

С.В. Мишин, И.М. Хасанов

(Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н.А.Шило; e-mail: mishin@neisri.ru)

О ДЕЙСТВИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Анализируются некоторые аспекты действия сейсмического излучения на материальные объекты. Описываются результаты экспериментов по регистрации последствий ударов и взрыва. Материал может быть полезен при решении проблем техносферной безопасности.

Ключевые слова: механический импульс, ньютоновские силы, сотрясение, разрушение, удар.

S.V. Mishin, I.M. Khasanov

ON THE ACTION OF SEISMIC RADIATION

Analysis of some aspects of seismic radiation' action to material objects is carried out. Experiments' results of registration of shock and blast effects is described. The material can be helpful in solving the problems of technosphere safety.

Key words: momentum, Newton's forces, tremble, destruction, blow.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 11 марта 2015 г.

Землетрясения относят к разряду бедствий, в первую очередь, из-за того что некоторые толчки разрушают сооружения, созданные человеком для своих нужд. К подобным результатам приводят также взрывы и даже удары массивных тел. Интенсивность сейсмических воздействий оценивается ныне в баллах на основе макросейсмических шкал, например, на основе шкалы *MSK-64* [1]. Шкала представляет набор эмпирических сведений о результатах наблюдений за последствиями землетрясений прошлого; установлены количественные связи баллов со значениями смещений, скоростей движения частиц и их ускорениями, регистрируемыми инструментально. Однако не вполне ясно, почему строения разрушаются при таких кинематических параметрах – все тела на Земле обладают огромными скоростями и ускорениями при движении планеты, оставаясь при этом в относительном покое. Физический смысл понятия балла в сейсмологии не раскрывается.

Сейсмическое излучение

Землетрясение, взрыв, удар являются источниками сейсмического излучения, в этих источниках формируется волновой пакет, который распространяется в невозбужденные зоны окружающей среды. Рис. 1 иллюстрирует распространение излучения, сформированное при взрыве, которое представлено в виде сводной сейсмограммы, полученной при взрыве заряда ВВ, зарегистрированного 120 сейсмоприемниками, равномерно расставленными вдоль профиля длиной около 3 км [2]. Особенностью трассы распространения явилось то, что профиль проходил в зоне вечной мерзлоты, галечник в грунте был сцемен-

тирован и характеризовался высокой жесткостью. Профиль пересекал русла двух небольших рек. Грунт, складывающий русла, оттаял, стал мягким и податливым, его сейсмическая жёсткость (произведение плотности на скорость поперечной волны) уменьшилась в несколько раз. Волновой пакет представляет собой возбуждения разного типа – волны распространяются с разной скоростью, причем на участках талого грунта (зоны А и Б) происходят обмены типов волн. Подобные процессы характерны и для излучения из очагов землетрясений.

