

УДК 550.34.016

DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20909

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ

© 2016 Э.Г. Геодакян<sup>1</sup>, к.ф.-м.н., Дж.К. Карапетян<sup>1</sup>, к.г.н., В.Б. Заалишвили<sup>2</sup>, д.ф.-м.н., проф., С.М. Оганесян<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., проф., С.Н. Саргсян<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА, 3115, г. Гюмри, ул. В. Сарксяна, 5, e-mail: iges@sci.am;

<sup>2</sup>Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi\_ras@mail.ru

На основе цифровых инструментальных записей исследованы влияние геологической среды распространения сейсмических волн и геологического строения «инженерного» слоя под пунктом наблюдения на амплитудный уровень и частотный состав сейсмических воздействий.

**Ключевые слова:** магнитуда, спектр ускорений, сейсмическая добротность среды, коэффициент поглощения, геологическая среда.

На современном этапе развития инженерно-сейсмологических исследований однозначно установлено, что сейсмический эффект на поверхности Земли зависит от ряда основных факторов, связанных с очагом землетрясения, физико-механическими свойствами среды распространения сейсмических волн и геолого-геофизическими условиями грунтовых пород в пунктах регистрации [Геодакян и др., 2014].

В качестве основных характеристик очага принимаются: магнитуда и механизм очага, амплитудно-частотный спектр сейсмического излучения и его продолжительность.

Реальная геологическая среда распространения волнового поля характеризуется геометрическим расхождением и поглощением упругих сейсмических волн. Основными факторами, влияющими на уровень сейсмического эффекта в пункте наблюдения, являются геологическое строение 30-ти метрового «инженерного» слоя грунта, наличие в нем различных включений и их мощности, а также плотность и пористость грунтовых пород, насыщенных различными флюидами.

Разработанные к настоящему времени многочисленные эмпирические зависимости параметров сейсмического эффекта от вышеуказанных факторов широко применяются в сейсмической практике оценки сейсмической опасности. Однако эти зависимости не дают объяснения, а в лучшем случае неадекватно оценивают аномальные изменения сейсмических воздействий, нередко возникающих при сильных и разрушительных землетрясениях.

Ярким примером аномального проявления сейсмических воздействий являлось усиление макросейсмических эффектов в городе Гюмри при Спитакском землетрясения 7 декабря 1988 г. Такие же эффекты наблюдались при Гоби-Алтайском (в

1957 г.), Мексиканском (1985 г.) и Японском (2011 г.) сильных землетрясениях.

Анализ литературных источников, в которых описаны исследования этих эффектов показывает, что некоторые исследователи связывают их с формированием очаговой и ближней зон сильных землетрясений, стоячих, ударных и поперечных изгибных волн [Аптикаев, 2001; Быков, 2000; Оганесян, 2012].

При детальном исследовании аномального проявления сейсмических воздействий при Спитакском землетрясении в городе Гюмри, выполненном по первичным макросейсмическим и инструментальным записям колебаний почвы, выявлено, что основной причиной наблюдаемых эффектов усиления сейсмического воздействия на значительных расстояниях от эпицентра стало резонансное усиление амплитуды колебаний в верхней части разреза, мощностью несколько сотен метров [Халтурин и др., 1991].

В ходе изучения афтершокового процесса в эпицентральной зоне Спитакского землетрясения, были установлены семь автономных цифровых акселерографов. Благодаря наличию этих станций были получены богатые экспериментальные записи ускорений, позволяющие исследовать эти аномальные проявления на основе спектрального анализа.

Известно, что излучение сейсмических волн из очага землетрясения и геологическая среда их распространения совместно создают сложную волновую картину инструментальной записи. Пронизывающие геологическую среду сейсмические волны по мере распространения подвергаются определенным амплитудно-частотным изменениям. Вместе с тем несут ценную информацию о строении геологической среды и физико-механических и реологических свойствах грунтов. Снижение амплитудного уровня сейсмических волн с увеличением гипоцентрального расстояния обусловлено тремя факторами: поглощением, геометрическим расхождением и рассеянием. В ближней и очаговой зоне сильного землетрясения определяющую роль имеют поглощающие свойства геологической среды.

