

**Р.А. АТАБЕКЯН**

**ОСОБЕННОСТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СЛАБЫХ  
ГРУНТАХ И ИХ УЧЕТ В СТРОИТЕЛЬНЫХ НОРМАХ**

*(Ванадзор)*

Влияние грунтовых условий на интенсивность сейсмических воздействий все известно и учитывается в нормах сейсмостойкого строительства всех стран. Как правило, нагрузки на сооружения от сейсмических воздействий определяются по ускорениям, и для учета влияния грунтовых условий площадки строительства вводятся соответствующие коэффициенты. Эти же коэффициенты применяются для расчета смещений, что дает удовлетворительные результаты при плотных грунтах. Однако на слабых грунтах могут иметь место большие смещения, которые не отражаются в существующих нормах сейсмостойкого строительства. С целью оценки истинных величин смещений на слабых грунтах использованы основные параметры зарегистрированных сильных землетрясений с дальнейшей их обработкой и с применением известных зависимостей оценки энергии, магнитуды, плотности потока сейсмической энергии, ускорений и смещений. Для анализа использованы данные ранее проведенных измерений для сейсмического микрорайонирования, данные Спитакского землетрясения 1988г. и землетрясений в Турции 2023г.

**Ключевые слова:** слабые грунты, смещение, ускорение, скорость колебания частиц грунта, сейсмическая нагрузка.

**Введение.** При проведении макросейсмических обследований после сильных землетрясений нередко встречаются повреждения и разрушения зданий и сооружений, обусловленные большими смещениями частей сооружения относительно друг друга. Обычно такие повреждения имеют место на сооружениях, расположенных на слабых грунтах. При определении сейсмических воздействий в зависимости от грунтовых условий в нормах сейсмостойкого строительства внедрены соответствующие коэффициенты, которые позволяют с достаточной точностью рассчитать ожидаемые ускорения на различных грунтах. Как показывают соответствующие расчеты и натурные наблюдения, упомянутые выше коэффициенты не отражают истинных смещений на слабых грунтах. Вопросы оценки смещений на слабых грунтах при сильных землетрясениях нами впервые были затронуты в статьях “Ground displacements on soft soil sites and their importance in seismic design” (4th IASPEI / IAEE International Symposium, *Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, August 23–26, 2011- University of California Santa Barbara USA [1]), “Перемещения на слабых грунтах при сильных землетрясениях и устройство

сейсмических швов” (Աշխարհագրության և երկրաբանության արդի հիմնախնդիրները, միջազգային գիտաժողովի նյութեր, Երևան, սեպտեմբեր 27-29, 2018, էջ. 176-181 и др. [2]). В этих и других работах были рассмотрены расчетные ускорения, скорости колебания частиц грунта и смещения при сильных землетрясениях и проведено сопоставление полученных результатов с данными, полученными при Спитакском землетрясении 1988г. В результате упомянутых исследований выявлена возможность развития чрезмерно больших смещений на слабых грунтах.

**Материалы и методы.** В работе в основном использованы многочисленные записи землетрясения 2023г. в Турции с магнитудой 7,7 и 7,5, а также данные ранее проведенных и опубликованных нами исследований. В качестве исходного материала были использованы собственные данные многочисленных измерений скоростей волн  $V_S$  и преобладающих периодов колебания грунтов  $T_0$ , выполненных для микрорайонирования, и результаты исследований специалистами разных стран в зоне хорошо изученного Спитакского землетрясения 1988г. [3-6]. Для анализа и дальнейшей обработки из более чем 100 записей землетрясения 2023г. года в Турции были выбраны две группы станций, расположенных на расстояниях примерно 30 и 100 км от эпицентра. В табл. 1 приведены данные станций из [7, 8] в пределах  $r_1=30$  км от эпицентра, по возможности - с сохранением соответствующего расположения относительно эпицентра и линии разрыва.

Таблица 1

Данные станций, расположенных примерно в 30 км от эпицентра

Station	Repi (км)	Rrup (км)	$V_{S30}$ (м/с)	Site class*	Comp.	PGA (см/с <sup>2</sup> )	PGV (см/с)
4615	13,8	10,3	484	B	E-W	580,2	131,9
2708	33,0	4,0	523	B	N-S	812,7	126,8
4616	19,9	2,3	390	B	N-S	615,3	97,9
4617	29,0	22,2	574	B	N-S	145,4	29,4
4620	29,0	19,3	484	B	N-S	300,3	32,8
8002	36,0	15,2	430	B	E-W	208,6	41,4
2703	33,2	51,4	758	B	E-W	160,8	16,6
average	27.1					397,5	67,2

Для оценки параметров движения грунта исходили из плотности потока сейсмической энергии -  $F$ .