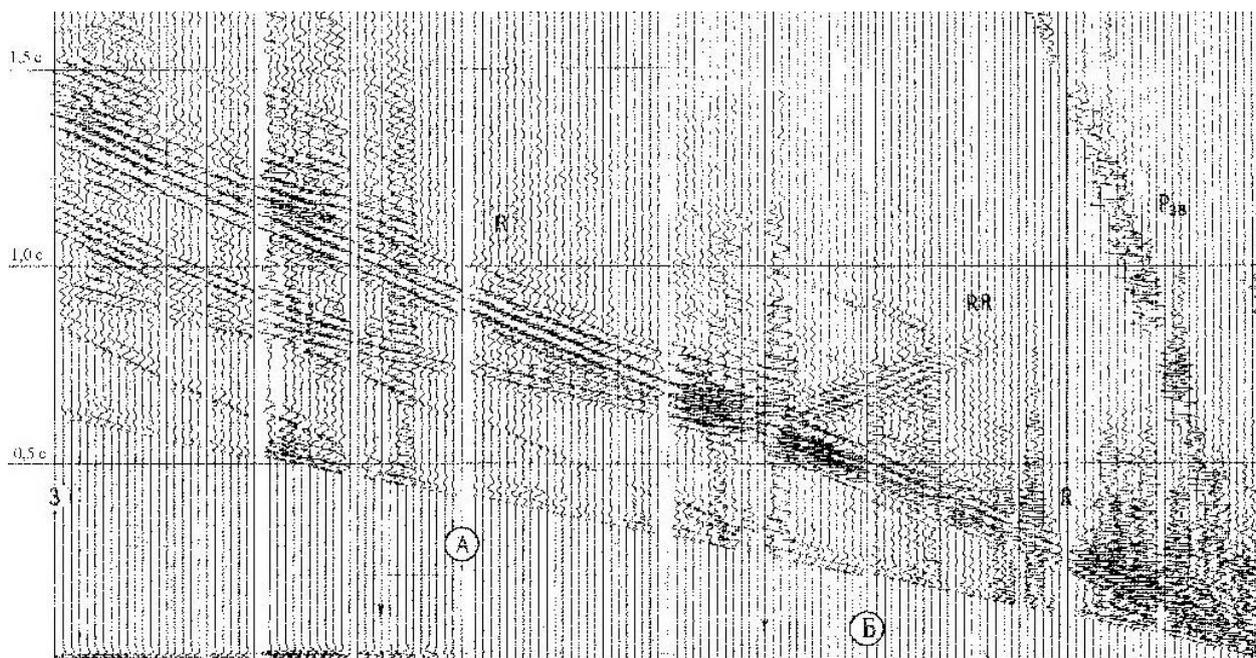


Рис. 1. Распространение сейсмического излучения, сформированного при взрыве

Действие сейсмического излучения

Сейсмическое излучение распространяется в сплошной среде и действует на элементы этой среды. Рассмотрим простой пример – разбивание камня с использованием молотка и зубила. Камень разбивается не молотком (молоток не касается камня) и не зубилом (трещины распространяются вне контакта камня с зубилом), а сейсмическим излучением, сформированным на обушке зубила при ударе и распространившемся вдоль зубила как вдоль проводника сейсмического излучения. В материале зубила и затем в камне распространяется механический импульс (количество движения), приобретенный обушкой зубила при ударе. При передаче импульса P от возбужденных элементов невозбужденным действует ньютоновская сила $F = dP/dt$, которая и может привести к разрушению структуры камня. Избыток импульса отмечается в разлете обломков тела. Было показано экспериментально [3], что амплитуды сейсмических сигналов пропорциональны не энергии удара, а переданному импульсу. Таким образом, сейсмическое излучение есть распространение в сплошной среде механического импульса. Ньютоновские силы вызывают смещения элемен-

тов среды, в которой распространяется импульс, а когда действующие силы превосходят связи между ними, происходят разрывы сплошности.

Результаты сейсмических воздействий на инженерные сооружения рассматриваются в многочисленных отчетах инженеров-сейсмологов. Одно из интереснейших описаний такого результата приведено в работе Rojahn C. and Mork P.N. [4].

В г. Эль-Центро (штат Калифорния, США) по последнему слову строительной техники было возведено административное здание округа Империял. Проектируя это здание, инженеры использовали сейсмограммы сотрясений грунта при землетрясении 1940 г. Сейсмологи оборудовали построенное здание регистрирующей аппаратурой, фиксирующей ускорения движения элементов массы.

15 октября 1979 г. в Империял Вэлли, неподалеку от Эль-Центро, сильное землетрясение магнитудой 6,6 вызвало интенсивное сотрясение здания, в результате которого здание оказалось сильно поврежденным, а процесс сотрясения был зарегистрирован акселерографами, размещенными в разных зонах сооружения. Четыре сейсмоприемника на крыше фиксируют ускорение элементов здания в горизонтальной плоскости. Расстановка приборов на втором этаже аналогичная, а на грунте в основании здания, кроме горизонтальных ускорений, прибором 12 регистрировались и вертикальные.

Из акселерограмм, приведенных на рис. 2, видно, что во время разрушительного сотрясения ускорения движения разных элементов здания изменялись по разным законам.

