

## СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ В ИНЖЕНЕРНЫХ ОБЪЕКТАХ СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### *Александр Федорович Еманов*

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор технических наук, директор филиала, тел. (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

### *Александр Александрович Бах*

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, старший научный сотрудник, тел. (913)713-51-09, e-mail: abakh61@mail.ru

По результатам исследований на сложных инженерных объектах получены результаты, демонстрирующие значительные отклонения от моделей зданий и сооружений, принятых в основу расчёта сейсмостойкости и устойчивости конструкций. Во-первых, это существование отражающих сейсмические колебания границ внутри здания, когда стоячие волны формируют общее поле для здания в целом и локальное поле для части объекта. Во-вторых, блочное строение объекта, когда есть собственные колебания разной кратности с разной областью охвата объекта, когда некоторые блоки то независимо колеблются, то объединяются в одну систему. В-третьих, существование стен с двойными отражающими свойствами, что меняет поле стоячих волн. В-четвёртых, сложная геометрия объекта вызывает поля стоячих волн, не описываемые двумя волновыми числами. Экспериментальные данные показывают, что в теории зданий необходимо переходить к моделям вложенных резонаторов, моделям связанных резонаторов, а верификацию моделей возложить на метод стоячих волн.

**Ключевые слова:** инженерная сейсмология, сейсмостойкость зданий, стоячие волны, когерентность во времени, микросейсмы.

## STANDING WAVES IN ENGINEERING OBJECTS OF COMPLEX CONSTRUCTIONS

### *Alexander F. Emanov*

Altay-Sayan Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptug, Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Branch Director, phone: (383)333-27-08, e-mail: emanov@gs.nsc.ru

### *Alexander A. Bach*

Altay-Sayan Branch of Federal Research Center «United Geophysical Survey RAS», 3, Prospect Akademik Koptug, Novosibirsk, 630090, Russia, Senior Researcher, phone: (913)713-51-09, e-mail: abakh61@mail.ru

According to the results of research on complex engineering objects, results were obtained that demonstrate significant deviations from the models of buildings and structures adopted as the basis for calculating seismic resistance and structural stability. First, it is the existence of reflecting seismic oscillations of the boundaries inside the building, when standing waves form a common field for the building as a whole and a local field for a part of the object. Secondly, a block structure of the object, when there are natural oscillations of different magnification with a different area of the object's coverage, when some blocks independently oscillate, they unite into one system. Third-

ly, the existence of walls with double reflecting properties, which changes the field of standing waves. Fourthly, the complex geometry of the object causes fields of standing waves,  $e$  is described by two wave numbers. Experimental data show that in the theory of buildings, it is necessary to move to the models of nested resonators, models of coupled resonators, and the verification of models should be entrusted to the standing wave method.

**Key words:** engineering seismology, seismic resistance of buildings, standing waves, coherence in time, microseisms.

### *Введение*

В замкнутых объёмах формируются многократные отражения, и их интерференция приводит к формированию стоячих волн. Ещё в XIX веке была доказана общеизвестная теорема о независимости решения по стоячим волнам от начальных условий. Это означает, что стоячие волны, формирующиеся в инженерных сооружениях, не зависят от источника колебаний. Для поля стоячих волн не важно, где он размещён и какого типа источник используется.

В работах [3, 5] обосновывается методика наблюдений за микросейсмами, создаётся математическая модель волнового поля, строятся алгоритмы, позволяющие выделять стоячие волны в чистом виде и преобразовывать их из разновременных наблюдений в одновременные записи стоячих волн на плотной системе наблюдений, покрывающей заданную площадь или объём. Поскольку стоячие волны представляют из себя монохроматические колебания с некоторой добротностью, определяющей затухание колебаний во времени, то множество мод колебаний из общего поля отфильтровываются друг от друга и строятся карты для каждой из мод: амплитуд колебаний, фаз колебаний, добротности, когерентности. Построенный набор карт является основой для качественной интерпретации физического состояния здания по стоячим волнам.

