

УДК: 51-7, 519.24

## Количественные оценки сейсмического риска и энергетические концепции сейсмостойкого строительства

Г. А. Джинчвелашвили<sup>1,a</sup>, Р. И. Держинский<sup>2,b</sup>, Н. Н. Денисенкова<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup> Российская открытая академия транспорта  
Московского государственного университета путей сообщения Императора Николая II,  
Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9

<sup>2</sup> Московский технологический университет (МИРЭА),  
Россия, 119454, ЦФО, г. Москва, проспект Вернадского, д. 78

<sup>3</sup> Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова,  
Россия, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36

E-mail: <sup>a</sup> guram2004@yandex.ru, <sup>b</sup> 9015111295@mail.ru, <sup>c</sup> natalya652008@yandex.ru

*Получено 18.06.2017, после доработки — 07.12.2017.*

*Принято к публикации 11.12.2017.*

В настоящее время сейсмостойкое проектирование зданий основано на силовом расчете и представлении эффекта землетрясения статическими эквивалентными силами, которые рассчитываются с использованием упругих спектров реакций (линейно-спектральный метод), связывающих закон движения грунта с абсолютным ускорением модели в виде нелинейного осциллятора.

Такой подход непосредственно не учитывает ни влияния длительности сильных движений, ни пластического поведения конструкции. Частотный состав и продолжительность колебаний грунта напрямую влияют на энергию, поступившую в сооружение и вызывающую повреждение его элементов. В отличие от силового или кинематического расчета сейсмическое воздействие на конструкцию можно интерпретировать, не рассматривая отдельно силы или перемещения, а представить как произведение обеих величин, т. е. работу или входную энергию (максимальную энергию, которую может приобрести сооружение в результате землетрясения).

При энергетическом подходе сейсмического проектирования необходимо оценить входную сейсмическую энергию в сооружение и ее распределение среди различных структурных компонентов.

В статье приводится обоснование энергетического подхода при проектировании сейсмостойких зданий и сооружений взамен применяемого в настоящее время метода, основанного на силовом расчете и представлении эффекта землетрясения статическими эквивалентными силами, которые рассчитываются с использованием спектров реакции.

Отмечено, что интерес к использованию энергетических концепций в сейсмостойком проектировании начался с работ Хаузнера, который представил сейсмические силы в виде входной сейсмической энергии, используя спектр скоростей, и предложил считать, что повреждения в упругопластической системе, как и в упругой системе, вызывает одна и та же входная сейсмическая энергия.

В работе приведены индексы определения входной энергии землетрясения, предложенные различными авторами. Показано, что современные подходы обеспечения сейсмостойкости сооружений, основанные на представлении эффекта землетрясения как статической эквивалентной силы, недостаточно адекватно описывают поведение системы во время землетрясения.

В статье предлагается новый подход количественных оценок сейсмического риска, позволяющий формализовать процесс принятия решений относительно антисейсмических мероприятий. На основе количественных оценок сейсмического риска анализируется разработанный в НИУ МГСУ Стандарт организации (СТО) «Сейсмостойкость сооружений. Основные расчетные положения». В разработанном документе сделан шаг вперед в отношении оптимального проектирования сейсмостойких конструкций.

В предлагаемой концепции используются достижения современных методов расчета зданий и сооружений на сейсмические воздействия, которые гармонизированы с Еврокодом и не противоречат системе отечественных нормативных документов.

Ключевые слова: сейсмостойкость сооружений, энергетический метод, сейсмостойкое строительство, спектры реакции, входная энергия землетрясения, период повторяемости землетрясений, сейсмический риск, антисейсмические мероприятия, концептуальное проектирование, двухуровневый расчет, критерии сейсмостойкости, нелинейный статический и нелинейный динамический метод расчета

UDC: 51-7, 519.24

## Quantitative assessment of seismic risk and energy concepts of earthquake engineering

**G. A. Dzhinchvelashvili<sup>1,a</sup>, R. I. Dzerzhinsky<sup>2,b</sup>, N. N. Denisenkova<sup>3,c</sup>**

<sup>1</sup> Russian Open Transport Academy of Moscow State University of Railway Transport,  
Obrazcova st. 9/9, Moscow, 127994, Russia

<sup>2</sup> Moscow Technological University (MIREA),  
Prospect Vernadsky 78, Moscow, Central Federal District, 119454, Russia

<sup>3</sup> Russian Economic University named after G. V. Plekhanova,  
Stremyanniy Lane 36, Moscow, 117997, Russia

E-mail: <sup>a</sup> guram2004@yandex.ru, <sup>b</sup> 9015111295@mail.ru, <sup>c</sup> natalya652008@yandex.ru

*Received 18.06.2017, after completion — 07.12.2017.*

*Accepted for publication 11.12.2017.*

Currently, earthquake-resistant design of buildings based on the power calculation and presentation of effect of the earthquake static equivalent forces, which are calculated using elastic response spectra (linear-spectral method) that connects the law of motion of the soil with the absolute acceleration of the model in a nonlinear oscillator.