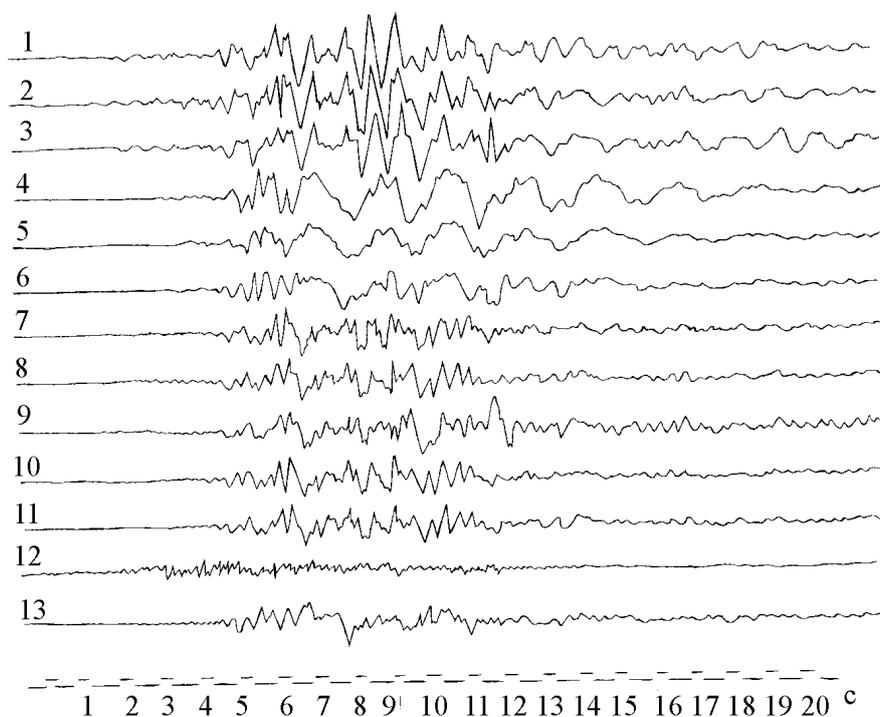


Рис. 2. Акселерограммы сотрясения разных элементов конструкции здания во время землетрясения в г. Эль-Центро в 1979 г.

Две основные особенности отличают проектирование сейсмостойких сооружений от других видов инженерного проектирования. Одна из них связана с огромным разбросом или неопределенностью ожидаемых сейсмических возмущений, другая – с огромным количеством элементов и связей между ними в современном строении. Даже зная наперед детальные характеристики предполагаемого сейсмического излучения, мы не можем уверенно гарантировать безопасность сооружения. Современные знания о свойствах строительных конструкций крайне ограничены. Все это приводит к широкому применению вероятностных методов в задачах сейсмостойкого строительства. Традиционная маскировка неопределенности результата за детерминистской формой расчёта в вопросах сейсмостойкости особенно мало оправдывает себя [5].

Рассмотрим сотрясения модели сооружения, в которой система связанных масс представлена двумя парами жестких квадратных рамок, соединенных во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 3) [3]. Система опирается на стол легкими ножками, через которые возбуждение уходит во внешнюю среду. На одной из реек в нижней части системы укреплен сейсмоприемник СВ-30, выполняющий роль излучателя. На катушку этого сейсмоприемника подаются импульсы электрического тока, вызывающие удары катушки об ограничитель. Сотрясения системы регистрируют сейсмоприемники СВ-10, укрепленные в выбранных точках сотрясающейся системы.

В правой части рис. 3 приведены сейсмограммы сотрясений, зарегистрированных в трех точках этой установки. Верхняя сейсмограмма иллюстрирует процесс сотрясения в точке А (узел системы), средняя – в точке Б (середина верхнего линейного элемента), нижняя – в точке В, произвольно выбранной в конструкции. Сопоставление сейсмограмм позволяет утверждать, что сотрясения, вызываемые в системе сейсмическим воздействием, существенно различаются в разных точках системы амплитудами, частотным составом и продолжительностью.