Всё просто, когда здание имеет внешние границы простого строения, и мы наблюдаем набор стоячих волн, единый для всей конструкции. Иначе обстоит дело, когда в здании формируются поля стоячих волн от сложных резонаторов, какими могут быть вложенные друг в друга резонаторы, связанные в пространстве резонаторы, стоячие волны, формирующиеся в зданиях и инженерных объектах сложной геометрической формы, а также в случае стен сложной конструкции, когда изменение волнового поля за счёт кратного отражения колебаний внутри стены создает резонансные колебания неожиданной структуры.

### *Исследования*

Самыми простыми примерами сложных по полю стоячих волн объектов являются здания, внутри которых существует отражающая граница [6]. В данном случае формируется поле стоячих волн внутри другого поля. Такой результат был продемонстрирован для здания, над которым существует технический этаж и чердак. Основное поле стоячих волн (ряд мод) формируется для здания в целом и верх здания свободно колеблется. В этом случае в каждой моде на-

верху зданий полупериод с максимумом колебаний – на крыше. При этом узловые линии для каждой стоячей волны смещены вверх. Для вложенного поля стоячих волн верхняя граница представлена последним жилым этажом. Эта граница зажата и на ней нулевые колебания. Узловые линии для этих волн опущены вниз. Наличие границы приводит к существованию стоячих волн одной и той же кратности, но соответствующих разным объёмам зданий.

Распространённым усложнением конструкций здания является сейсмоизоляция при строительстве в сейсмически активных районах и строительство на сваях в районах мерзлоты [1, 2, 8, 9]. Мы сталкиваемся с примерами, когда фиксируется поле стоячих волн для всего здания в целом и поле стоячих волн части здания выше сейсмоизоляции [6].

На рис. 1 представлены данные об исследованиях методом стоячих волн двух рядом стоящих зданий одинаковой конструкции, блок 13-14 имеет сейсмоизоляцию в виде гибкого этажа, а блок 19-20 не имеет сейсмоизоляции.