This approach does not directly take into account either the influence of the duration of strong motion or the plastic behavior of the structure. Frequency content and duration of ground vibrations directly affect the energy received by the building and causing damage to its elements. Unlike power or kinematic calculation of the seismic effect on the structure can be interpreted without considering separately the forces and displacements and to provide, as the product of both variables, i.e., the work or input energy (maximum energy that can be purchased building to the earthquake).

With the energy approach of seismic design, it is necessary to evaluate the input seismic energy in the structure and its distribution among various structural components.

The article provides substantiation of the energy approach in the design of earthquake-resistant buildings and structures instead of the currently used method based on the power calculation and presentation of effect of the earthquake static equivalent forces, which are calculated using spectra of the reaction.

Noted that interest in the use of energy concepts in earthquake-resistant design began with the works of Housner, which provided the seismic force in the form of the input seismic energy, using the range of speeds, and suggested that the damage in elastic-plastic system and elastic system causes one and the same input seismic energy.

The indices of the determination of the input energy of the earthquake, proposed by various authors, are given in this paper. It is shown that modern approaches to ensuring seismic stability of structures, based on the representation of the earthquake effect as a static equivalent force, do not adequately describe the behavior of the system during an earthquake.

In this paper, based on quantitative estimates of seismic risk analyzes developed in the NRU MSUCE Standard Organization (STO) "Seismic resistance structures. The main design provisions". In the developed document a step forward with respect to the optimal design of earthquake-resistant structures.

The proposed concept of using the achievements of modern methods of calculation of buildings and structures on seismic effects, which are harmonized with the Eurocodes and are not contrary to the system of national regulations.

**Keywords:** the earthquake resistance of buildings, the energy method, earthquake-resistant construction, spectra response, the input earthquake energy, earthquake recurrence period, seismic risk, anti-seismic measures, conceptual design, two-tiered calculation, seismic resistance criteria, nonlinear static and nonlinear dynamic calculation method

**Citation:** *Computer Research and Modeling*, 2018, vol. 10, no. 1, pp. 61–76 (Russian).

## Введение

По разрушительным последствиям, количеству жертв, материальным ущербам и деструктивному действию на среду обитания человека землетрясения занимают одно из первых мест среди опасных природных и природно-техногенных явлений [Уломов, Шумилина, 1999], определяют условия жизнедеятельности населения и инженерной деятельности на значительной территории земного шара.

Сейсмическая опасность актуальна практически для всей без исключения территории России, где даже на относительно спокойных в геологическом отношении равнинных территориях имели место (и не исключаются в будущем) достаточно сильные и разрушительные землетрясения. При этом значительную площадь страны занимают чрезвычайно опасные в сейсмическом отношении 8-9- и 9-10-балльные зоны<sup>1</sup>.

Сильные землетрясения угрожают странам Закавказья, среднеазиатским странам, Казахстану, Украине, Молдавии, в том числе и густонаселенным территориям этих стран<sup>2</sup>.

В то же время, как свидетельствует опыт развитых стран, никакой фатальной неизбежности ущербов и потерь от землетрясений нет. Как сказано в книге видных американских специалистов по сейсмостойкому проектированию и строительству Дж. Гира и Х. Шаха, «не землетрясения убивают людей, а здания» [Гир, Шах, 1988]. И поскольку угрозы от землетрясений реализуются в соответствии со стохастическими законами, то это означает, что ущербами и потерями от землетрясений можно управлять — путем минимизации сейсмического риска. Однако такая возможность может быть реализована только в случае адекватной оценки сейсмического риска в контексте принятия решений.

Многовековой опыт борьбы с последствиями землетрясений, накопленный человечеством, свидетельствует о том, что наиболее действенный способ их минимизации состоит в проведении заблаговременных и масштабных антисейсмических мероприятий еще при строительстве на сейсмоопасных территориях. Антисейсмические мероприятия априори нуждаются в дополнительных затратах в сравнении со строительством в несейсмических районах. С точки зрения эффективности таких затрат они должны оправдываться снижением вероятных потерь (рисков ущерба) от землетрясений. При этом снижение вероятных потерь от землетрясений можно рассматривать как будущий эффект, а дополнительные затраты на антисейсмические мероприятия можно трактовать как составляющие сейсмического риска.

Решение проблемы, по нашему мнению, здесь видится прежде всего в необходимости уточнения понятия сейсмического риска и его оценки в контексте принятия решений.

