

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ПРОГНОЗНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА В г. ЯЛТА

Пустовитенко Б.Г., д.ф-м.н.,

Эреджепов Э.Э., аспирант,

*ГАУ «Крымский экспертный совет по оценке сейсмической опасности
и прогнозу землетрясений»*

bpustovitenko@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены общие свойства и различия в параметрах энергетических спектров синтетических акселерограмм максимально возможной расчетной сейсмичности для площадок строительства ответственных зданий в г. Ялта, связанные с локальными грунтовыми условиями. Ширина спектра δf с максимальной плотностью энергии оказалась мало зависимой от выбора начальных условий. Отмечены различия в спектральных свойствах энергетических спектров для отдельных площадок строительства, связанные с особенностями амплитудно-частотных характеристик локальной среды под объектами.

Ключевые слова: акселерограмма, энергетический спектр, ширина спектра, амплитудно-частотная характеристика, расчетная сейсмичность.

ЕНЕРГЕТИЧНІ СПЕКТРИ ПРОГНОЗНИХ СЕЙСМІЧНИХ ВПЛИВІВ ДЛЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ БУДІВНИЦТВА В м. ЯЛТА

Пустовитенко Б.Г., д.ф-м.н.,

Ереджепов Е.Е., аспірант,

*ДАУ «Кримська експертна рада з оцінки сейсмічної небезпеки
і прогнозу землетрусів»*

bpustovitenko@mail.ru

Анотація. Розглянуто загальні властивості і відмінності в параметрах енергетичних спектрів синтетичних акселерограм максимально можливої розрахункової сейсмічності для майданчиків будівництва відповідальних будівель в м. Ялта, які пов'язані з локальними грунтовими умовами. Ширина спектра δf з максимальною щільністю енергії виявилася мало залежною від вибору початкових умов. Відзначено відмінності в спектральних властивостях енергетичних спектрів для окремих майданчиків будівництва, пов'язані з особливостями амплітудно-частотних характеристик локального середовища під об'єктами.

Ключові слова: акселерограма, енергетичний спектр, ширина спектра, амплітудно-частотна характеристика, розрахункова сейсмічність.

THE ENERGY SPECTRA OF FORECAST SEISMIC EFFECTS FOR RESPONSIBLE CONSTRUCTION PROJECTS IN YALTA

Pustovitenko B.G., Doctor Of Physics-Mathematical Sciences,

Eredzhepov E. E., post-graduate student,

*State Management Academy, Crimean Expert Council on Seismic Hazard Assessment
and Earthquake Prediction*

bpustovitenko@mail.ru

Abstract. The article describes the common properties and the differences in the parameters

of the energy spectra of the synthetic accelerograms for the estimated seismicity for construction sites of responsible buildings in Yalta related to local ground conditions.

Soils under the sites classified as category II according to seismic properties, have peculiarities in the amplitude-frequency characteristics (AFC) of the environment.

For all accelerograms the energy spectra had a single pronounced maximum in a limited range of frequencies. The width δf of the spectrum with the maximum energy density was little dependent on the choice of initial conditions (typical earthquake and epicentral distance).

At the same time, the observed differences in the spectral properties of the energy spectra for individual construction sites are most likely connected with the peculiarities of the amplitude-frequency characteristics of the local environment for objects, amplifying or damping seismic vibrations in a different way, depending on their spectral composition.

For all accelerograms the maxima of the energy spectra of the vertical component are shifted to higher frequencies compared to radial and tangential.

Keywords: accelerograms energy spectrum, spectral width, frequency response, the calculated seismicity.

