения M и расстояние Δ от разрыва до точки наблюдения предлагается определить по формулам (1), (2) и по Таблице 1.
- Показано, что не мгновенность разрыва приводит к незначительному уменьшению начальной скорости колебания частиц грунта и, следовательно, к такому же смяг-



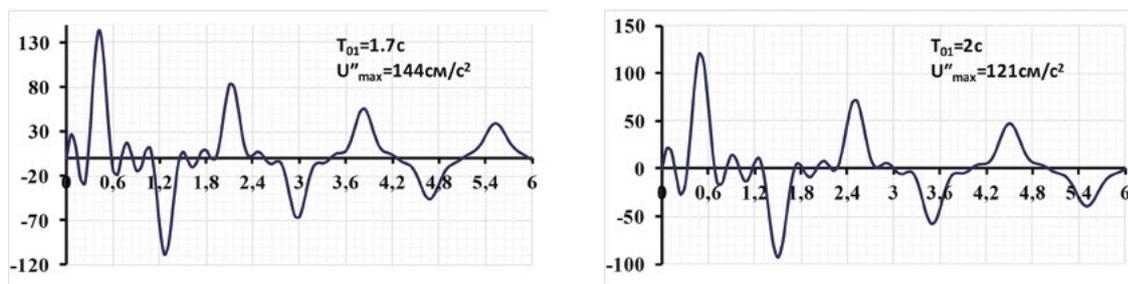


Рисунок 4 — Синтетические акселерограммы колебаний различных оснований (грунтов) при $M=7.0$, $\Delta=15$ км

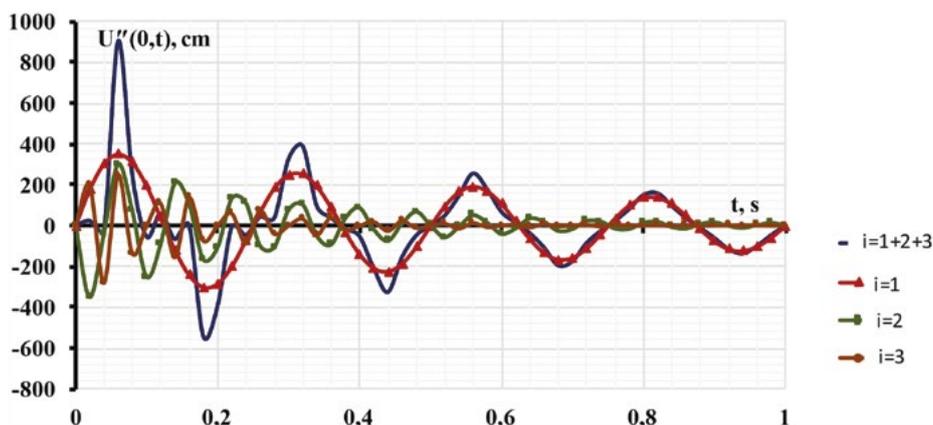


Рисунок 5 — Акселерограммы грунта с $T_{01}=0.25$ сек с учетом суперпозиции первых трех форм колебаний основания согласно формуле (17) и по первой, второй и третьей формам колебания в отдельности

Таблица 4 — Максимальные значения перемещений и ускорений твердых и рыхлых грунтов у разрыва $\Delta=0$ и на расстоянии $\Delta=15$ км в зависимости от магнитуды землетрясения