## Обоснование энергетического подхода

В настоящее время сейсмостойкое проектирование зданий [СП 14.13330.2014, 2014] основано на силовом расчете и представлении эффекта землетрясения статическими эквивалентными силами, которые рассчитываются с использованием упругих спектров реакций (линейно-спектральный метод или ЛСМ), связывающих закон движения грунта с абсолютным ускорением модели в виде линейного осциллятора (рис. 1):

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + F(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g, \quad (1)$$

где  $F(u, \dot{u}) = ku$  для линейного осциллятора;  $m, c, k$  — масса, коэффициент демпфирования, жесткость осциллятора соответственно;  $\xi$  — параметр затухания.

Такой подход непосредственно не учитывает ни влияния длительности сильных движений, ни пластического поведения конструкции.

<sup>1</sup> <http://seismos-u.ifz.ru/zoning.htm>

<sup>2</sup> <http://seismos-u.ifz.ru/hazard.htm>

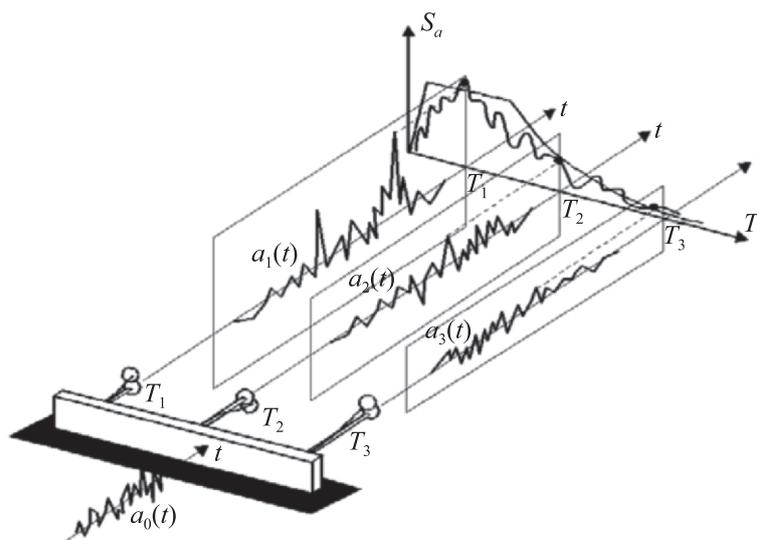


Рис. 1. Схема сейсмических колебаний грунта и спектр реакции

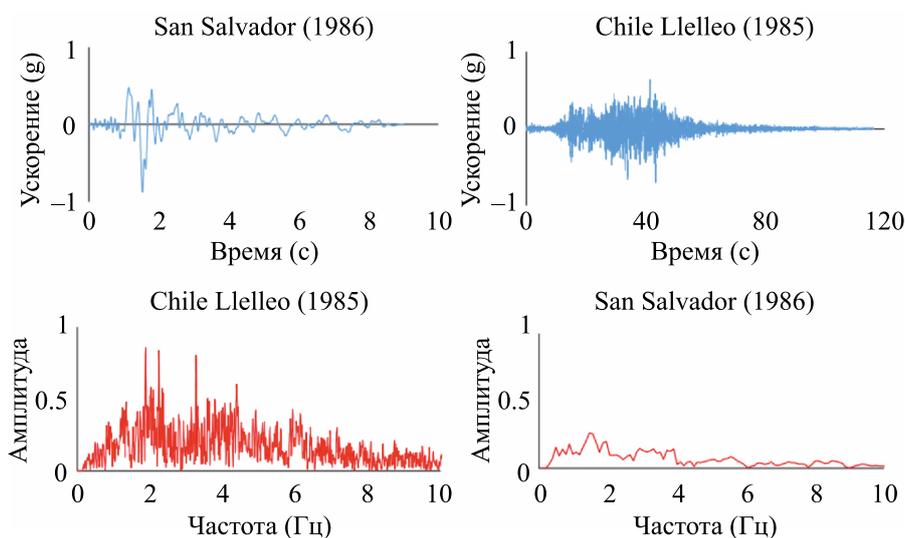


Рис. 2. Ускорения и спектры амплитуды Фурье двух различных записей землетрясения

Частотный состав и продолжительность колебаний грунта напрямую влияют на энергию, поступившую в сооружение и вызывающую повреждение его элементов [Джинчвелашвили, 2015; Мкртычев, Джинчвелашвили, 2012; Мкртычев, Джинчвелашвили, Держинский, 2016; Немчинов и др., 2012]. Недостатком использования спектров реакции для анализа сейсмостойкости можно проиллюстрировать следующим примером: две записи землетрясения в Чили (1985) и Сан-Сальвадоре (1986), которые имеют разные пиковые ускорения грунта, частотный состав и длительность (рис. 2).

Однако упругие спектры реакции, полученные в [Шивуа, 2016] для этих землетрясений, как показано на рис. 3, по-видимому, не могут отразить эти различия в записи.