Введение. В соответствии с нормативными документами по строительству [1] расчет сейсмических нагрузок на высотные и ответственные здания должен выполняться прямым динамическим методом с использованием акселерограмм. В Крыму при отсутствии в настоящее время реальных записей сильных движений грунта для выполнения требований ДБН [1] разработана методология и методика моделирования прогнозных акселерограмм с использованием представительной статистики о параметрах местных слабых землетрясений и сеймотектонических условий региона [2, 3]. Основу построения синтетических акселерограмм составляют статистические закономерности динамических параметров записей землетрясений, их спектров и гипотеза подобия землетрясений в широком диапазоне сейсмических энергий [4]. Методика прошла научную апробацию [5, 6] и использована для практических целей моделирования прогнозных сейсмических воздействий на площадках строительства ответственных объектов в городах Крыма, в частности, района Южнобережья. Целью настоящей работы является рассмотрение особенностей спектральных характеристик расчетных акселерограмм на примере четырех площадок строительства ответственных зданий различного назначения в г. Ялта.

При исследовании спектральных характеристик акселерограмм предпочтение отдано спектрам энергии, так как в отличие от других видов спектров Фурье, для энергии существует принцип сохранения [7]. Энергетические спектры, имеют хорошо разработанную стохастическую вероятную трактовку и тесно связаны с корреляционными функциями, применяемыми в инженерной сейсмологии. Спектры энергии проще связывать со статистическими закономерностями колебаний и с макросейсмической интенсивностью, являющейся в настоящее время основной характеристикой картирования сейсмической опасности. Согласно условию геометрического подобия [8] в логарифмической системе координат форма спектров энергии не должна изменяться, т.е. в этом смысле формы энергетических спектров слабых толчков и прогнозируемых сильных будут подобны. Основные свойства совокупности энергетических спектров смещений при землетрясениях Крыма и идея их использования в задачах инженерной сейсмологии описаны в [9, 10].

Исходные данные и использованная методика. В соответствии с методикой [2, 3] первым и главным этапом моделирования акселерограмм для расчетных значений интенсивности I_R площадок строительства является выбор наиболее типичных землетрясений, произошедших в ближайшей крупной сейсмогенерирующей геологической структуре, с «типичной» записью (сейсмограммой). Запись выбранного землетрясения должна отвечать всем основным статистическим свойствам спектральных, динамических и кинематических характеристик совокупности очагов местных землетрясений, изученных в широком диапазоне энергий.

В данной работе для четырех объектов строительства (№1...4) в г. Ялта с близкими

значениями I_R (табл. 1) в качестве «типичных» отобраны записи землетрясений, зарегистрированные на стационарной сейсмической станции «Ялта», расположенной непосредственно вблизи площадок строительства. Значения I_R приведены для периода повторяемости 1 раз в 500 лет.

Таблица 1 – Характеристика строительных объектов в городе Ялта

№	Адрес	Название	I_R	Категория грунта
1	ул. Соханя / ул. Котельникова, 16/1	16-ти этажный жилой дом	8.37	II
2	ул. Дразинского, 35	Гостиничный комплекс «Парус» (16 этажей)	8.32	II
3	Приморский парк им. Гагарина, 3	Курортно-гостиничный комплекс»	8.39	II
4	Приморский парк им. Гагарина, 9	Рекреационный комплекс, 18 этажей	8.36	II

Основные параметры «типичных» землетрясений и их эпицентральные расстояния до станции «Ялта» (Δ_0) и объектов ($\Delta_1... \Delta_4$) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные параметры типичных землетрясений

№	Дата	φ^0	λ^0	H, км	M_w	Δ_0 , км	Δ_1 ,* км	Δ_2 , км	Δ_3 , км	Δ_4 , км
1	1.07.1984.02 ^{h05m}	44.51	34.35	17	3.2	16	17	13		
2	07.02.2006	44.46	34.33	13	3.4	13		12	14	14
3	23.06.2007	44.34	34.29	34	3.5	20	20			20

* – нумерация объектов соответствует таблице 1.

Очаги выбранных «типичных» землетрясений с близкими значениями магнитуд $M_w = 3.2...3.5$ были расположены в районе Южнобережной сейсмогенерирующей структуры, способной порождать сильные землетрясения с магнитудами $M_w = 7$ [11]. Пространственное положение эпицентров землетрясений и исследуемых площадок показано на рис. 1.