Магнитуда землетрясения, М	Максимальное перемещение и ускорение грунта у разрыва $\Delta=0$ для твердых грунтов $T_{01}=0.4$ с		Максимальное перемещение и ускорение грунта у разрыва $\Delta=0$ для рыхлых грунтов $T_{01}=0.8$ с		Максимальное перемещение и ускорение грунта на расстоянии $\Delta=15$ км для твердых грунтов $T_{01}=0.4$ с		Максимальное перемещение и ускорение грунта на расстоянии $\Delta=15$ км для рыхлых грунтов $T_{01}=0.8$ с	
	U_{max} см	U''_{max} , в долях g	U_{max} см	U''_{max} , в долях g	U_{max} см	U''_{max} , в долях g	U_{max} см	U''_{max} , в долях g
6.0	0.69	0.40	1.42	0.20	0.37	0.21	0.75	0.11
6.5	1.15	0.66	2.34	0.33	0.61	0.35	1.24	0.17
7.0	1.89	1.08	3.86	0.54	1.00	0.58	2.05	0.29
7.5	3.11	1.79	6.37	0.89	1.65	0.95	3.38	0.47
8.0	5.13	2.95	10.50	1.47	2.72	1.56	5.58	0.78
8.5	8.46	4.86	17.32	2.43	4.49	2.58	9.19	1.29
9.0	13.95	8.01	28.55	4.01	7.41	4.25	15.16	2.13

чению эффекта землетрясения на поверхности земли.

- Значения скоростей и интенсивностей землетрясений, установленные по разработанной методике, сравнены с интенсивностями, устанавливаемыми на основе сейсмической шкалы MSK-64, показывающими достаточную корреляцию для землетрясений с интенсивностью V-X баллов и магнитудами $6.0 \leq M \leq 8.0$ (рис.1).
- Построены зависимости $v(\Delta)$ для значений магнитуд

$6.0 \leq M \leq 9.0$ и интенсивности землетрясения по шкале MSK-64, которые по аналогии с зависимостями уменьшения максимального значения ускорений грунта в зависимости от эпицентрального расстояния, можно назвать кривыми затухания интенсивности землетрясения (рис. 1).

- На рисунках 3 и 4 показаны синтетические сейсмограммы и акселерограммы, построенные по основной фор-

муле (17) для различных грунтовых оснований по сейсмическим свойствам (Таблица 3). Продолжительность интенсивных колебаний на рыхлых грунтах до 3-х раз больше, чем на твердых грунтах.

- Учет высших форм колебаний основания (вторая и третья формы) для твердых и рыхлых грунтов приводит к увеличению максимальных ускорений грунтов, вычисленных только по первой форме колебания, в среднем на 2.53 раза, а для максимальных перемещений грунтов – всего в 1.1 раза.
- Значения ускорений твердых грунтов уже при магнитуде

$M \geq 7.0$ могут достигнуть $1g$, а при рыхлых грунтах только при магнитуде $M \geq 8.0$.

- При увеличении магнитуды землетрясения на одну целую единицу перемещения и ускорения грунтов возрастают в 2.73 раза. Перемещения и ускорения при землетрясении с магнитудой $M=6.0$ в 20 раз меньше, чем при землетрясении $M=9.0$.
- Величины перемещений и ускорений твердых и рыхлых грунтов на расстоянии $\Delta=15$ км от разрыва примерно в 2 раза меньше, чем у разрыва, независимо от магнитуды прогнозируемого землетрясения.

Литература

1. Брун Дж.Н. Физика сильных движений, вызванных землетрясением//Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981. С. 129-161.
 2. Эстева Л. Сейсмичность // Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981. С. 163-203.
 3. Сейсмический риск и инженерные решения. М.: Недра, 1981. 376 с.
 4. Хачиян Э.Е. Об одном упрощенном способе определения величины потенциальной энергии деформации, накопленной в среде перед

сильным землетрясением//Вулканология и сейсмология. 2011. №4. С. 69-80.
 5. Wells D.L. and Coppersmith K.I. New Empirical Relationship among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin the Seismological Society of America, vol.84, N4, pp.974-1002, August, 1994.
 6. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
 7. Хачиян Э.Е. Об одной возможности прогнозирования сейсмограммы и акселерограммы сильных движений грунта при модели землетрясения как мгновенного разрыва земной

поверхности// Вопросы инженерной сейсмологии. 2014. №1. Т. 34. С. 57-71.
 8. Хачиян Э.Е. Прикладная сейсмология. Ереван: Гутунюн, 2008. 518 с.
 9. СНРА II-6.02.2006. Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования. Ереван, 2006. 54 с.
 10. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.