В отличие от силового или кинематического расчета сейсмическое воздействие на конструкцию можно интерпретировать, не рассматривая отдельно силы или перемещения, а представить, как произведение обеих величин, т. е. работу или входную энергию (максимальную энергию, которую может приобрести сооружение в результате землетрясения).

Динамика упругопластической системы с одной степенью свободы также описывается дифференциальным уравнением (1), в котором  $f(u, \dot{u})$  — нелинейная удельная восстанавли-

вающая сила. Записывая слагаемые в уравнении (1) как функции времени, получаем

$$\int_0^t \ddot{u} \dot{u} dt + 2\xi\omega \int_0^t \dot{u}^2 dt + \int_0^t f(u, \dot{u}) \dot{u} dt = - \int_0^t \ddot{u}_g \dot{u} dt. \quad (2)$$

При энергетическом подходе сейсмического проектирования необходимо оценить входную сейсмическую энергию в сооружение и ее распределение среди различных структурных компонентов.

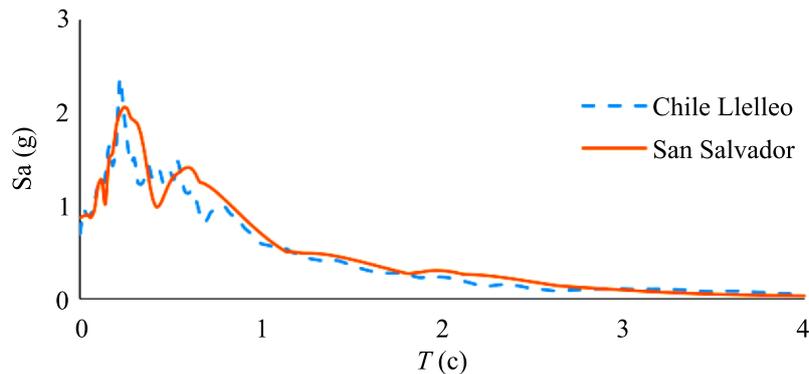


Рис. 3. Упругие спектры реакции для записей землетрясений в Чили (1985) и Сан-Сальвадоре (1986)

Уравнению (2) соответствует энергетическое соотношение (уравнение энергетического баланса)

$$E_K + E_\xi + E_A = E_I, \quad (3)$$

где  $E_K = m \int_0^t \ddot{u} \dot{u} dt = \frac{1}{2} m \dot{u}^2$  — кинетическая энергия,  $E_\xi = c \int_0^t \dot{u}^2 dt$  — энергия демпфирования,

$E_I = m \int_0^t \ddot{u}_g \dot{u} dt$  — входная сейсмическая энергия, работа сил деформирования

$E_A = E_S + E_H = \int_0^t F(u, \dot{u}) \dot{u} dt$  состоит из суммы  $E_S = \frac{1}{2} k u^2$  (потенциальной энергии упругой деформации) и  $E_H$  (энергии, рассеянной посредством пластических деформаций (необратимая гистерезисная энергия)).

Теоретически вычисленная входная энергия зависит от рассматриваемой модели сооружения. Определенная в результате динамического расчета выбранной модели или полученная на основе теоретических оценок входная энергия сравнивается с энергоемкостью, т. е. с максимальной энергией, которую можно сообщить сооружению до его разрушения. Обычно сравнению с энергоемкостью подвергается пластическая часть входной (поглощенной сооружением) энергии. Такова основа энергетического метода сейсмического проектирования (*energy-based seismic design, EBSD*).

Таким образом, входная сейсмическая энергия служит альтернативным индексом параметра отклика (ответа) и учитывает эффект сейсмического повреждения, связанного с продолжительностью движения основания, частотным составом землетрясения и пластическим деформированием. Спектр реакции на основе энергии может отразить разницу в возможном потенциале повреждения от землетрясений, показывая энергии, которые поступают в систему. Спектральные значения входной энергии (рис. 4) явно демонстрируют различие между двумя землетрясениями, имеющими сходные спектры реакции (рис. 3), что является преимуществом энергетического метода (*EBSD*).

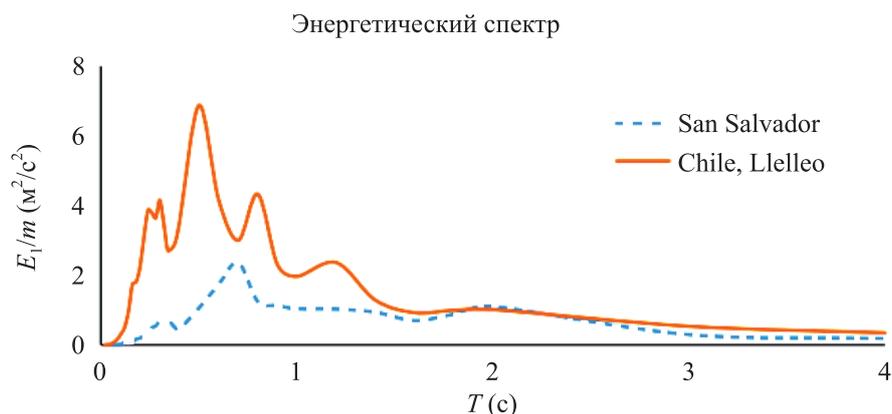


Рис. 4. Упругий входной энергетический спектр записей землетрясений в Чили (1985) и Сан-Сальвадоре (1986)