Использовано известное выражение метода геометрической сейсмологии [9-11]:

$$F_{r1} = V^2 V_S \rho, \quad (1)$$

где  $V$  - скорости колебания частиц среды;  $V_S$  - скорость прохождения  $S$  волн;  $\rho$  - плотность грунтов.

Здесь и далее в качестве  $V_S$  приняты средние значения согласно EN8 [12]. Для грунтов категории  $B$  принято  $V_S = 580$  м/с. Значения плотности грунтов приняты по литературным и собственным данным. Для грунтов категории  $B$  принято  $\rho = 2000$  кг/м<sup>3</sup>. В табл. 1 среднее значение скоростей колебания частиц среды для грунтов типа  $B$  составляет  $V = 67,2$  см/с. Таким образом, плотность потока сейсмической энергии на среднем расстоянии от эпицентра в  $r_1 = 27,1$  км (табл.1) составляет

$$F_{r1} = V^2 V_S \rho = (67,2 \text{ см/с})^2 \cdot 580 \text{ м/с} \cdot 2000 \text{ кг/м}^3 = 52,4 \cdot 10^4 \text{ Н/м.с.}$$

Принимая, что плотность потока энергии не зависит от типа грунтов, по  $F_{r1}$  рассчитаны скорости колебания частиц среды для грунтов типа  $A, C, D$  и  $E$ .

В табл. 2 приведены использованные в расчетах значения скоростей прохождения волн -  $V_S$ , плотности грунтов -  $\rho$  и преобладающих периодов их колебания  $T_0$  для разных грунтов.

Как было отмечено выше, для  $V_S$  использованы средние значения согласно EN8, а для  $\rho$  - литературные и собственные данные. В качестве преобладающих периодов грунтов -  $T_0$  приняты значения верхнего предела периода на постоянном участке графика спектральных ускорений -  $T_C$  по Европейскому стандарту (EN 1998-1:2004 (E)).

Таблица 2

Расчетные значения  $\rho, V_S$  и  $T_0$

Ground type	$\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )	$V_S$ average (м/с)	$T_0 = T_C$ (с)
A	2200	1750	0,4
B	2000	580	0,5
C	1800	270	0,6
D	1600	150	0,8
E	1400	100	0,9 (по опыту)

Отметим, что принятое для грунтов типа  $B$  значение  $T_S = T_C = 0,5$  подтверждается данными, зарегистрированными станциями 3145 и 3139 (рис.1). Здесь на графиках спектральных ускорений максимальные значения также соответствуют периоду 0,5с.

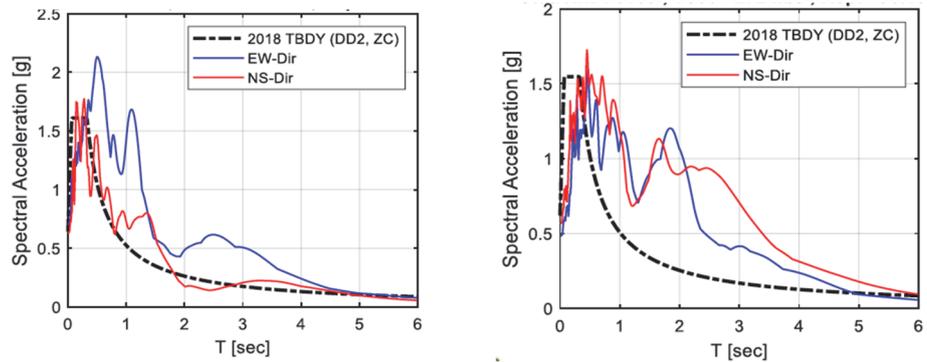


Рис. 1. Спектральные ускорения на грунтах категории В

Используя данные табл. 2, рассчитаны скорости колебания частиц для грунтов типа А, С и Е при  $F_{r1} = 52,4 \cdot 10^4 \text{ Н/м.с}$ :

$$V^2 = F_{r1} / V_S \rho \quad (1)$$

– грунты типа А:  $V^2 = F_{r1} / V_S \rho = 52,4 \cdot 10^4 \text{ Н/м.с} / (1750 \text{ м/с} \cdot 2200 \text{ кг/м}^3) = 0,136 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ,  $V = 36,9 \text{ см/с}$ ;