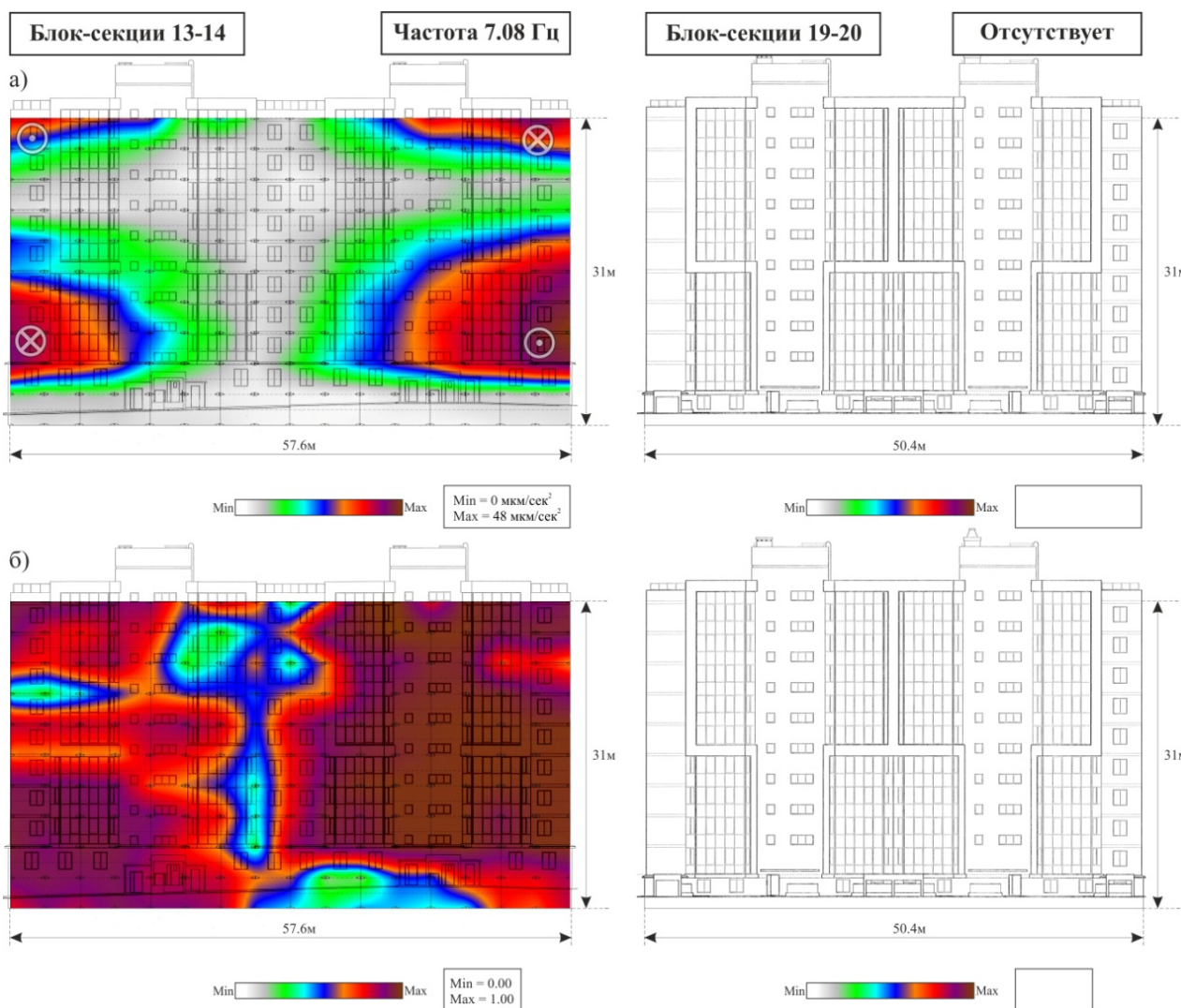


Рис. 1. Пример записи моды 2,2 для здания с сейсмоизоляцией, блок 13-14, и отсутствие такой моды для здания без сейсмоизоляции, блок 19-20:

а) карта амплитуд; б) карта когерентности

Для частоты 7,08 Гц наблюдается мода (2,2), кратная двум по длине здания и по его высоте, но выше гибкого этажа. Для этого здания мы наблюдаем две системы стоячих волн – одна для здания в целом, а другая в части здания над сейсмоизоляцией. Для блока 19-20 наблюдается только одна система стоячих волн для здания в целом. Спектр когерентности показывает, что имеется связь колебаний верхней части здания с колебаниями сейсмоизоляции. В центре здания эта связь ослаблена, а по краям усилена.

Другим примером сложного объекта являются здания со сложным строением стен. Для одного из служебных зданий технического университета в Томске фиксируются две моды одного порядка (3,1).