Еще одним преимуществом *EBSD* является то, что разрушение сооружения может быть рассмотрено с точки зрения энергии пластического деформирования, без прибегания к эквивалентному вязкому демпфированию или коэффициенту пластичности. Следует отметить, однако, что разрушение сооружения зависит не только от энергии пластического деформирования, но также от характера и истории нагружения. Этот вопрос не раз обсуждался многими авторами ([Джинчвелашвили и др., 2016; Задоян, 2009; Мкртычев, Джинчвелашвили, 2012а; Мкртычев, Джинчвелашвили, 2012б; Немчинов и др., 2012; Рутман, 2012; Fajfar, Krawinkler, 2004; Gupta, 1998; Mkrtychev, Dzhinchvelashvili, Busalova, 2015; Sucuoglu, 2004; Benavent-Climent, 2010; Chai, 1995; Cosenza, 1990; Erberik, Sucuoglu, 2004] и др.) применительно к стальным и железобетонным конструкциям.

Поведение сооружения во время землетрясения определяется количеством энергии, поступившей в структурные элементы системы. Эта энергия находится в сложной зависимости от интенсивности, частотного состава, длительности движения грунта, а также от структурных параметров системы. Таким образом, определение энергии, поступившей в сооружение, является важнейшей задачей при энергетическом подходе обеспечения сейсмостойкости, так как это позволяет установить связь между энергией, поступившей в систему, и возможными повреждениями сооружения.

Входная сейсмическая энергия — это количество энергии, поступившей в систему вследствие движения грунта во время землетрясения. При сейсмическом анализе основной проблемой является установление эффективной связи между энергией и фактическим повреждением сооружения. Мощность повреждения во время землетрясения может быть выражена степенью повреждения конструкции, которая, в свою очередь, определяется откликом сооружения, включая максимальную деформацию и рассеивание пластической гистерезисной энергии<sup>3</sup>.

При энергетическом подходе проектирования необходимо количественно оценить входную энергию, поступившую в сооружение во время землетрясения с целью распределения среди различных структурных компонентов. Ряд исследователей предложили различные способы определения сейсмической энергии, поступившей в систему.

Левая часть уравнения (3) представляет собой «способность поглощения энергии» (*Energy Absorption Capacity, EAC*) и интерпретируется как сейсмический потенциал сооружения; а правая часть уравнения представляет собой входную энергию от последствия землетрясения [Cosenza, 1990]. Сейсмическую безопасность конструкции можно оценить, сравнив ожидаемое значение  $E_l$  на участке, где расположено здание, с его способностью поглощения энергии (*EAC*).

<sup>3</sup> ESD (The European Strong Motion Database) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.isesd.hi.is/ESD Local/frameset.htm>

## Количественные оценки сейсмического риска

В России и в странах бывшего СССР используется 12-балльная сейсмическая шкала MSK-64 [Поляков, 1978]. В качестве основной расчетной характеристики, характеризующей уровень сейсмической опасности, используется максимальное сейсмическое ускорение  $a_{\max}$  колебаний частиц грунта на поверхности земли. Между сейсмической интенсивностью  $I$  в баллах шкалы MSK-64 и максимальным ускорением  $a_{\max}$  в работе [Стефанишин, 2012] приведен график, устанавливающий сложную вероятностную зависимость (рис. 1), который получен путем статистической обработки более 1400 акселерограмм землетрясений, зарегистрированных в разных частях земного шара.

Из анализа рис. 5 видно, что одним и тем же ускорениям  $a_{\max}$  могут отвечать разные интегральные вероятности  $P(a_{\max})$  при разной интенсивности  $I$  сейсмических колебаний (в баллах) и, соответственно, при разной их частоте. То есть одни и те же максимальные сейсмические ускорения  $a_{\max}$  с разной вероятностью могут прогнозироваться в значительном диапазоне изменения интенсивности сейсмических колебаний (в баллах).