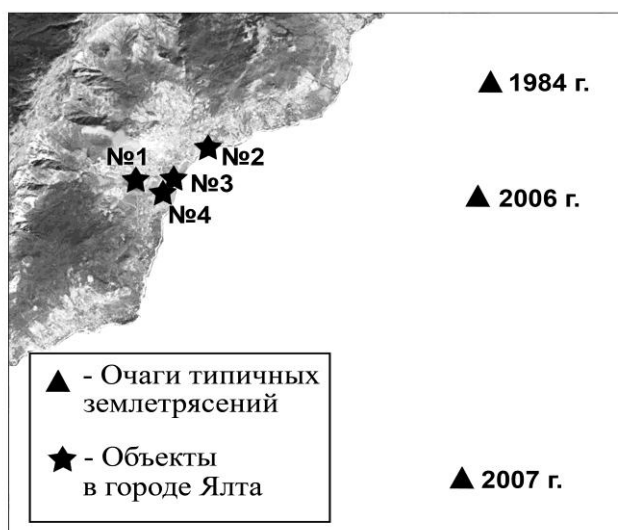


Рис.1. Карта-схема расположения очагов «типичных» землетрясений и объектов строительства

Сейсмическая аппаратура на станции «Ялта» расположена на плотных коренных

породах, соответствующих I категории по сейсмическим свойствам, а грунты под площадками строительства относятся ко II категории. В связи с близостью эпицентральных расстояний Δ_0 и Δ_i можно предположить, что трассы сейсмических волн на станцию и исследуемые пункты отличаются только верхней пачкой слоев под площадками строительства. На рис. 2. представлены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) среды под исследуемыми площадками, рассчитанные с использованием алгоритма из [12].

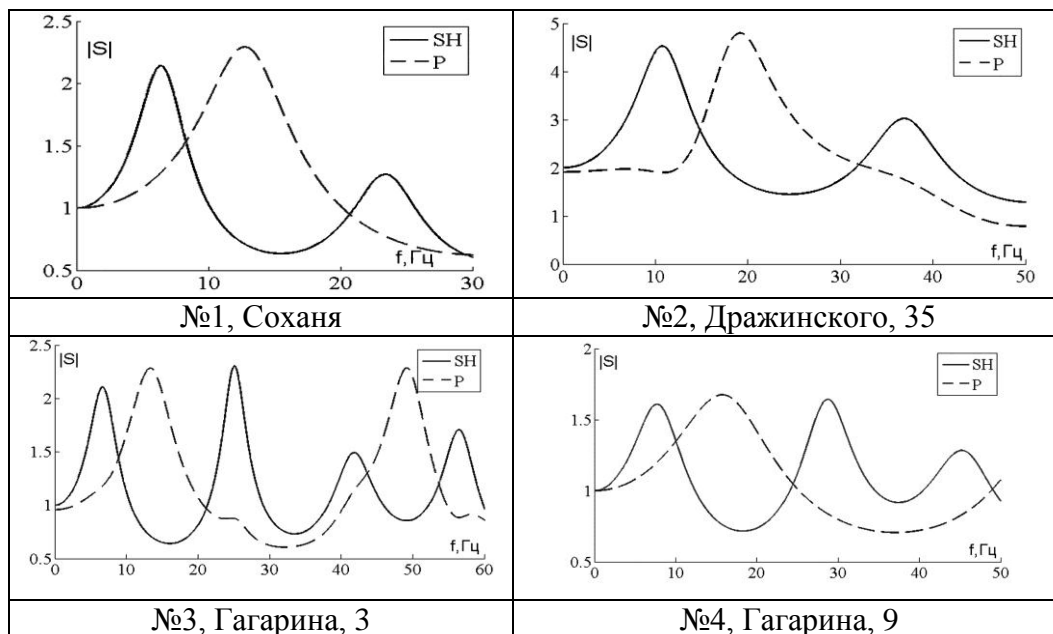


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики грунтовых условий площадок строительства объектов в г. Ялта (нумерация объектов в соответствии с табл.1.)