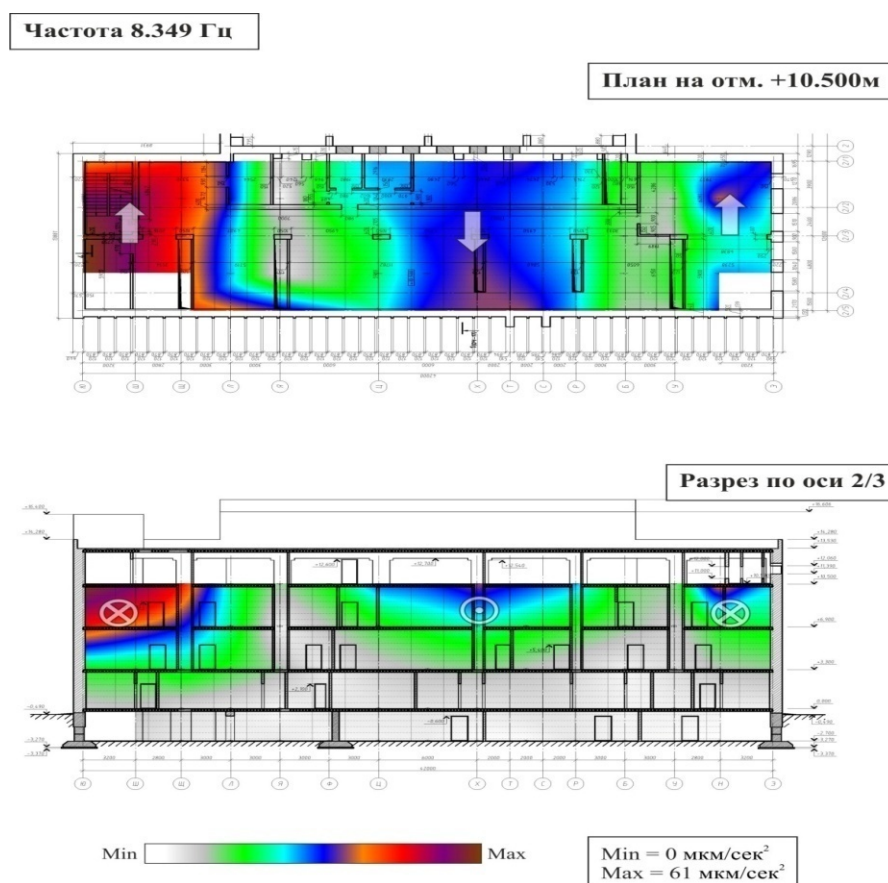


Рис. 2. Мода (3,1) для здания в г. Томске

На рис. 2 мы видим в двух измерениях данные о стоячей волне в здании с той особенностью, что свободные колебания испытывает не только верх здания, но и левая вертикальная стена здания. Низ и правая стена закреплены. Интересным является то, что для теоретических расчётов невозможным является обоснование таких граничных условий.

На рис.3 представлены данные о стоячей волне в этом же здании с той же кратностью, но картина иная. В данном случае свободные колебания у верха здания и правой стены, а левая стена и низ зажаты. Представленные данные го-

ворят о том, что сложно построенные стены могут вести себя двояко – отражать колебания внешней гранью и внутренней. В этом случае, вероятно, внешние отражения имеют свободу колебаний, а внутренние ведут себя как зажатые. В результате мы имеем резонансы в здании, которые не описываются теоретическими расчётами.

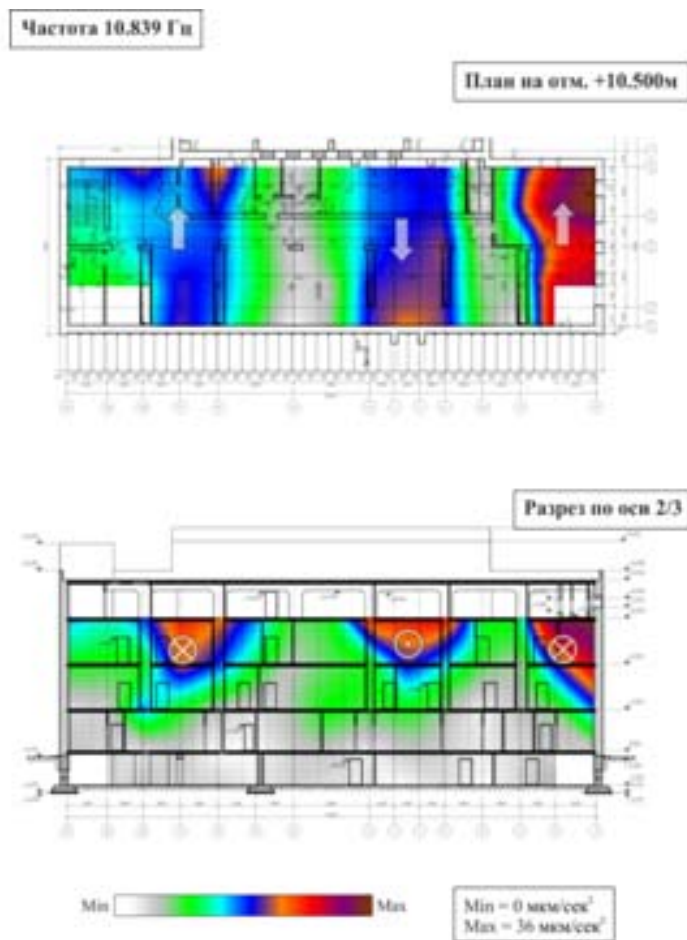


Рис.3 Мода (3,1) для здания в г. Томске  
(того же, что и на рис.2)

