

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э.

Институт сейсмологии и геодинамики КФУ им. В.И. Вернадского  
ГАОУ «Крымский экспертный совет по оценке сейсмической опасности  
и прогнозу землетрясений»  
г. Симферополь

**АНОТАЦИЯ:** Для вдосконалення методики моделювання сейсмічних дій запропоновано використовувати енергетичні спектри місцевих землетрусів. Наведено характеристики основних параметрів енергетичних спектрів: переважаючих періодів  $T_{\max}$  і ширини максимуму спектра  $\Delta T_q$ , а також їх зв'язок з енергією землетрусів.

**АННОТАЦИЯ:** Для совершенствования методики моделирования сейсмических воздействий предложено использовать энергетические спектры местных землетрясений. Приведены характеристики основных параметров энергетических спектров: преобладающих периодов  $T_{\max}$  и ширины максимума спектра  $\Delta T_q$ , а также их связь с энергией землетрясений.

**ABSTRACT:** It is proposed to use the energy spectra of the set of local earthquakes to improve modeling seismic effects. Characteristics of the main parameters of energy spectra: the prevailing periods  $T_{\max}$  and the width of the spectrum maximum  $\Delta T_q$ , as well as their correlation with the energy level of earthquakes have been presented.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** энергетический спектр, ширина спектра, акселерограмма.

## ВВЕДЕНИЕ

Использование энергетических спектров землетрясений в задачах инженерной сейсмологии было предложено Ю.В. Ризниченко [1]. Им разработан переход от энергетических спектров к спектрам ускорений и к спектрам реакции сооружений, а также методика спектрально-временного моделирования прогнозных сейсмических колебаний, расчета и картирования вероятностной спектрально-временной сотрясаемости [1].

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 сейсмических колебаний и с макросейсмической интенсивностью, являющейся в настоящее время основной характеристикой оценки сейсмической опасности.

При строительстве особо ответственных и экологически опасных зданий и сооружений знаний только макросейсмической интенсивности недостаточно для описания возможного сейсмического воздействия. Необходимо знать и учитывать спектральные особенности сейсмических колебаний, задаваемых в виде акселерограмм в соответствии с требованиями государственных нормативных документов для строительства [2].

Для выполнения этих требований в Крыму разработана методика моделирование прогнозных акселерограмм с учетом специфики местных сеймотектонических условий, спектральных свойств и закономерностей сейсмических колебаний от совокупности слабых землетрясений [3]. В настоящей статье рассмотрены возможности совершенствования разработанной методики с привлечением статистических свойств не только амплитудных, но и энергетических спектров землетрясений.

## МЕТОДИКА

Согласно условию геометрического подобия [4] в логарифмической системе координат форма спектров энергии не должна изменяться, т.е. в этом смысле формы энергетических спектров зарегистрированных слабых толчков и прогнозируемых сильных будут подобны.

Как указано в работе [1], при изображении энергетического спектра в логарифмическом масштабе частот (периодов) площадь между спектральной кривой для абсолютных значений плотностей и осью частот в любом интервале  $\lg(\omega)$ ,  $(\lg(T))$  пропорциональна сейсмической энергии, приходящейся на данный диапазон частот.

Переход от спектральной плотности к энергетическому спектру осуществляется следующим образом:

$$q = \frac{\rho c}{2\pi l g e} \omega^3 \Omega^2(\omega) \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность пород в окрестности очага,

$c$  – скорость распространения объемных волн ( $P$  или  $S$ ),

$\Omega(\omega)$  – модуль спектральной плотности, определяемый из амплитудного спектра записи.

Для исключения осцилляций энергетические спектры сглаживаются скользящим осреднением в пределах октавной ширины по оси частот и изображаются в билогарифмической системе координат (рис. 1). Методика и алгоритм расчета энергетических спектров, их обработка и построение системы спектров описаны в [5, 6].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По данным аналоговой регистрации сейсмических колебаний за период с 1955 по 2001 г. рассчитано более 600 энергетических спектров местных землетрясений и построена теоретическая система их средних спектров по данным станции «Ялта» для компактной группы очагов [5].

Для большинства изученных землетрясений Крыма характерна резонансная форма энергетических спектров с одним ярко выраженным максимумом в ограниченной области периодов (частот) с завалом в обе стороны [6].