Как видно (рис. 2), АЧХ среды в зависимости от типа волны имеют максимумы на разных частотах. Так, для продольной волны P первый максимум приходится на частоты от $f=13$ Гц (№1, 3) до 19 Гц (№2), а для поперечных волн SH – на более низкие: $f=6 \dots 11$ Гц.

Используя АЧХ среды в соответствии с методикой [2, 3], рассчитывались синтетические акселерограммы для максимальной прогнозной интенсивности I_R на исследуемых площадках. Акселерограммы нормировались на ускорения a_g с использованием зависимости пикового ускорения от расчетной интенсивности I_R [13].

Как принято в практике моделирования воздействий [14], для оценки сейсмостойкости зданий и сооружений требуются акселерограммы, ориентированные по направлениям «очаг-объект» (радиальная составляющая R), перпендикулярная R – (тангенциальная составляющая T) и вертикальная Z . В связи с этим используемые в сейсмологической практике компоненты NS и EW записи смещений почвы «типичного» землетрясения перепроектировались в горизонтальной плоскости на радиальное (R) и тангенциальное (T) направления.

Спектральные характеристики акселерограмм. Переход от спектральной плотности акселерограмм к энергетическому спектру осуществлялось по формуле из [7]:

$$q = \frac{\rho c}{2\pi l g e} \omega^3 \Omega^2(\omega)$$

где, ρ – плотность пород в окрестности очага, c – скорость распространения объемных волн (P или S), $\Omega(\omega)$ – модуль спектральной плотности, определяемый из амплитудного спектра акселерограмм.

Для исключения осцилляций энергетические спектры сглаживались скользящим осреднением в пределах октавной ширины по оси частот и представлены в билогарифмической системе координат (рис. 3). Методика и алгоритм расчета энергетических спектров, их обработка и построение системы спектров описаны в [7, 9].

Для всех энергетических спектров по трем компонентам записи (рис. 3) характерна резонансная форма с одним выраженным максимумом нормированной плотности энергии q/q_{max} в ограниченной области частот.