– грунты типа С:  $V^2 = F_{r1} / V_S \rho = 52,4 \cdot 10^4 \text{ Н/м.с} / (270 \text{ м/с} \cdot 1800 \text{ кг/м}^3) = 1,078 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ,  $V = 103,8 \text{ см/с}$ ;

– грунты типа D:  $V^2 = F_{r1} / V_S \rho = 52,4 \cdot 10^4 \text{ Н/м.с} / (150 \text{ м/с} \cdot 1600 \text{ кг/м}^3) = 2,183 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ,  $V = 147,8 \text{ см/с}$ ;

– грунты типа Е:  $V^2 = F_{r1} / V_S \rho = 52,4 \cdot 10^4 \text{ Н/м.с} / (100 \text{ м/с} \cdot 1400 \text{ кг/м}^3) = 3,743 \text{ м}^2/\text{с}^2$ ,  $V = 193,5 \text{ см/с}$ .

Полученные значения скоростей колебания частиц приведены в табл. 3.

Таблица 3

Значения V для разных грунтов

Категор. гр.	А	В	С	Д	Е
$T_0 (c)$	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9
$V_S \text{ average (м/с)}$	1750	580	270	150	100
$V (см/с)$	36,9	67,2	103,8	147,8	193,5

Теперь можно определить интересующие нас смещения грунтов - D, ускорения - A и напряжения -  $\tau$  при прохождении сейсмических волн. Эти параметры определены по известным выражениям для колебаний в неограниченной упругой среде и условия на поверхности:

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = V_s^2 \frac{\partial^2 D}{\partial x^2}; \quad \tau = V_s^2 \rho \frac{\partial D}{\partial x}. \quad (2)$$

Для колебаний задана функция, которая с достаточной для поставленной задачи точностью описывает колебания в начальном, наиболее интенсивном участке вступления S волн:

$$D = D_0 \sin 2\pi(t/T_s - x/L_s). \quad (3)$$

Для скоростей, ускорений и напряжений соответственно получим

$$\begin{aligned} V &= D_0(2\pi/T_s) \cos 2\pi(t/T_s - x/L_s); \\ A &= -D_0(2\pi/T_s)^2 \sin 2\pi(t/T_s - x/L_s); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\tau = -V_s^2 \rho D_0(2\pi/L_s) \cos 2\pi(t/T_s - x/L_s).$$

Имея рассчитанные значения скоростей колебаний  $V$  для различных площадок (табл.3), по выражениям (4) определены соответствующие максимальные смещения -  $D_0$ , ускорения -  $A$  и напряжения -  $\tau$  по имеющимся значениям преобладающих периодов  $T_s$  (табл. 2 и 3). Из первого уравнения системы (4) определяется максимальное значение для  $D_0$ , далее, имея  $D_0$ , из второго и третьего уравнений определяются  $A$  и  $\tau$ .

Рассчитанные по принятым значениям  $T_0$  максимальные перемещения, ускорения и напряжения приведены в табл.4.

Таблица 4

Полученные значения  $D_0$ ,  $A$  и  $\tau$

Категор. гр.	А	В	С	Д	Е
$T_0$ (с)	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9
$V$ (см/с)	36,9	67,2	103,8	147,8	193,5
$D_0$ (см)	2,38	5,35	9,92	18,83	27,73
$A$ (см/с <sup>2</sup> )	586	844	1086	1160	1350
$\tau$ (кН/м <sup>2</sup> )	1438	779	505	355	271

В табл. 4 смещения  $D_0$  на грунтах категории Д увеличиваются в 8 раз, а на грунтах категории Е – в 11 и более раз по отношению к смещениям на грунтах категории А.

Аналогичные расчеты выполнены по данным станций, расположенных примерно на расстоянии 100...110 км от эпицентра (табл.5, рис.1).