При построении системы прогнозируемых спектров энергии необходимо учитывать общие долговременные свойства параметров спектров, таких, как преобладающий период  $T_{\max}$ , соответствующий максимуму энергетического спектра и ширина максимума спектра  $\Delta T q$  на уровне  $1/3$  от максимального значения  $q$  в высокочастотной ( $T_{q1}$ ) и низкочастотной ( $T_{q2}$ ) части спектра:

$$\Delta T q = T_{q1} - T_{q2}.$$

По аналоговым записям объемных сейсмических волн для компактной группы очагов получена прямая связь периода  $T_{\max}$  с энергетическим классом землетрясения  $Kп$  [6]:

$$\lg T_{\max} = (0,023 \pm 0,007) Kп - (0,79 \pm 0,05) \quad (2)$$

Уравнение рассчитано методом ортогональной регрессии с коэффициентом корреляции  $\rho=0,78$ . Использовано 112 пар значений по данным станция «Алушта», эпицентральных расстояния  $(20 \pm 5) км$ .

Другой энергетический параметр – ширина спектра  $\Delta T q$  также оказался прямо связанным с энергетическим уровнем землетрясения:

$$\Delta T q = (0,031 \pm 0,003) Kп + (0,28 \pm 0,09), \rho = 0,82 \quad (2)$$

Регрессионное уравнение получено с использованием 185 пар значений по записям станции «Ялта» землетрясений центральной части региона без ограничения эпицентральных расстояний, поскольку явной зависимости  $\Delta T q$  от расстояния не было выявлено.

Используя формулы (1) и (2) ориентировочно получим, что при сильном землетрясении в Крыму с прогнозной магнитудой  $M=7,0$  ( $Kп \sim 17$ ), которое может произойти в центральной части региона на расстоянии  $(20 \pm 5) км$ , максимум энергии в сейсмических колебаниях на сейсмостанции «Алушта» будет приходиться на диапазон периодов  $T_{max} = 0,3 \dots 0,6 с$  (с учетом погрешностей) при среднем значении  $T_{max} = 0,4 с$ . При этом средняя ширина максимума энергетического спектра по записи на станции «Ялта» составит  $\Delta T q$  от 0,75 с до 1 с.

Правомочность использования закономерностей по энергетическим спектрам, полученных по материалам аналоговой регистрации сейсмических колебаний, в современный период цифровой регистрации проверена по параллельным записям землетрясений 2007 года аналоговыми и цифровыми сейсмографами, установленными на одном постаменте на сейсмостанции «Алушта». Пример спектров местного землетрясения 07 ноября 2007 г. с  $Kп=9,6$  приведен на рис. 1.

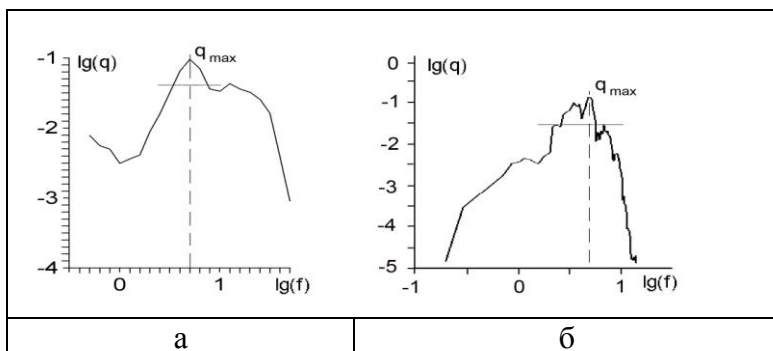


Рис. 1. Энергетические спектры землетрясения 07.11.2007г по записям: а–аналоговой регистрации; б–цифровой. Пунктиром отмечен максимум спектра, а сплошной горизонтальной линией – его ширина  $\Delta T q$

Видно, что энергетические спектры по аналоговым и цифровым сейсмографам отличаются только в деталях, а частоты, соответствующие  $q_{max}$  полностью совпадают ( $lg f = 0,7, f = 5 Гц$  или  $T_{max} = 0,2 с$ ). Это же относится и к ширине спектра: по аналоговой записи  $\Delta T q$  соответствует

диапазону от 3 Гц до 7,8 Гц, а по цифровой – от 2,9 Гц до 7,5 Гц, что находится в пределах погрешностей определяемых величин.