В настоящей работе были рассмотрены изменения амплитудного уровня сейсмического излучения, их динамические параметры, а также добротность среды и коэффициент поглощения в различных направлениях от эпицентра.

На основе цифровых записей 16 землетрясений, зарегистрированных на 8-ми станциях, был исследован спектральный состав сейсмических сигналов и сейсмических воздействий на грунтах в ближней зоне (рис. 1). В таблице 1 приводятся основные параметры землетрясений.

Из 7-ми землетрясений – эпицентры 4-х расположены в центральной части Спитакской сейсмогенной зоны, в районе очага Спитакского землетрясения. Эпицентры 2-х землетрясений расположены в северо-западной части сейсмогенной зоны в узле пересечения Транскавказской и Спитакской сейсмогенных зон. Следует отметить, что из 4-х землетрясений в центральной части сейсмогенной зоны, землетрясение 26.06.90 г. имеет сбросовый характер подвижки в очаге, в механизме очага остальных 3-х землетрясений преобладает взбросо-сдвиговый характер подвижки.

Для проведения исследования сейсмических излучений этих землетрясений были применены методы спектрального анализа сейсмического излучения, основанные на энергетически-спектральных моделях Хаскелла-Аки-Бруна [Брун, 1971; Дас, Аки, 1977; Хаскелл, 1969] (рис. 2). Применение этих моделей позволяет значи-

тельно расширить понятие очага землетрясения и сейсмического излучения, определить не только их спектральные характеристики, но и параметры возможных воздействий.