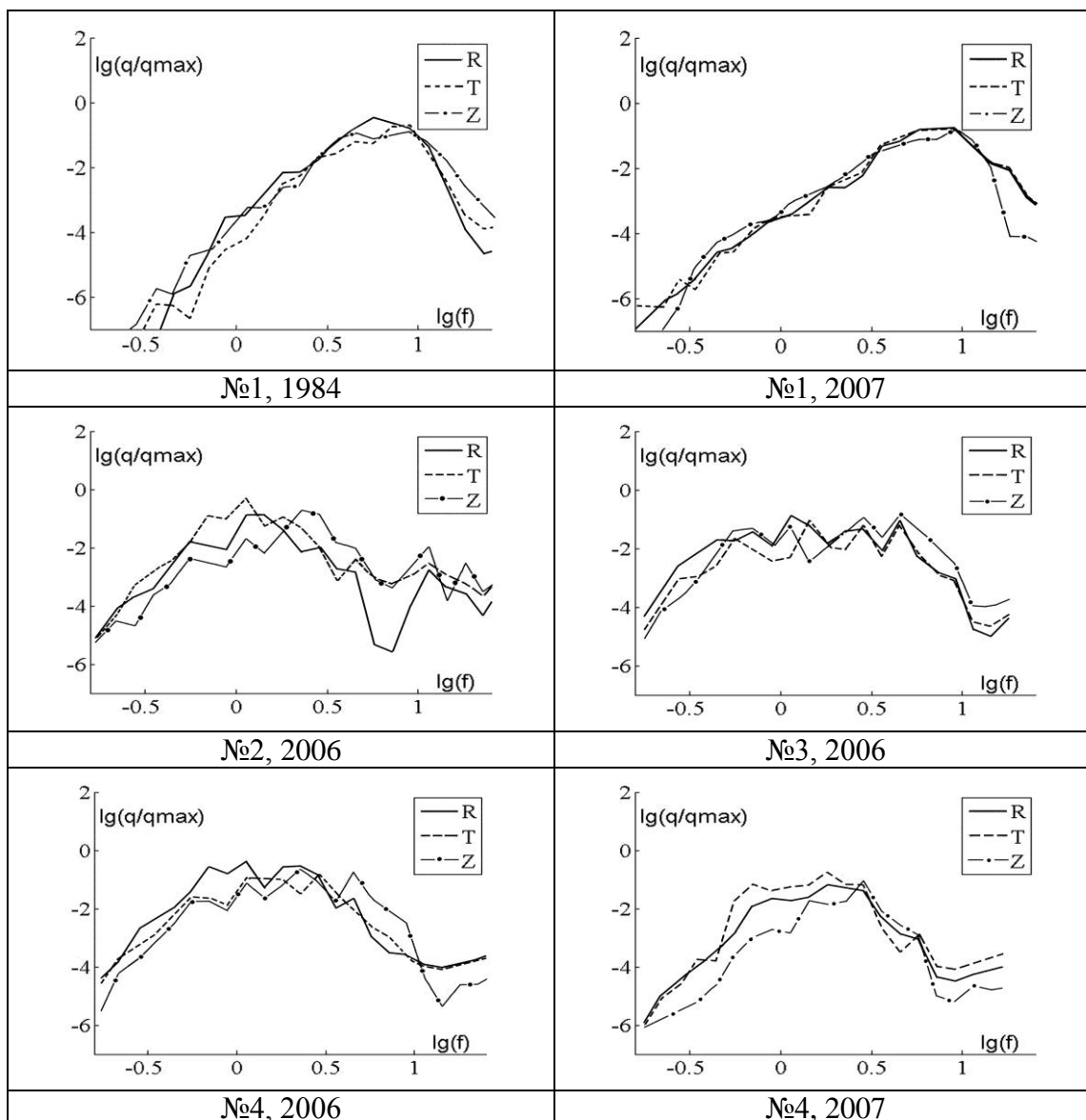


Рис. 3. Энергетические спектры прогнозных акселерограмм для площадок строительства №1...4 с использованием «типичных» землетрясений 1984, 2006, 2007 г.

Рассмотрим главную характеристику энергетических спектров – ширину максимума спектра $\delta f q$ на уровне $1/2$ от максимального значения q_{max} в высокочастотной ($f q1$) и низкочастотной ($f q2$) части спектра:

$$\delta f q = f q1 - f q2.$$

Прежде всего, можно отметить, что форма и характеристики энергетических спектров акселерограмм, смоделированных для одной и той же площадки строительства с использованием двух «типичных» землетрясений (1984 и 2007 г. для № 1) и (2006, 2007 г. для № 4) имеют одинаковую форму и практически идентичны по спектральным параметрам (рис. 3): максимум плотности энергии q/q_{max} площадки №1 в обоих случаях приходится на диапазон $\delta f q = 5...12$ Гц по Z компоненте, $\delta f q = 4...9$ Гц – по R и T, а для площадки № 4 – $\delta f q = 0.9...6$ Гц (Z) и $\delta f q = 0.5...4$ Гц (R и T). Таким образом, можно полагать, что выбор «типичного» землетрясения (при условии, что выбор сделан при строгом соблюдении всех критериев отбора) не вносит существенного вклада в спектральные характеристики

расчетных акселерограмм.

В то же время ширина энергетического спектра для отдельных площадок строительства, не смотря на близость их расположения, получилась несколько различной в основном за счет особенностей амплитудно-частотных характеристик локальной среды под объектами (рис. 2), по-разному усиливающим или гасящим сейсмические колебания в зависимости от их спектрального состава.