Расчетные значения параметров спектров  $T_{max}$  и  $\Delta Tq$  по формулам (1) и (2) для  $Kп=9,6$  также попадают в диапазон значений для данного энергетического уровня. Ранее в работе [7] была показана преимущество установленных свойств и закономерностей только для амплитудных спектров, теперь же можно это распространить и на энергетические спектры, существенно дополнив базу экспериментальных данных.

Рассмотрим особенности станционных энергетических спектров землетрясения 17 марта 2014 г. с  $Kп=9,8$ , произошедшего в центральной зоне Крымского региона на расстоянии около 20км от ЮБК (рис. 2).

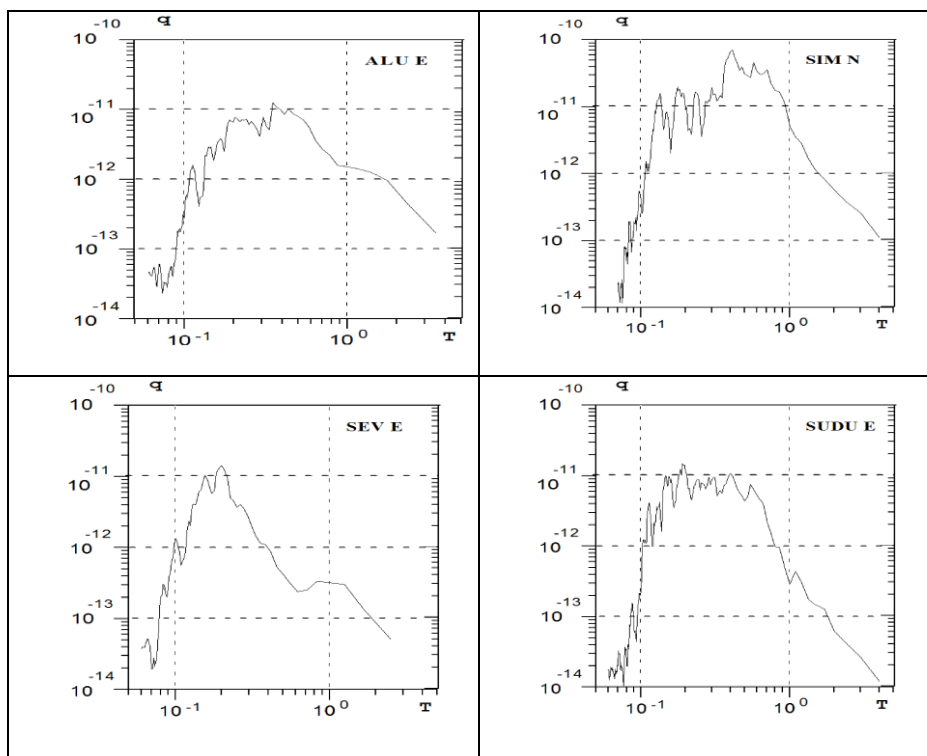


Рис. 2. Энергетические спектры землетрясения 17 марта 2014г с  $Kп=9,8$  по записям цифровых сейсмостанций: «Алушта» (ALU), «Симферополь» (SIM), «Севастополь»(SEV), «Судак»(SUDU)

Прежде всего, можно отметить, что станционные энергетические спектры, несмотря на подобие по форме отличаются по главным пара-