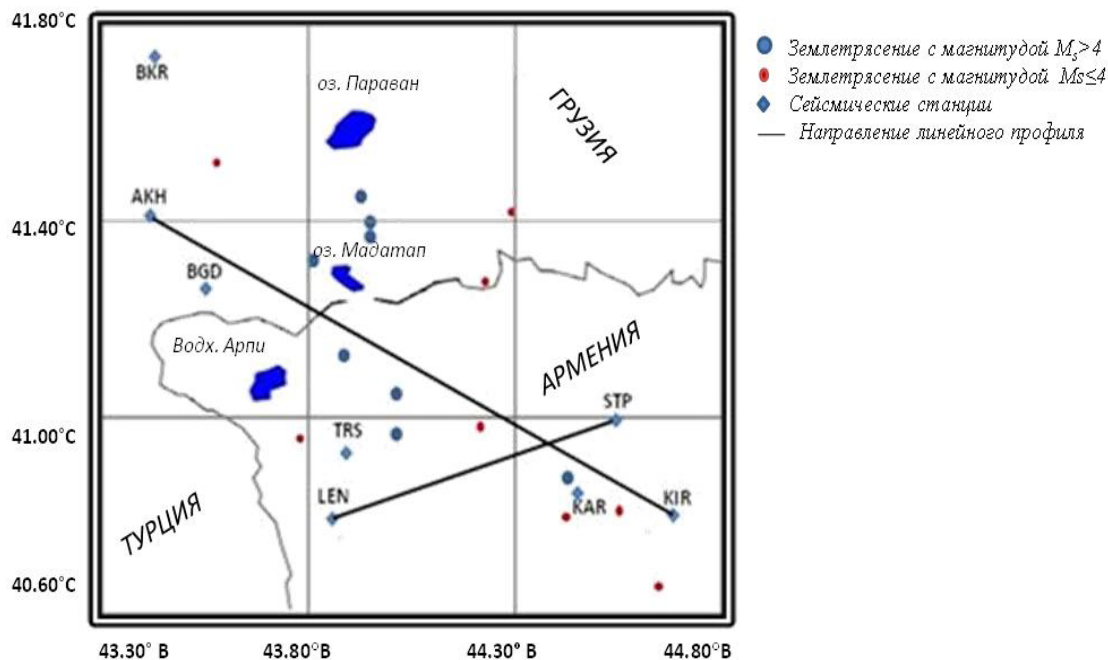


Рис. 1. Карта расположения акселерографов и эпицентров афтершоков

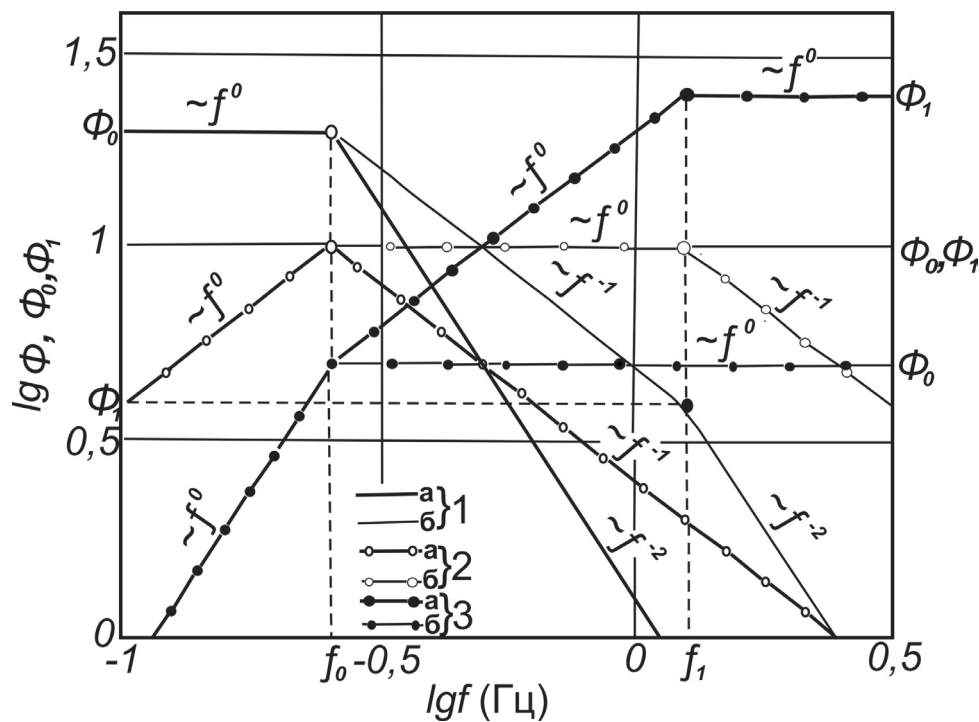


Рис. 2. Спектральная модель землетрясений. Амплитудные спектры Фурье:

- 1 – смещение; 2 – скорость; 3 – ускорение;
- а – гладкое скольжение берегов разрыва;
- б – сложный процесс трещинообразования

Таблица 1

## Основные параметры землетрясений

Дата	Время в очаге (час., минут, секунд)	Пространственные координаты эпицентров		Глубина Н(км)	Магнитуда M <sub>s</sub>
		$\varphi^0(N)$	$\lambda^0(E)$		
26.06.90	3:45:00	40,88	44,26	10	2,2
14.07.90	16:27:00	40,9	44,2	8	2,8
15.12.90	10:38:00	40,86	44,29	10	3,3
16.12.90	15:45:00	41,32	43,81	10	5,2
20.12.90	13:03:00	41,25	43,85	7	3,5
23.12.90	21:28:00	41,65	44,3	8	4,1
11.01.91	6:04:00	40,9	44,33	10	3,5
22.07.1991	9:21:21	41,4	44,2	10	2,4
24.07.1991	3:24:01	40,85	44,37	22	3,7
14.09.1991	5:42:19	40,89	44	2	4,1
6.10.1991	1:46:45	41,45	43,45	10	4,9
10.10.1991	2:44:46	41	43,37	7	4,8
20.12.1991	6:15:26	41,3	43,72	5	3,5
14.02.1992	20:31:57	40,75	44,483	10	2,5
15.03.1992	1:40:03	40,8	44,26	10	2,8
17.12.1992	22:42:52	40,88	44,167	10	2,4

С нашей стороны в работе [Геодакян, 2002] были детально исследованы спектральные излучения из очагов 7-ми землетрясений и определены нулевые, угловые и доминантные частоты (таб. 2).