Таблица 5

Данные станций, расположенных примерно на расстоянии 100 км от эпицентра

Station	Rep1 (км)	Rrup (км)	V <sub>S30</sub> (м/с)	Site Class*	Comp.	PGA (см/с <sup>2</sup> )	PGV (см/с)
3123	143	14,4	575	B	E-W	575	82,8
3131	145,0	16,2	567	B	E-W	351,0	44,0
3132	143,1	14,4	377	B	N-S	498,9	67,1
3137	82,5	2,0	688	B	E-W	714,5	45,6
3142	106,5	0,4	539	B	E-W	730,5	48,9
3144	77,0	2,1	485	B	E-W	780,0	54,5
3145	91,1	2,7	533	B	E-W	694,7	97,4
3146	114,6	11,5	530	B	N-S	448,2	22,6
average	112,8					599,1	57,8
3124	140,1	17,7	283	C	E-W	622,6	79,1
3139	96,2	0,3	272	C	N-S	557,2	127,9

В табл. 5 среднее значение скоростей колебания частиц среды для грунтов типа В составляет  $V = 57,8$  см/с. Плотность потока сейсмической энергии на среднем расстоянии от эпицентра в  $r_2 = 112,8$  км составляет.

$$F_{r_2} = V^2 V_S \rho = (57,8 \text{ см/с})^2 \cdot 580 \text{ м/с} \cdot 2000 \text{ кг/м}^3 = 38,75 \cdot 10^4 \text{ Н/м.с.}$$

Здесь также, учитывая, что плотность потока энергии не зависит от типа грунтов, по  $F_{r_2}$  аналогичным образом рассчитаны скорости колебания частиц среды для грунтов типа А, С, D и E.

Полученные значения скоростей колебания частиц среды приведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения  $V$  для разных грунтов при  $r_2 = 112,8$  км

Категор. гр.	А	В	С	D	Е
$T_0$ (с)	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9
$V_S$ average (м/с)	1750	580	270	150	100
$V$ (см/с)	31,7	57,8	89,1	127,1	166,4

По изложенной выше методике рассчитаны смещения грунтов - D, ускорения - A и напряжения -  $\tau$  для разных типов грунтов на среднем расстоянии от эпицентра в  $r_2 = 112,8$  км.

Таблица 7

Полученные значения  $D_0$ ,  $A$  и  $\tau$  при  $r_2 = 112,8$  км

Категор. гр.	A	B	C	D	E
$T_0$ (с)	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9
$V$ (см/с)	31,7	57,8	89,1	127,1	166,4
$D_0$ (см)	2,02	4,60	8,52	16,19	23,85
$A$ (см/с <sup>2</sup> )	498	725	933	977	1161
$\tau$ (кН/м <sup>2</sup> )	1221	670	433	305	233

Здесь смещения  $D_0$  на грунтах категории D увеличиваются в 8 раз, а на грунтах категории E - в 10 и более раз по отношению к смещениям на грунтах категории A. Отметим, что значение скорости колебания частиц –  $V = 89,1$  для грунтов категории C отличается от среднего значения зарегистрированных скоростей  $V = 103$  (табл.5) на 10,5%, что следует считать приемлемым при имеющем место разбросе зарегистрированных данных.

Ускорения на грунтах категории D (табл.7) отличаются от ускорений на грунтах категории A в 1,96 раза, что также можно считать приемлемым. Отметим, что в EN 8 соответствующий коэффициент, учитывающий влияние грунтовых условий, составляет  $S = 1,8$  (EN 1998-1:2004 (E), табл. 3.3).

Полученные чрезмерно большие значения ускорений и смещений на грунтах категории E в действительности не могут иметь место, так как они ограничены динамической прочностью грунтов  $\tau_D$ . Значение  $\tau = 233 \text{ кН/м}^2 \gg \tau_D$  для грунтов категории E превышает их динамическую прочность [6].

Для наглядной демонстрации полученных результатов построены кривые относительных смещений, ускорений и скоростей колебания частиц среды в зависимости от грунтовых условий (от скоростей  $V_S$ ) (рис.2).

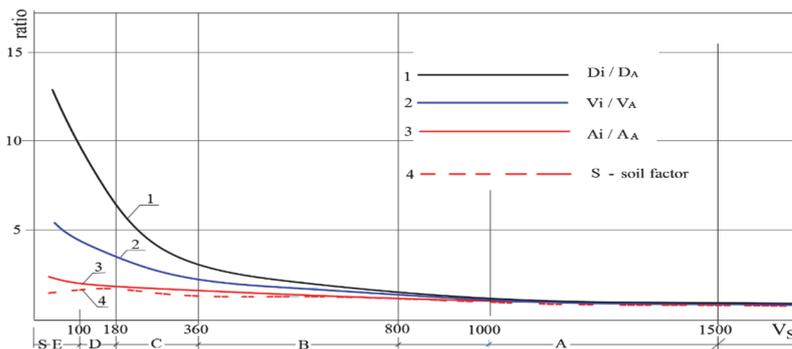


Рис. 2. Изменение относительных перемещений -  $D_i/D_A$ , скоростей -  $V_i/V_A$  и ускорений -  $A_i/A_A$  в зависимости от грунтовых условий