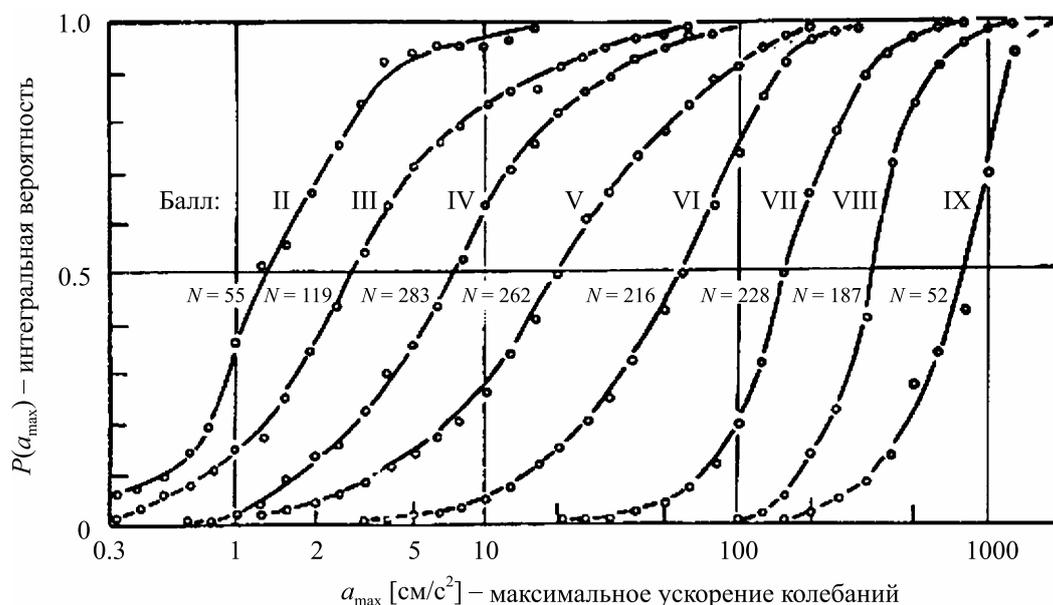


Рис. 5. Характер вероятностной связи между интенсивностью  $I$  (в баллах шкалы MSK-64) и  $a_{\max}$ ;  $N$  — количество акселерограмм землетрясений, использованных для построения графиков, характеризующих разную интенсивность

Определим понятие сейсмического риска.

Сейсмическим риском назовем произведение трех величин:

$$R = H \times P(a_{\max} \geq a_{\max} | I_p) \times Q, \quad (4)$$

где  $H$  — вероятности наступления землетрясения определенной интенсивности  $I_p$ ,  $P(a_{\max} \geq a_{\max} | I_p)$  — условная вероятность того, что землетрясение вызовет критическое состояние,  $Q$  — размер ущерба вследствие наступления критического состояния.

Вероятность наступления землетрясения определенной интенсивности  $H$  определяется из результата анализа степени сейсмической опасности района строительства. Вероятность воз-

никновения ущерба определяется несущей способностью несущих конструкций сооружения и их способностью рассеивать энергию землетрясения.

Размер ущерба  $Q$  определяется параметрами эксплуатации, плотностью застройки, транспортной и коммунальной инфраструктурой и пр.

Положим, что при некотором расчетном землетрясении интенсивностью  $I_p$  (в баллах) сооружение способно безотказно (не разрушаясь и не повреждаясь) выдержать некоторое расчетное максимальное сейсмическое ускорение  $a_{\max,p}$ . Тогда вероятность  $P(a_{\max,p})$ , определенная при  $I_p$  как условная вероятность  $P(a_{\max,p} | I_p)$  не превышения соответствующего ускорения, может характеризовать минимально допустимое значение условной вероятности безотказной работы (надежности) этого объекта при интенсивности  $I_p$ .

В свою очередь, дополнение вероятности  $P(a_{\max,p} | I_p)$  до единицы, как вероятность превышения  $a_{\max,p}$ , будет характеризовать максимально допустимое значение условной вероятности отказа сооружения при  $I_p$ :

$$P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_p) = 1 - P(a_{\max,p} | I_p). \quad (5)$$

Другой важной характеристикой сейсмической опасности, определяющей безусловную вероятность отказа от расчетного землетрясения интенсивностью  $I_p$ , является средний период его повторения  $T(I_p)$ . В зависимости от периода повторяемости  $T(I_p)$  устанавливается ежегодная вероятность  $p(I_p)$  превышения землетрясения интенсивностью  $I_p$ :

$$p(I_p) = 1/T(I_p). \quad (6)$$

Сейсмическим риском назовем произведение вероятности наступления землетрясения определенной интенсивности  $I_p$  и условной вероятности того, что землетрясение вызовет критическое состояние, и размера ущерба вследствие наступления критического состояния.