Выявлено, что землетрясения типа взбросо-сдвиг, преобладающие в Спитакской сейсмогенной зоне, как правило, имеют сложный характер разрывообразования, состоящий из нескольких субисточников. В зависимости от увеличения магнитуды, значение нулевого и первого углового периодов перемещаются в более низкочастотную область спектра. Количество субисточников в этих очагах колеблется от 2-х до 4-х. Высокочастотные составляющие сейсмических излучений имеют наибольшее значение на переходных участках спектров.

Таблица 2

## Значения спектральных параметров

№	Дата землетрясений	Нулевая частота (Гц)	Угловая частота (Гц)	Максимальная амплитуда (mg)
		$f_0$	$f_1$	$A_{max}$
1	26.06.1990 03:45	0,09	-	22,0
2	14.07.1990 16:27	0,04	0,1	15,1
3	15.12.1990 10:38	0,05	0,2	49,6
4	16.12.1990 15:45	0,08	0,2	120,1
5	20.12.1990 13:03	0,07	-	7,2
6	23.12.1990 21:28	0,06	-	13,3
7	11.01.1991 06:04	0,03	0,25	189,6

Для изучения влияния геологической среды на распространение сейсмических волн, рассматривались изменения амплитудного уровня сейсмического излучения в зависимости от эпицентрального расстояния и направления распространения сейсмических волн. Снижение амплитудного уровня сейсмических волн с увеличением

гипоцентрального расстояния обусловлено тремя факторами: поглощением, геометрическим расхождением и рассеянием.

В ближней и очаговой зоне сильного землетрясения определяющую роль имеют поглощающие свойства геологической среды [Лемзиков и др., 2013]. Уровень поглощения сейсмических волн находится в прямой зависимости от частоты колебаний.

Коэффициент поглощения  $\alpha_n$  для разных частот имеет следующий вид [Егоркин и др., 1981]:

$$\alpha_n = \frac{2\pi\omega}{V_s Q}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота колебаний,  $V_s$  – скорость поперечной волны,  $Q$  – сейсмическая добротность среды. Сейсмическая добротность является безразмерным параметром, описывающим затухание сейсмической энергии при прохождении волны в геологической среде, и является важнейшим параметром для изучения макросейсмических проявлений сильных землетрясений и геодинамических или тектонических процессов в сейсмоактивных зонах [Рогожин и др., 2010].

Добротность, как и коэффициент поглощения, зависит от частоты колебаний.

Сейсмическая добротность оценивалась отношением спектральных амплитуд однотипных волн, регистрируемых на двух станциях от одного события [Бат, 2012]:

$$\ln \frac{|A(\omega, t_1)|}{|A(\omega, t_2)|} = \frac{\omega t_2 - t_1}{2 Q}, \quad (2)$$

где:  $A(\omega, t)$  – амплитуда;  $t$  – время пробега волны;  $Q$  – сейсмическая добротность среды.

Подбирали различные сочетания двух станций, трассы между которыми наиболее полно покрывали исследуемую территорию.

Рассчитывались значения сейсмической добротности среды в периодном диапазоне от 0,1–1,5 сек. Выбор этого периодного диапазона обусловлен тем обстоятельством, что в ближней зоне сильного землетрясения амплитудный уровень на этих частотах и сейсмическая добротность среды представляют наибольший интерес для инженерного анализа сейсмических воздействий. Указанный диапазон периодов был разделен на 5 интервалов: 0,1–0,3; 0,3–0,5; 0,5–0,7; 0,7–0,9; 0,9–2 сек. Расчеты численных значений  $Q_c$  проводились на центральных для этих интервалов период: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,5 сек. В таб. 3 в качестве примера приводятся значения сейсмической добротности на периоде 0,2 сек.