На рис.2 ордината показывает отношение величины данного параметра к величине соответствующего параметра для класса А. Это отношение соответствует коэффициенту грунтовых условий. Здесь же приведены кривые коэффициентов грунтовых условий  $S$  по EN 8.

**Результаты и выводы.** Согласно полученным результатам, изменение скоростей и ускорения на грунтах в зависимости от грунтовых условий в основном согласуется с принятыми в EN8 и BSSC значениями, а смещения увеличиваются несравнимо больше (до 8 и более раз). Такие же результаты получаются при натурных измерениях. Отметим, что в BSSC [13], в отличие от EN8, принято большое значение коэффициента грунтовых условий.

Таким образом, смещения на слабых грунтах увеличиваются многократно (рис.2, табл. 4 и 7), что не отражается в EN 1998-1:2004/2012 и в других нормах сейсмостойкого строительства. Следовательно, принятые в нормах сейсмостойкого строительства коэффициенты грунтовых условий, направленные на корректировку сейсмических воздействий на сооружения, приводят только к уточнению расчетных ускорений и не отражают истинного характера сейсмических воздействий на слабых грунтах.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета больших смещений на слабых грунтах, что особенно важно для протяженных сооружений, мостов, туннелей и т.п., где большие смещения частей сооружения относительно друг друга могут стать причиной их значительных повреждений или разрушения при сильных землетрясениях.

Здесь возникает сомнение также об определении понятия “*антисейсмический шов*”. В нормах ряда стран (РФ, РА и др.) [14] допускается не устраивать антисейсмический шов в фундаменте. Поскольку изначально в расчетных схемах фундамент сооружения принимался неподвижным, то естественным образом в строительных нормах было принято такое допущение. Известно, что в зданиях и сооружениях устройство антисейсмических швов предусматривается с целью обеспечения отдельной, свободной работы разделенных блоков сооружения при сейсмических воздействиях. При общих фундаментах, не разделенных антисейсмическим швом, указанное выше условие обеспечивается частично и приводит к развитию дополнительных напряжений как в самих фундаментах, так и в надземных конструкциях. Очевидно, что принятое в нормах допущение о возможности неразделения фундаментов антисейсмическим швом в корне неверно, и, по нашему мнению, сейсмический шов должен разделить также и фундаменты. Этот фактор особенно важен при слабых грунтах, когда имеют место большие смещения оснований и фундаментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Atabekyan Razmik, Atabekyan Vahan.** Ground displacements on soft soil sites and their importance in seismic design. 4th IASPEI // IAEE International Symposium, Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Session 4.- USA, Santa Barbara, 2011. – P. 1-6.
2. **Атабекян Размик, Атабекян Лусине.** Перемещения на слабых грунтах при сильных землетрясениях и устройство сейсмических швов // Աշխարհագրության և երկրաբանության արդի հիմնախնդիրները. Միջազգային գիտաժողովի նյութեր (Երևանի պետական համալսարանի հիմնադրման 100- ամյակին նվիրված միջազգային գիտաժողովի նյութեր.- Երևան, սեպտեմբերի 27-29, 2018. - էջ. 176-181:
3. **Атабекян Р.А.** Об оценке интенсивности Спитакского землетрясения 1988г. в г. Ванадзор (Кировакан) // Сейсмостойкое строительство. -М., 1998. -№4.- С.44–46.
4. **Атабекян Р.А., Дарбинян С.С., Назаретян С.Н., Атабекян Л.Р.** О влиянии грунтовых условий на интенсивность землетрясения // Сборник научных трудов “Современные задачи геофизики и инженерной сейсмологии“, Институт геофизики и инженерной сейсмологии НАН РА. - Гюмри, 2008. - С. 27-32.
5. **Eduard Khachyan.** The Spitak earthquake of 07.12.1988. Ер., 2018.-159р.
6. **Атабекян Р.А.** Проявление интенсивности Спитакского землетрясения 1988г. на территории г. Ванадзор в зависимости от геоморфологических условий// Вестник Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – СПб., 2003.- Том 8, №4. - С.27–29.
7. **Ufuk Hancılar, Karin Şeşetyan and etc.** Kahramanmaraş - Gaziantep Türkiye M7.7 Earthquake- 6 February 2023. (04:17 GMT+03:00), Strong Ground Motion and Building Damage Estimations. Preliminary Report (v4). 09.02.2023.
8. **Zeynep Gülerce (a), \*, Ayşegül Askan (b), Özkan Kale (c) and etc.** Preliminary Analysis of Strong Ground Motion Characteristics. - Kahramanmaraş-Pazarcik Earthquakes. -February 6, 2023.
9. **Аки К, Ричардс П.** Количественная сейсмология. – В 2 томах. – М., 1983.
10. **Пучков С.В** Закономерности колебания грунтов при землетрясении.- М., 1974.- 180с.
11. **Саваренский Е.Ф., Киринос Д.П.** Элементы сейсмологии и сейсмометрии.- М., 1955.- 543с.
12. **EN 1998-1:2004/ 2012, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance.**
13. **BSSC, NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and other Structures (FEMA 368)- 2000.**
14. **СНиП II-7-81\***- Строительство в сейсмических районах.