Учитывая, что все объекты строительства (№1...4) расположены на однотипных грунтах II категории по сейсмическим свойствам, а акселерограммы смоделированы на основе записей одних и тех же типичных землетрясений, расположенных на расстояниях 13...20 км от площадок, были построены предварительные сводные системы энергетических спектров, нормированные на значения q_{max} (рис. 4).

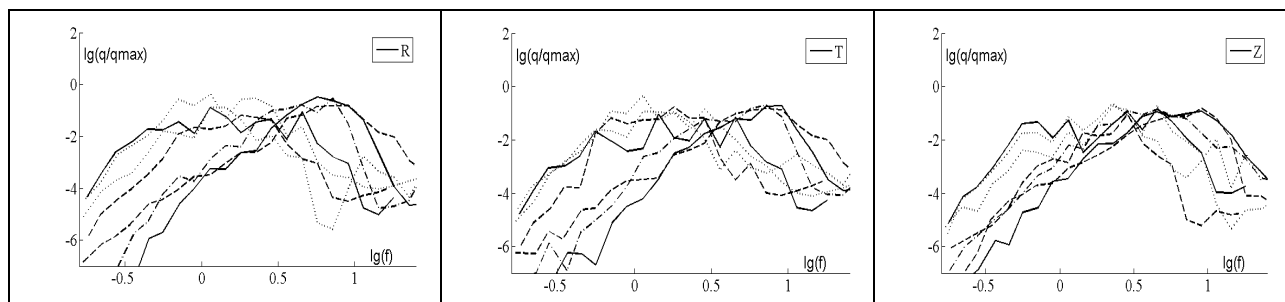


Рис. 4. Сводные энергетические спектры акселерограмм по составляющим: R, T, Z.

Из рис. 4 видно, что несмотря на вариации индивидуальных спектров, максимальные значения энергетических спектров по радиальной и тангенциальной составляющим акселерограмм, находятся в диапазоне частот: $\delta f = 0.7...8$ Гц и $\delta f = 0.7...10$ Гц, соответственно, а по вертикальной Z составляющей – максимум сдвинут в область более высоких частот: $\delta f = 2...12$ Гц, что связано с преобладанием в записи продольных колебаний, являющихся более высокочастотными по сравнению с поперечными.

Заключение. Впервые спектральные свойства прогнозных сейсмических воздействий от сильных землетрясений Крыма изучены по энергетическим спектрам акселерограмм, смоделированных для четырех реальных площадок строительства ответственных зданий в г. Ялта. В качестве основы моделирования акселерограмм использована методика [2, 3] и записи «типичных» землетрясений», произошедших на расстояниях 13...20 км от объектов строительства. Грунты под площадками отнесены ко II категории по сейсмическим свойствам, отличающиеся особенностями в амплитудно-частотных характеристиках (АЧХ) среды. Для всех акселерограмм энергетические спектры имели один ярко выраженный максимум в ограниченном интервале частот. Ширина спектра δf с максимальной плотностью энергии оказалась мало зависимой от выбора начальных условий (типичного землетрясения и эпицентрального расстояния). В то же время наблюдаемые различия в спектральных свойствах энергетических спектров для отдельных площадок строительства, вероятнее всего связаны с особенностями АЧХ локальной среды под объектами, по-разному усиливающими или гасящими сейсмические колебания в зависимости от их спектрального состава. Для всех акселерограмм максимумы энергетических спектров по вертикальной составляющей сдвинуты в область более высоких частот по сравнению с радиальной и тангенциальной.