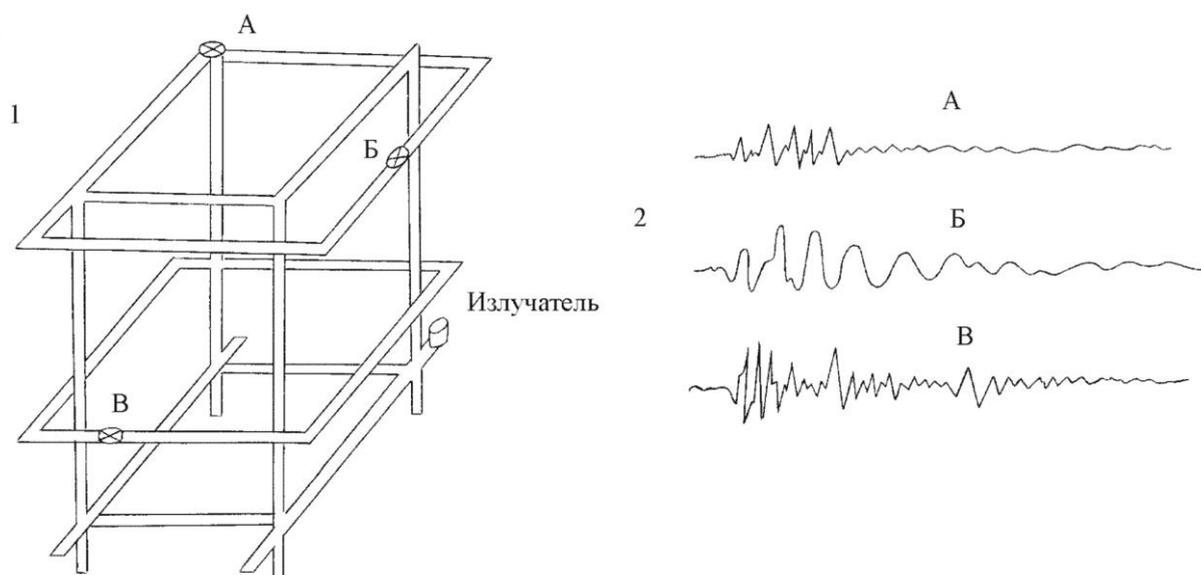


Рис. 3. Сотрясение модели сооружения:
1 – схема модели; 2 – сейсмограммы сотрясения в разных точках

Количественно описать движение элемента системы на основе волнового уравнения практически невозможно. Проще и нагляднее моделировать сотрясения простой системы, суммируя сигналы, распространяющиеся по разным траекториям. Предположим, что система приобретает в источнике количество движения в виде определенной функции $P(t)$; этот импульс распространяется в элементах системы со скоростью продольных волн v_p . В узлах системы часть импульса отражается, то есть распространяется в обратном направлении, а оставшаяся часть передается через сочленение в другие элементы системы. В основе расчётов лежит предположение, что общее количество движения, полученное системой, непрерывно перераспределяется в разных её частях за счёт множества пробогов по элементам системы и отражений в узлах. В любую точку системы импульс попадает сначала по кратчайшей траектории, а затем с соответствующим запозданием приходит и по другим путям. В разные моменты времени в произвольной точке (например, в точке В на рис. 3) протекает разное количество движения и, соответственно, действует переменная ньютоновская сила $F = dP/dt$. Действие этой силы может привести к движению элемента массы в точке В, которое и регистрирует прибор на сейсмограмме.

На рис. 4 представлены результаты расчётов.