Ещё одним вариантом сложных объектов являются геометрически сложные и блочные конструкции. К таким конструкциям относятся, прежде всего, плотины ГЭС. Строение в виде трапеции, когда верх шире, чем низ, создают уникальные условия для формирования полей собственных колебаний, например, на Богучанской ГЭС [7]. Блочное строение приводит к тому, что ярко выраженная первая мода существует только в одном блоке, а с повышением кратности в единое колебание захватывается всё больше блоков. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС [4] по основным модам ведёт себя как струна по верху здания, но при этом по ряду мод имеем картину изменения кратности по горизонтали с высотой плотины. Для описания такого эффекта недостаточно двух волновых чисел (кратность по вертикали, кратность по горизонтали).

На рис. 4 приведены данные по амплитудам и фазам двух мод стоячих волн в теле плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Именно для этих мод ярко проявляется эффект смены горизонтальной кратности по вертикали. Гораздо ярче этот эффект прослеживается на картах фаз стоячих волн. Следует отметить, что большие здания и плотины ГЭС являются уникальными объектами, для каждого из которых метод стоячих волн позволяет видеть неповторимые картины собственных колебаний (стоячих волн).

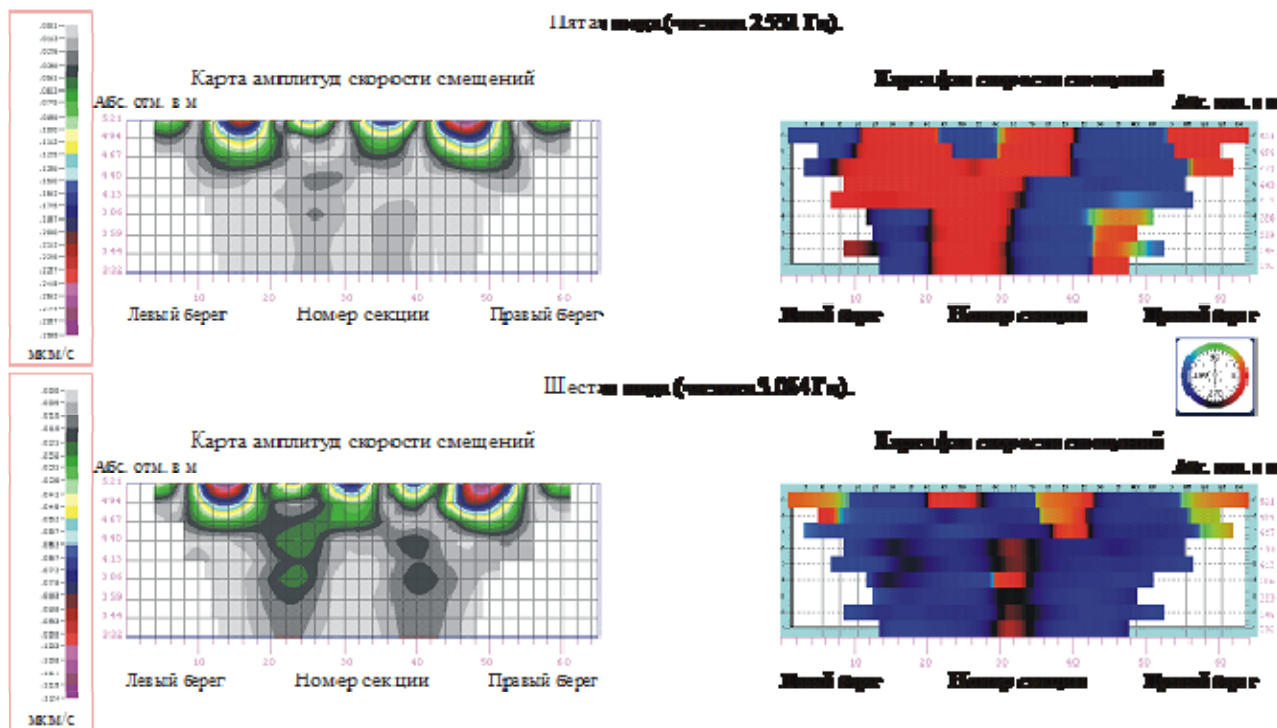


Рис. 4. Карты амплитуд и фаз стоячих волн в платине Саяно-Шушенской ГЭС

На сегодняшний день метод стоячих волн с успехом восстанавливает полное волновое поле стоячих волн в объектах любой сложности, и важным является разработка принципов интерпретации стоячих волн в инженерных объектах. Для простых конструкций зданий интерпретация велась всегда, а для сложных выполнялась частичная интерпретация по части набора стоячих волн.

Полная интерпретация полей стоячих волн определяется по следующей схеме:

- Выделение собственных частот и построение карт амплитуд стоячих волн, карт фаз, карт когерентности для каждой собственной частоты.
- Определение объёмов, в которых существуют группы стоячих волн. Фактически нахождение в объекте отражающих границ или выявление блочно-го строения.
- Обнаружение эффектов, связанных с изменениями кратности, вызванными сложной геометрией объекта.

– Раздельная интерпретация по каждой стоячей волне с определением граничных условий по области её существования.