**Ռ.Ա. ԱԹԱԲԵԿՅԱՆ**

**ԹՈՒՅԼ ԳՐՈՒՆՏՆԵՐԻ ՎՐԱ ՍԵՅՍՄԻԿ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ  
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ ԵՎ ԴՐԱՆՑ ՀԱՇՎԱՌՈՒՄԸ  
ՇԻՆԱՐԱՐԱԿԱՆ ՆՈՐՄԵՐՈՒՄ**

Գրունտային պայմանների ազդեցությունը սեյսմիկ ազդեցությունների ինտենսիվության վրա հայտնի է և հաշվի է առնվում բոլոր երկրների սեյսմակայուն շինարարության նորմերում: Որպես կանոն, սեյսմիկ ազդեցություններից կառույցների վրա բեռները որոշվում են արագացումներով, և համապատասխան գործակիցները ներդրվում են շինարարության վայրի գրունտային պայմանների ազդեցությունը հաշվի առնելու համար: Այս նույն գործակիցներն օգտագործվում են տեղաշարժերը հաշվարկելու համար, ինչը գոհացուցիչ արդյունքներ է տալիս խիտ գրունտներում: Այնուամենայնիվ, թույլ գրունտների վրա կարող են առաջանալ մեծ տեղաշարժեր, որոնք չեն արտացոլվում սեյսմակայուն շինարարության առկա նորմերում: Թույլ գրունտների վրա տեղաշարժերի իրական արժեքները գնահատելու համար օգտագործվել են գրանցված ուժեղ երկրաշարժերի հիմնական պարամետրերը՝ դրանց հետագա մշակմամբ, օգտագործելով էներգիայի, մագնիտուդի, սեյսմիկ էներգիայի հոսքի խտության, արագացումների և տեղաշարժերի գնահատման հայտնի կախվածությունները: Վերլուծության համար օգտագործվել են սեյսմիկ միկրոշրջանառության համար նախկինում կատարված չափումների, 1988թ. Սպիտակի և 2023թ. Թուրքիայի երկրաշարժերի տվյալները:

**Առանցքային բառեր.** թույլ գրունտներ, տեղաշարժ, արագացում, գրունտի մասնիկների տատանման արագություն, սեյսմիկ բեռ:

**R.A. ATABEKYAN**

**FEATURES OF SEISMIC IMPACTS ON THE SOFT SOILS AND THEIR  
CONSIDERATION IN BUILDING CODES**

The influence of soil conditions on the intensity of seismic impacts is well known and is taken into account in the codes of all countries. As a rule, loads on structures from seismic impacts are determined by accelerations, and appropriate coefficients are introduced to take into account the influence of the soil conditions. The same coefficients are used to calculate displacements, which gives satisfactory results in dense soils. However, on soft soils large displacements can occur which are not regulations in the Earthquake Engineering codes. In this paper in order to estimate the true values of displacements on soft soils, the main parameters of registered strong earthquakes were used with their further processing, using the known dependencies for estimating seismic energy flux density, accelerations and displacements. For the analysis, we used mainly data from the earthquakes in Turkey in 2023.

**Keywords:** soft soils, displacement, acceleration, velocity of soil particles vibration, seismic load.