Материалы хранятся по адресу:
 0009, Армения, г. Ереван, ул. Теряна, 105
 Национальный университет
 архитектуры и строительства Армении
 Кафедра строительной механики

KHACHIYAN E., Academician, National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Doctor of Science, Professor, Head, Chair of Structural Analysis, National University of Architecture and Construction of Armenia
LEVONYAN L., Ph.D., Docent, Department of Structural Analysis, National University of Architecture and Construction of Armenia

METHOD OF PREDICTING SYNTHETIC SEISMOGRAMS AND ACCELEROGRAMS OF VARIOUS SOIL BASES IN STRONG EARTHQUAKES

Abstract

Problems of predicting displacement and acceleration values for strong ground motions are considered for the case when an earthquake is assumed as an instantaneous mechanical break of the Earth surface. The purpose of the studies is an attempt to develop, based on the up-to-date concepts of earthquake generation process, simplified theoretical methods for the quantitative prediction of ground motion parameters in strong earthquakes. The case considered as an illustrative example is that of an earthquake originating as a consequence of relative motions of suddenly ruptured blocks in horizontal direction with a given initial velocity. The work established an empirical relationship between the soil particle motion velocity near the rupture, at certain distance from it, on one hand, and the earthquake magnitude, on the other hand. It is assumed that given the instantaneous break of a medium, the impact of inertial motions of deep soil strata on the inertial motions of upper, subsurface soil strata can be neglected. By solving wave task for a multi-layer near-surface stratum, analytical relations were produced for soil seismogram and accelerogram on the Earth surface depending on: the physical-mechanical and dynamic characteristics of soils in all layers of the stratum; attenuation

ratios of mechanical soil vibrations; distance to the rupture; and, magnitude of the predicted earthquake. The obtained results enable establishing not only peak ground displacement and acceleration values with allowance for local soil conditions, but also their changes in time, and, the value of predominant soil vibration periods. The method is illustrated for the rocky and soft soil basements. On the basis of the results obtained (17), a technique for determining soils' synthetic accelerograms of the soils of predicted strong earthquakes with a $M \geq 6.0$ magnitude has been developed for various construction sites of seismic properties with a T_{01} dominant period from 0.1 to 2 sec. The method is illustrated for hard and loose ground bases, with $6.0 \leq M \leq 9.0$ magnitudes (see Tables 3 and 4, and Figures 3 and 4). Quantitative assessments of the base higher forms vibration influence on the values of displacements and accelerations are given. It is shown that these values increase the acceleration of soils 2.53 times when calculated only by the first form, and by movement only 1.1 times. When the magnitude of the predicted earthquake changes by only one unit then displacement and acceleration of soils are changed 2.72 times. The displacement and acceleration of soils during earthquakes of $M = 6.0$ magnitude are 20 times less than for earthquakes with magnitude $M = 9.0$. The displacements and accelerations of solid and loose

soils at a distance $\Delta = 15$ km are approximately 2 times less than for the discontinuity ($\Delta = 0$), regardless of the earthquake magnitude. Accelerations of solid soils running up to $M \geq 7.0$ magnitudes can reach 1g, and on loose soils – only at $M \geq 8.0$.

Keywords: earthquake, instantaneous break, initial velocity, multi-layer stratum, wave task, predominant periods, seismogram, accelerogram.