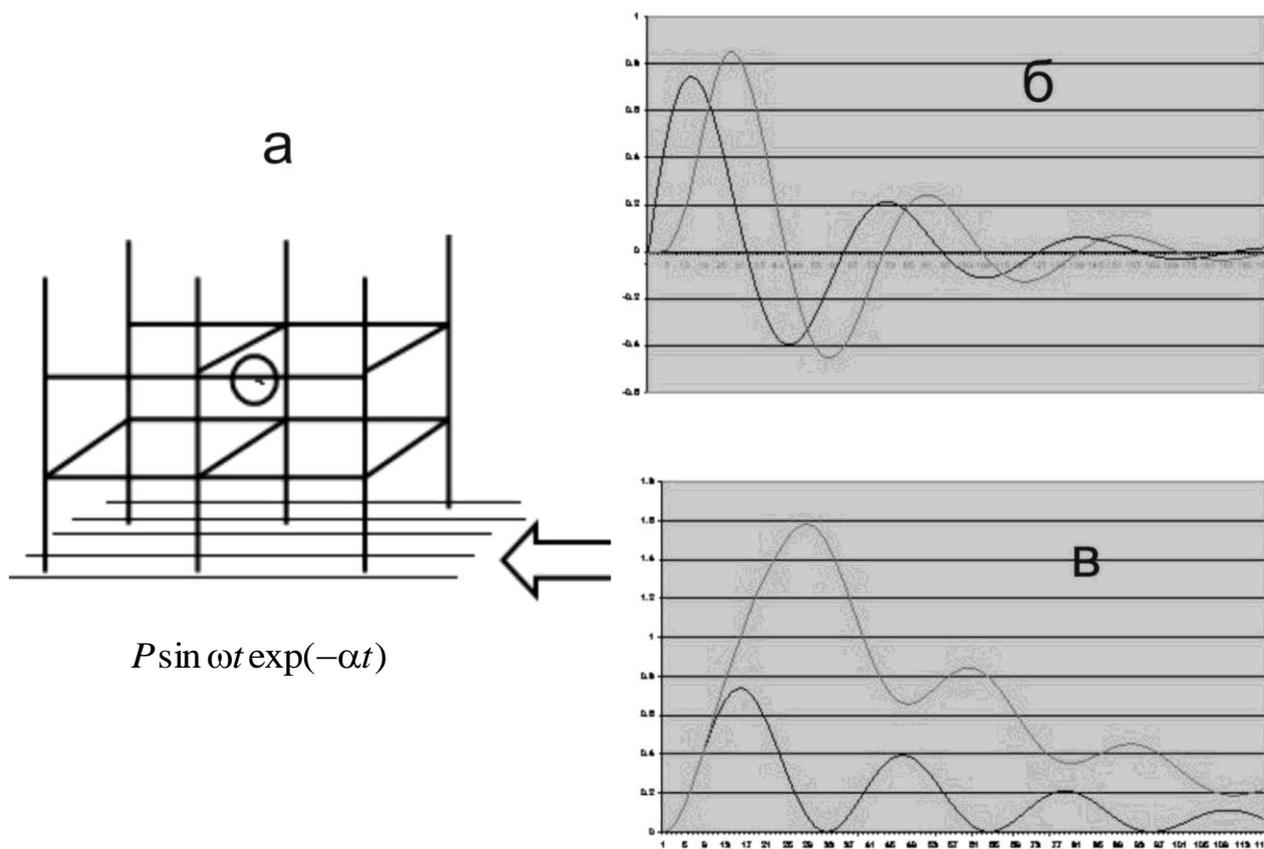


Рис. 4. Моделирование сотрясений каркасной конструкции:
а – модель сооружения; *б, в* – расчётные сотрясения при разной форме волн

На схеме 4а представлен каркас, который сотрясается при распространении волн заданной формы. Рис. 4б и 4в иллюстрируют характер движений в зоне каркаса, выделенной кружком; формы волн, рассчитанных для диаграмм 4б и 4в, различались значениями ω и α . Из рисунков видно, что сотрясения в каркасе (слабая линия) оказываются больше, чем сотрясения грунта (тёмная линия).

Разрушения массивных тел ударами

Сейсмическое излучение – это удар, распространяющийся в сплошной среде со скоростью сейсмических волн. Частицы среды приобретают механический импульс и действуют на соседей с силой, пропорциональной скорости изменения этого импульса. Поэтому можно моделировать сейсмическое действие ударами по материальным телам, чтобы отмечать характер разрушений этих тел. На рис. 5 представлены результаты нескольких экспериментов по разрушению образцов ударами.