Таблица 3

### Значения сейсмической добротности

№	Дата землетрясений	Сейсмическая добротность Q по станциям						
		Q <sub>1-2</sub>	Q <sub>2-3</sub>	Q <sub>3-4</sub>	Q <sub>4-5</sub>	Q <sub>5-6</sub>	Q <sub>6-7</sub>	Q <sub>7-8</sub>
1	16.12.1990 15:45	24	23	35	46	51	59	50
2	18.05.1994 7:18:55	21	22	30	40	48	53	47
3	09.06.1996 2:16:53	26	25	34	43	54	57	52
4	09.06.1996 5:19:22	25	27	32	44	52	56	55
5	14.01.1999 22:45:14	22	26	36	47	56	58	54

Эти значения позволяют сделать вывод, что исследуемый район условно делится на две зоны с различными значениями  $Q$ . Сравнительный анализ значений добротности, полученных по отдельным станциям, констатирует факт о более высоких поглощающих свойствах среды в области, расположенной к юго-востоку от очага Спитакского землетрясения.

По этим же направлениям рассчитывались коэффициенты поглощения по формуле (1).

Результаты этих расчетов приводятся в таблице 4.

Таблица 4

**Значения оценок коэффициентов поглощения  $\alpha_n$  ( $10^{-3} \text{ км}^{-1}$ ) в зависимости от частоты**

Сейсмическая добротность	Частота (Гц)				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,5
$Q_{1-2}$	20	41	58	83	141
$Q_{2-3}$	21	43	60	86	147
$Q_{3-4}$	14	28	40	57	97
$Q_{4-5}$	10	21	30	43	73
$Q_{5-6}$	9,8	19	27	39	66
$Q_{6-7}$	8,4	16	23	33	57
$Q_{7-8}$	10	20	28	40	68

Эти значения позволяют сделать вывод, что с ростом частоты коэффициент поглощения увеличивается. Это говорит о том, что в затухании сейсмических волн основополагающую роль играет поглощение.

Особый интерес представляет влияние геологического строения «инженерного» слоя под пунктом наблюдения на амплитудно-частотный состав ускорений.

Для этой цели были подобраны акселерограммы колебаний грунта, зарегистрированные на станциях, имеющих одинаковую направленность и удаленность от очагов афтершоков Спитакского землетрясения, но с разным геологическим строением «инженерного» слоя под станцией (рис. 3).

На основе анализа частотного состава спектров ускорений колебаний было выявлено, что физико-механические и реологические свойства «инженерного» слоя геологической среды под пунктом наблюдения существенно влияют на амплитудный уровень и частотный состав ускорений колебаний грунта.

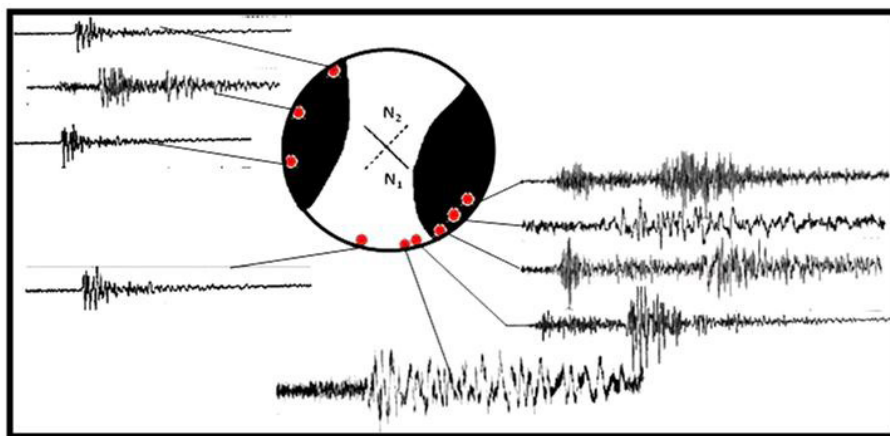


Рис. 3. Азимутальные распределения и фокальный механизм землетрясения 16.12.1990 г., 15:45

### Заключение

Сравнительный анализ амплитудно-частотных спектров ускорений колебаний грунта показывает, что на уменьшение амплитудного уровня спектра ускорения существенное влияние оказывает сейсмическая добротность среды, коэффициент поглощения и «инженерный» слой.

Сейсмическая добротность среды и коэффициент поглощения варьируют как в азимутальном направлении, так и с глубиной.