Воспользовавшись формулой произведения вероятностей (полной вероятности), получим максимально допустимое значение безусловной вероятности (риска) отказа сооружения при расчетном землетрясении интенсивностью  $I_p$ :

$$Q(I_p) = P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_p) \times p(I_p) = \frac{1}{T(I_p)} [1 - P(a_{\max,p} | I_p)]. \quad (7)$$

Следует также учесть, что одни и те же ускорения  $a_{\max}$ , хотя и с разной вероятностью  $P(a_{\max})$  (см. рис. 1), включая ускорения  $a_{\max,p}$ , могут превышать и при землетрясениях, интенсивность которых меньше расчетной  $I_p$ .

Рассмотрим некоторую группу  $l$  потенциально возможных  $k$  землетрясений  $l = \{I_p\}$ ,  $k = m, \dots, p$ , в которой землетрясение с интенсивностью сотрясений  $I_m$  представляет собой некоторое минимальное по интенсивности (в баллах) землетрясение из возможных на площадке сейсмических событий с максимальными ускорениями  $a_{\max} \geq a_{\max,p}$ , а землетрясение интенсивностью  $I_p$  является максимальным расчетным землетрясением на площадке (в баллах) на которое рассчитывается сооружение при  $a_{\max}$ .

В этом случае для оценки максимально допустимого значения полной вероятности отказа сооружения  $Q$  с учетом возможности любого из  $k$ -х землетрясений  $l = \{I_p\}$ ,  $k = m, \dots, p$ , воспользуемся формулой полной вероятности:

$$R(I) = \sum_{k=m}^p P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_k) \cdot P(I_k), \quad (8)$$

где, с учетом формирования полной группы событий, вероятности,

$$P(I_k) = p(I_k) - p(I_{k+1}) = \frac{1}{T(I_k)} - \frac{1}{T(I_{k+1})}. \quad (9)$$

Рассмотрим пример.

Пусть сооружение рассчитано на максимальное сейсмическое ускорение  $0,1g$ . Площадка, на которой размещается сооружение, относится к зоне, где возможны сотрясения интенсивностью 7 баллов по шкале MSK-64 для средних грунтов.

Пусть максимальное расчетное землетрясение с интенсивностью сейсмических колебаний 7 баллов ожидается 1 раз в 500 лет; с интенсивностью сейсмических колебаний 6 баллов — 1 раз в 100 лет; с интенсивностью сейсмических колебаний 5 баллов — 1 раз в 20 лет.

Согласно данным, представленным на рис. 1, имеем вероятности превышения максимального сейсмического ускорения  $a_{\max,p} = 0,1g$  при землетрясениях интенсивностью  $I_k = 7, 6$  и 5 баллов соответственно:

$$\begin{aligned} P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_7) &= 0,8, \\ P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_6) &= 0,25, \\ P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_5) &= 0,1. \end{aligned}$$

Используя формулу (5), получаем максимально допустимое значение полной вероятности отказа сооружения  $R(Q, I)$  при землетрясении с учетом возможности любого из землетрясений интенсивностью  $k = 7, 6, 5$  баллов:

$$\begin{aligned} R(Q, I) &= \sum_{k=m}^p P(a_{\max} \geq a_{\max,p} | I_k) \cdot P(I_k) = 0,8 \times \frac{1}{500} + 0,25 \times \frac{1}{100} + 0,1 \times \frac{1}{20} = \\ &= 0,0016 + 0,0025 + 0,005 = 0,0091 \text{ год}^{-1}. \end{aligned}$$

## Концепция нормативного документа нового поколения по сейсмостойкому строительству

Возможный сейсмический риск определяется вероятностью наступления землетрясения с учетом расчетных критериев — параметра  $R(Q, I)$  и пограничных условий, полученных в  $Q(I_p)$ . Для этого в Европе [Eurocode 8, 2003; European Standard, 2002] и во многих других странах [ATC-40, 1996; ATC-55, 2005; FEMA-273, 1997; FEMA-274, 1997; FEMA-356, 2000; NEHRP, 1997] принято рассчитывать сейсмостойкие сооружения на землетрясение, которое может произойти с вероятностью 10 % в течение 50 лет.

На основании распределения Пуассона по времени (приближение касается малых вероятностей наступления события):

$$P(T, I \geq I_k) = 1 - e^{-p(I_k)T} \approx 1 - (1 - p(I_k))^T. \quad (10)$$

Отсюда следует период повторяемости  $T = 475$  лет. В течение этого времени расчетное землетрясение произойдет с вероятностью 63 %.

В общем случае при оценке полной вероятности отказа сооружения могут учитываться: реакция объекта на сейсмические события разной интенсивности, спектральный состав различных землетрясений, последовательность разных характеристик сейсмической активности (моментов времени, мест, магнитуд, направлений и т. п.). Все эти факторы также могут выражаться через условные вероятности [Ломнитц, Розенблюэт, 1981; Стефанишин, 2012]. Основы такого подхода к оценке сейсмического риска с учетом действия землетрясений разной интенсивности с использованием формулы полной вероятности были заложены в 60-х годах прошлого столетия и базировались они на работах Р. Уитмена и С. Корнелла [Ломнитц, Розенблюэт, 1981].