В дальнейшем предполагается исследовать спектральные свойства акселерограмм, смоделированных для скальных и рыхлых грунтов, оценить вклад различных условий очага и локальной среды в характеристики энергетических спектров сейсмических воздействий, установить статистические зависимости между характеристиками спектров ускорений и спектров реакций сейсмических колебаний. Для задач инженерной сейсмологии необходимо также разработать математические модели систем средних энергетических спектров с учетом разных категорий грунта для возможного расчета и картирования вероятностной

спектральной сотрясаемости по Ю.В. Ризниченко [7].

Литература

1. Будівництво в сейсмічних районах України. ДБН України В.1.1.14-2014 / науковий керівник Ю.І. Немчинов. – [Чинні від 2014-10-01]. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. – VI.– 110 с. – (Будівельні норми України).
2. Пустовитенко Б.Г. Методология и методические основы моделирования сейсмических воздействий на высотные здания в Крыму / Б.Г. Пустовитенко, В.Е. Кульчицкий, И.В. Калинюк, Е.А. Мержей, А.А. Пустовитенко // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво), Вип.73.– Київ: ДП НДІБК, 2010. – С. 316-323.
3. Пустовитенко Б.Г. К прогнозу ожидаемых сейсмических воздействий от сильных землетрясений Крыма / Б.Г. Пустовитенко, Е.А. Мержей // Доповіді Національної Академії Наук України, 2014. – №5. – С.102-109.
4. Пустовитенко Б.Г. О подобии очагов слабых и сильных землетрясений Крыма / Б.Г. Пустовитенко // Сучасні небезпечні процеси. Вплив на довкілля. Нові технології прогнозування та захисту (Матеріали 2 науково-техніч. конференції). – Київ: НПП «Екологія. Наука. Техніка», 2004. – С. 59-61.
5. Пустовитенко Б.Г. Сравнительные характеристики акселерограмм, смоделированных для разных сеймотектонических условий / Б.Г. Пустовитенко, В.Е. Кульчицкий, И.В. Калинюк, Е.А. Мержей // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2012. – №6. – С. 20-23.
6. Пустовитенко Б.Г. Моделирование прогнозных воздействий сильных землетрясений Крыма / Б.Г. Пустовитенко, И.В. Калинюк, Е.А. Мержей // Строительство и техногенная безопасность. Выпуск 35. – Симферополь: НАПКС, 2011. – С.104–111.
7. Ризниченко Ю.В. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности / Ю.В. Ризниченко, С.С. Сейдузова. – Москва: Наука, 1984. – 180 с.
8. Aki K. Scaling law of seismic spectrum / K. Aki, J. Geophys. Res. – 1967. – Vol. 72. – №4. – P. 1217–1231.
9. Пустовитенко Б. Г. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма / Б.Г. Пустовитенко, Т.А. Пантелеева. – Киев: Наукова думка, 1990. – 249 с.
10. Пустовитенко Б.Г. Энергетические спектры землетрясений и возможность их использования в задачах моделирования сейсмических воздействий / Б.Г. Пустовитенко, Э.Э. Эреджепов // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Київ: ДП НДІБК, 2015. – Вип.82. – С. 67-73.
11. Пустовитенко Б.Г. Новые карты общего сейсмического районирования территории Украины. Особенности модели долговременной сейсмической опасности / Б.Г. Пустовитенко, В.Е. Кульчицкий, А.А. Пустовитенко // Геофизический журнал. – 2006. – Т. 28. – № 3. – С. 54-77.
12. Ратникова Л.И. Методы расчета сейсмических волн в тонкослоистых средах / Л.И. Ратникова. – М.: Наука. – 1973. – 124 с.
13. Аптикаев Ф.Ф. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта / Ф.Ф. Аптикаев, Н.В. Шебакин // Исследования по сейсмической опасности (Вопросы инженерной сейсмологии, вып.29). — М: Наука, 1988. – С. 98-107.
14. Хачиян Э.Е. Прикладная сейсмология / Э.Е.Хачиян. – Ереван: Изд. ГИТУТЮН НАН Республики Армения, 2008. – 491 с.

Стаття надійшла 17.07.2016