метрам  $T_{\max}$  и  $\Delta T$  q. Так, максимум энергии по записям станции SEV сдвинут в сторону более высоких частот, а ширина его спектра самая узкая и находится в диапазоне периодов  $\Delta T q = (0,15 \dots 0,28) c$ . Наибольшая ширина спектра получена по записи SUDU:  $\Delta T q = (0,15 \dots 0,6) c$  при  $T_{\max} = 0,3 c$ . По станции SIM максимум спектра и его ширина  $\Delta T q$  сдвинуты в область наибольших периодов:  $T_{\max} = 0,4 c$ ,  $\Delta T q = (0,3 \dots 0,7) c$ . Характеристики энергетического спектра по станции ALU имеют промежуточные значения, близкие к средним по группе станций и к расчетным – по формулам (1) и (2). Установить долговременные станционные особенности и общие свойства энергетических спектров по записям всех региональных станций Крыма возможно только на большом статистическом материале, что входит в задачи дальнейших исследований.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для совершенствования методики моделирования расчетных акселерограмм, необходимых в практике сейсмостойкого строительства ответственных и экологически опасных объектов предполагается использовать энергетические спектры совокупности местных землетрясений. Для установления общих свойств их параметров, построения системы спектров и установления корреляционных связей с энергетическим уровнем землетрясений необходимы длительные ряды наблюдений и достаточно полные статистические данные. Это можно достичь слиянием баз данных по записям цифровой и аналоговой регистрации на основе их идентичности, установленной в данной работе. В дальнейшем предполагается изучить и корректно учесть особенности станционных спектров, их пространственно-временные и энергетические свойства в практических задачах инженерной сейсмологии, в частности, для совершенствования методики моделирования акселерограмм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ризниченко Ю.В. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности / Ризниченко Ю.В., Сейдузова С.С. – М.: Наука, 1984. – 180 с.
2. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1 – 14:2014 / науковий керівник Ю.І. Немчинов. - [Чинні від 2014-10-01]. – К.: Мінрегіон України, 2014. - VI, – 110 с. – (Будівельні норми України).
3. Методология и методические основы моделирования сейсмических воздействий на высотные здания в Крыму / [Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Калинин И.В. и др.] // Будівельні конструкції: зб. наук. праць. – К.: ДП НДІБК. – 2010. – Вип. 73. – С. 316–323.

4. Aki K. Scaling law of seismic spectrum / Aki K. // J. Geophys. Res. – 1967. – Vol. 72, №4. – P. 1217–1231.
5. Пустовитенко Б.Г. Теоретические системы средних энергетических спектров по данным Крымского региона / Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А., Спиртус В.Б. // Землетрясения Украины в 1991. – Киев: Наукова думка, 1995. – С. 85–91.
6. Пустовитенко Б.Г., Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма / Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. – К.: Наукова думка, 1990. – 249 с.
7. Пустовитенко Б.Г. О преемственности долговременных закономерностей по очаговым параметрам землетрясений в эпоху цифровой регистрации / Пустовитенко Б.Г., Мерзей Е.А. // Геодинамика, №1(14). - 2013. – С. 124–128.

### REFERENCES

1. Riznichenko Y.V. Spectral-temporal characterization of seismic hazard / Riznichenko Y.V., Seyduzova S.S. – M: Nauka, 1984. – 180 p.
2. Construction in seismic regions of Ukraine: State building codes B. 1.1–14: 2014 / scientific chief Yu.I. Nemchinov. - [Valid from 2014-10-01]. – K.: Minregion of Ukraine, 2014. - VI, – 110 p. – (Building norms of Ukraine).
3. Methodology and methodological foundations of modeling of seismic impacts on the high-rise building in the Crimea / [Pustovitenko B.G., Kulchitskiy V.E., Kalinyuk I.V. and oth.] // Building construction: The collection of scientific works. – K.: DP NDIBK. – 2010. – Vol. 73. – P. 316–323.
4. Aki K. Scaling law of seismic spectrum / Aki K. // J. Geophys. Res. – 1967. - Vol. 72. №4. – P. 1217–1231.
5. Pustovitenko B.G. Theoretical systems of average energy spectra by Crimean region data / Pustovitenko B.G., Panteleyeva T.A., Spirtus V.B. // Earthquakes of Ukraine in 1991. – Kiev: Naukova Dumka, 1995. – P. 85–91.
6. Pustovitenko B.G. Spektrum and source parameters of Crimean earthquakes / Pustovitenko B.G., Panteleeva T.A. – Kiev: Naukova Dumka, 1990. – 249 p.
7. Pustovitenko B.G. On continuity of long-time regularities by earthquake source parameters in the era of digital recording / Pustovitenko B.G., Merzhey E.A. // Geodynamics, №1 (14), 2013. – P. 124–128.

Статья поступила в редакцию 24.07.2015 г.