– Переход к качественной интерпретации по каждой из стоячих волн на основе интерпретации карт по стоячим волнам и к количественной – на основе решения волнового уравнения.

Следует отметить, что исследование сложных объектов другими сейсмологическими методами, кроме метода стоячих волн, не смогут дать правильной информации о состоянии объекта. Требуется дальнейшее развитие правильности оценки сейсмостойкости зданий сложных конструкций. По полученным данным понятно, что в ряде случаев мы имеем дело с вложенными резонаторами (при наличии отражающей границы), со связанными резонаторами (случай блочного строения), моделями собственных колебаний для объектов сложной геометрии, и к этому ещё добавляются факты существования стен сложного строения, обеспечивающих двойные отражающие свойства и меняющих картину полей стоячих волн.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. – М.: Стройиздат, 1976. – 229с.
2. Айзенберг Я.М. Некоторые проблемы обеспечения сейсмической надежности современных ответственных и сложных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2005. – №4. – С.23-25.
3. Пересчёт стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологическом исследовании / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, А. А. Бах, С.А. Гриценко, И.А. Данилов, А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров, Г.И. Татьков // Геология и геофизика. – 2002. – №2. – С. 192 – 207.
4. Детальные инженерно-сейсмологические исследования плотины Саяно-Шушенской ГЭС / А.Ф. Еманов, А.А. Бах, И.А. Данилов, А.А. Дергачёв, В.С. Селезнёв, А.В. Толошинов, В.А. Булатов // Вестник Красноярской государственной архитектурно-строительной академии: Сб. науч. тр. Вып.6. – Красноярск: КрасГАСА, 2003.–С. 86-108.
5. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – №3. – С.20-24.
6. Еманов А.Ф., Красников А.А. Применение метода стоячих волн для исследования сейсмоизолированных зданий // Вопросы инженерной сейсмологии.– 2015. – Т.42. – №4. – С.37-64.
7. Еманов А.Ф., Бах А.А., Клецин В.И. Стоячие волны в плотинах Богучанской и Чиркейской ГЭС // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2018. – № 4. – С.28-33.
8. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). – М.: МГСУ, 2012. – 92с.
9. Смирнов В.И. Сейсмоизоляция – современная антисейсмическая защита зданий в России // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. – № 4. – С. 41-54.

© А. Ф. Еманов, А. А. Бах, 2019