### Литература

1. Аптикаев Ф.Ф. Сильные движения грунта при землетрясениях. Автореферат дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. – Москва, 2001. – 45 с.
2. Бат М. Спектральный анализ в геофизике. – М.: Недра, 1980. – 535 с.
3. Брун Дж.Н. Исправление к тектоническим напряжениям и к спектральным сейсмическим волнам сдвига вызванных землетрясением // Геофизические Исследования. – 1971. – Том 76, №26. – С. 4997–5009.
4. Быков В.Г., Нелинейные волновые процессы в геологических средах. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 190 с.
5. Геодакян Э.Г., Оганесян С.М., Карапетян Дж.К. К проблеме изучения аномальных проявлений сейсмических воздействий в очаговой и ближней зонах сильных землетрясений // Геология и геофизика юга России. – 2014. – №1. – С. 16–21.
6. Геодакян Э.Г. Спектральные характеристики очаговых излучений Спитакской сейсмической зоны // Сп. науч. трудов конференции, посвященной 40-летию ИГИС. – Гюмри: Изд. «Гитутюн» НАН РА, 2002 г. – С. 299–311.
7. Дас С. Аки К. Плоскость разлома с барьерами; Модель универсальных землетрясений // Геофизические Исследования. – 1977. – Том 82, №36. – С. 5658–5670.
8. Егоркин А.В., Кун В.В., Чернышев Н.М. Поглощение продольных и поперечных волн в коре и верх ней мантии Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы // Физика Земли. – 1981. – №2. – С. 37–50.
9. Лемзиков В.К., Шакирова А.А., Лемзиков М.В., Гарбузова В.Т., Ящук В.В., Дрознин Д.В. Поглощение сейсмических волн в поверхностных слоях вулкана Кизимен (предварительные результаты) // Вулканизм и связанные с ним процессы. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. – С. 226–230.
10. Оганесян С.М. К постановке задачи о распространении упругих волн чистого изгиба и изгиба в однородном консольном стержне // В кн.: Опасные процессы в горных и предгорных территориях Северного Кавказа. – Владикавказ. – 2012. – С. 316–325.
11. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Шварев С.В., Мараханов А.В., Новиков С.С. Особенности сеймотектоники Сочи-Краснополянского района // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Пятой Международной сейсмологической школы. – Обинск: ГС РАН, 2010. – С. 174–177.
12. Халтурин В.И., Шомахадов А.М., Геодакян Э.Г., Саргсян Н.М., Мхитарян Л.А. Усиление интенсивности колебаний в Ленинакане // Вопросы инженерной сейсмологии. – 1991. – Вып. 32. – С. 5–14.

13. Хаскелл Н.А. Эластичные перемещения в ближнем поле распространения разлома. Сейсмологическое Общество Америки. – 1969. – Том 59, №3. – С. 865–908.

DOI: 10.23671/VNC.2016.4.20909

## **SPECTRAL ANALYSIS OF THE SEISMIC IMPACT IN NEAR ZONE OF STRONG EARTHQUAKE AND EFFECT DETAILS**

© 2016 E.G. Geodakyan<sup>1</sup>, Sc. Candidate (Phys.-Math.), J.K. Karapetyan<sup>1</sup>, Sc. Candidate (Geol.-Min.), V.B. Zaalishvili<sup>2</sup>, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof., S.M. Oganessian<sup>1</sup>, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof., S.N. Sargsyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov of NAS RA, 3115, Gyumri, V. Sarkisyan street, 5, e-mail: [iges@sci.am](mailto:iges@sci.am);

<sup>2</sup>Geophysical Institute of VSC RAS, Russia, 362002, Vladikavkaz, Markov street, 93a, e-mail: [cgi\\_ras@mail.ru](mailto:cgi_ras@mail.ru)

The influence of the geological environment of seismic waves and the geological structure of the «engineering» layer under observation point on the level of amplitude and frequency composition of seismic effects are investigated on the basis of digital instrumental records.

**Keywords:** magnitude, acceleration spectrum, seismic quality factor of the medium, the absorption coefficient, geological structure.