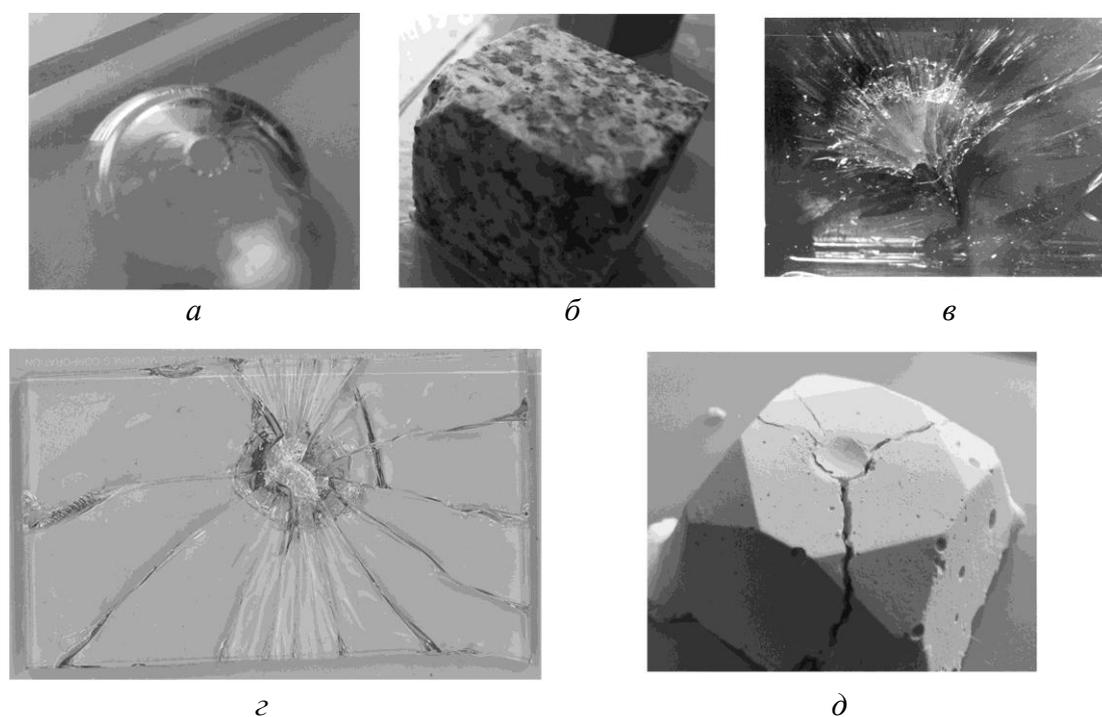


Рис. 5. Разрушения образцов ударами:
а – коническая трещина; *б* – откол вершины гранитного кубика;
в – трещины в образце канифоли; *г* – радиальные трещины в стекле;
д – разрушение образца белого цемента

Рис. 5а – коническая трещина в стеклянном образце, появляющаяся после удара по его поверхности стальным шаром. Сейсмическое излучение вырывает из сплошного тела фигуру закономерной формы.

Рис. 5б иллюстрирует результат удара по верхней поверхности сплошного гранитного кубика – произошел откол вершины образца. Такие результаты отмечаются нередко; они свидетельствуют о том, что сейсмическое излучение, многократно отражаясь от стенок образца, создают концентрированные усилия вблизи углов испытываемого тела.

Рис. 5в демонстрирует сложную картину трещин в образце канифоли, возникающих после наклонного удара по поверхности образца. Распределение трещин связывается с неоднородностями структуры канифоли.

Радиальные трещины появляются при разрушении образцов конечных размеров. На рис. 5г радиальные трещины распространяются от площадки удара к краям тела – отколотые обломки тела смещаются от центра к периферии.

Рис. 5д демонстрирует результат удара шарика по поверхности кубика алебаstra – видна вмятина на площадке удара и трещины, разделяющие образец на части. Такой же результат может быть получен медленным вдавливанием шара в образец.

Трещины, как и разломы в земных недрах, разделяют неразрушенные части тел, это следы сместившихся масс. Конические трещины в стекле очень тонки, они "залечиваются" при нагревании образцов. Радиальные трещины определяются формой образцов – характером внешней свободной от нагружения поверхности.

Заключение

Сейсмическое излучение представляет собой распространение механического импульса в сплошной среде. Это удар, распространяющийся из источника в невозбужденные зоны среды. На поверхности фронта распространения волн действуют ньютоновские силы, производные импульса по времени. Механический импульс имеет две формы: поступательный импульс – количество движения и вращательный импульс – момент количества движения. Скорости распространения этих форм различны, количество движения распространяется со скоростью продольных волн, а момент количества движения – со скоростью волн поперечных. Поступательное и вращательное движения взаимнообратимы. Продольная волна действует силой в направлении движения, а поперечная волна действует моментом силы, то есть перпендикулярно направлению распространения. Попадая в сложную конструкцию, разделенную пустотами, излучение меняет направления распространения, ударяет, отражаясь, свободные поверхности, приводит к смещениям элементов конструкции и к разрушению ослабленных зон.

Литература

1. *Сейсмическая* шкала и методы измерения сейсмической интенсивности. М.: Наука, 1975. 192 с.
2. *Седов Б.М., Чулков Г.Ф., Мишин С.В.* Экспериментальные данные о взаимных обменах продольных и поверхностных волн / Изв.АН СССР, Физика Земли, 1976, № 8. С. 104-107.
3. *Мишин С.В.* О физике сейсмических процессов. Эксперименты и модели. Lambert Academic Publishing, 2013. 196 с.
4. *Rojahn C., Mork P.N.* An analysis of strong-motion data from a severely damaged structure, the Imperial County Services Building, El Centro, California: U.S. Geological Survey. 1981, Open-Fill Report. Pp. 81-194.
5. *Поляков С.В.* Сейсмостойкие конструкции здания. М.: Высшая школа, 1969. 333 с.