References

1. Brun J.N. Fizika sil'nyh dvizhenii, vyzvannyh zemletryaseniem [The Physics of Earthquake Strong Motion]//Seismicheskii risk i inzhenernye resheniia. M.: Nedra, 1981. Pp.129-161. (In Russian).
2. Esteva L. Seismichnost'[Seismicity]//Seismicheskii risk i inzhenernye resheniia. M.: Nedra, 1981. Pp.163-203. (In Russian).
3. Seismicheskii risk i inzhenernye resheniia [Seismic Risk and Engineering Decisions]. M.: Nedra, 1981. 376 p. (In Russian).
4. Khachiyan E.E. Ob odnom uproschennom sposobe opredeleniia velichiny potentsial'noy energii deformatsii, nakoplennoi v srede pered sil'nym zemletriaseniem [On a Simple Method for Determining the Potential Strain Energy Stored in the Earth before a Large Earthquake]// Vulkanologiya i seismologiya [Journal of Volcanology and Seismology]. 2011, no. 4, pp.69-80. (In Russian).
5. Wells D.L. and Coppersmith K.I. New Empirical Relationship among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. Bulletin the Seismological Society of America, vol.84, N4, pp.974-1002, August, 1994.
6. Kasahara K. Mekhanika zemletriasenii [Earthquake Mechanics]. M.: Mir, 1985. 264 p. (In Russian).
7. Khachiyan E.E. Ob odnoi vozmozhnosti prognozirovaniia seismogrammy i akselerogrammy silnyh dvizhenii grunta pri modeli zemletriaseniia kak mgnovennogo razryva zemnoi poverhnosti [On the Possibility of Predicting Seismogram and Accelerogram of Strong Motions of the Soil for an Earthquake Model Considered as an Instantaneous Rupture of the Earth's Surface] //Voprosy inzhenernoi seismologii. 2014, no. 1, v. 34, pp. 57-71. (In Russian).
8. Khachiyan E.E. Prikladnaia seismologiya [Applied seismology]. Yerevan: Gitutyun, 2008. 518 p. (In Russian).
9. SNRA II-6.02.2006. Seismostoiroe stroitelstvo. Normy proektirovaniia. Yerevan, 2006. 54 p.
10. Rikitake T. Predskazanie zemletriasenii [Earthquake Prediction]. M.: Mir, 1979. 388 p. (In Russian).

Для цитирования: Хачиян Е.Е., Левонян Л.А. Метод прогнозирования синтетических сейсмограмм и акселерограмм различных грунтовых оснований при сильных землетрясениях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 2. С. 14-25.

For citation: Khachiyan E.E., Levonyan L.A. Method of predicting synthetic seismograms and accelerograms of various soil bases in strong earthquakes. *Seismostoiroe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], 2018, no. 2, pp. 14-25. (In Russian).

КНИЖНЫЕ НОВИНКИ

Тяпин А. Г.

СОВРЕМЕННЫЕ НОРМАТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ОТВЕТСТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

М.: Издательство АСВ, 2017. 400 с.



В издательстве АСВ выходит в свет четвертая монография д.т.н. А.Г.Тяпина, на этот раз посвященная новым тенденциям в американских нормах расчета сооружений ядерных объектов на сейсмические воздействия. В 2017 году опубликована новая редакция стандарта ASCE4-16. Зная ту огромную роль, которую сыграла предыдущая редакция этого стандарта (ASCE4-98), автор полагает, что в ближайшие годы новая редакция также станет индустриальным стандартом по всему миру. С учетом большого количества зарубежных проектов Росатома, отечественным специалистам важно знать, какие новшества появились в новой редакции, чтобы работать с зарубежными заказчиками. Кроме того, ряд уникальных гражданских сооружений уже сопоставим с сооружениями ядерных объектов по своим размерам, жесткостям и массам, поэтому нормы атомной отрасли в части сейсмических расчетов могут, по мнению автора, использоваться и для подобных гражданских объектов.

Сравнительный анализ новых нормативных документов и документов прежнего поколения, проводимый автором в данной монографии, представляет интерес для студентов и аспирантов, готовящихся к работе в этой отрасли, а также для преподавателей строительных ВУЗов. По вопросам заказа монографии можно обращаться в издательство АСВ E-mail: iasv@iasv.ru, тел. 8(925)084-74-24.