Тем не менее, несмотря на перспективы, которые открывает количественное оценивание сейсмического риска в рамках вероятностного подхода [Мкртычев, Джинчвелашвили, Дзержинский, 2016; Мкртычев, Джинчвелашвили, 2012; Стефанишин, 2012], вопрос полезности таких оценок для решения практических задач минимизации сейсмической опасности все еще остается без ответа.

Общепринятый расчет сооружений на сейсмостойкость основан на сопоставлении усилий (или напряжений), вызываемых внешней нагрузкой, с предельно допустимыми величинами внутренних сил (или напряжений), которые могут быть восприняты в соответствующих сечениях конструкции. В зависимости от того, рассматривается ли только упругая работа материала или учитываются также и его пластические деформации, меняются значения предельно допустимых внутренних усилий в сечениях конструкции.

Сказать что-либо о сейсмостойкости, таким образом, запроектированной конструктивной системы вообще-то ничего нельзя. Следовательно, мы получаем сооружение с неизвестным уровнем сейсмостойкости.

Расчет конструкций с учетом пластического и нелинейного поведения и даже с учетом разрушения отдельных элементов конструкций сооружений требует использования более сложных механико-математических моделей и теорий, т. е. допущения контролируемых повреждений. Необходимо учитывать и перераспределение усилий по конструкции, связанное с появлением в ней зон пластических деформаций. Однако во всех случаях критерием для оценки несущей способности сооружения является принцип сопоставления внешних и внутренних усилий.

Решение данной проблемы, по нашему мнению, здесь видится прежде всего в необходимости разработки нормативных документов нового поколения и внедрения в практику методов проектирования с заданным уровнем сейсмостойкости.

В МГСУ разработан Стандарт организации (СТО) «Строительство в сейсмических районах» [Денисенкова, Джинчвелашвили, 2016; Мкртычев, Джинчвелашвили, 2012; Мкртычев, Джинчвелашвили, Дзержинский, 2016; Мкртычев, Джинчвелашвили, 2016].

В разработанном документе сделан шаг вперед в отношении оптимального проектирования сейсмостойких конструкций.

### **I. Включено положение о двухуровневом расчете на сейсмические воздействия на ПЗ и МРЗ.**

За срок службы сооружения на данной строительной площадке:

- с большой долей вероятности произойдет «умеренное» землетрясение, такое землетрясение принято называть ПЗ (проектное землетрясение с повторяемостью раз в 100 лет);
- с определенной вероятностью произойдет «сильное» или «катастрофическое» землетрясение; такое землетрясение принято называть МРЗ (максимальное расчетное землетрясение с повторяемостью раз в 500 лет).

**II. Введены четкие критерии сейсмостойкости:**

- прочностной критерий (по I группе предельных состояний) при расчете на ПЗ;
- критерий необрушения (по особому предельному состоянию: устойчивость к прогрессирующему обрушению при расчете на МРЗ).

Сейсмостойкостью сооружения назовем такую ее реакцию на различные сейсмические события:

- при частых землетрясениях «умеренной силы» ПЗ в несущих конструкциях не имеется остаточных деформаций, ее элементы не имеют остаточных перекосов, полностью сохраняют свою прочность и жесткость и не нуждаются в капитальном ремонте;
- при редком сейсмическом воздействии МРЗ несущие конструкции могут быть значительно повреждены, и в них возможно развитие остаточных пластических деформаций при сохранении вертикальной несущей способности и значительной остаточной прочности и жесткости.

**III. Элементы концептуального проектирования.**

Общемировой опыт проектирования сейсмостойких зданий свидетельствует о том, что в наибольшей степени обеспечению сейсмостойкости отвечает свойство регулярности здания и конструктивного решения, которые включают:

- регулярность сооружения в плане и по высоте;
- регулярность конструктивного решения.

Необходимые пояснения и иллюстрации к данным положениям можно найти в работах [Мкртычев, Джинчвелашвили, 2012; Немчинов и др., 2012; Chopra, 2000; Eurocode 8, 2003] и других публикациях.

Перед началом проектирования конструктор, архитектор, ГИП, заказчик-инвестор собираются вместе и выбирают конструктивную систему сооружения в рамках заданных параметров (материал, высоту, конструктивную систему, класс пластичности, т. е. места образования пластических шарниров и зон рассеяния энергии).

При назначении зон пластических деформаций и локальных разрушений следует принимать конструктивные решения, снижающие риск прогрессирующего разрушения сооружения или его частей и обеспечивающие живучесть сооружений при сейсмических воздействиях.

Не следует применять конструктивные решения, допускающие обрушение сооружения в случае разрушения или недопустимого деформирования одного несущего элемента.

Согласно Еврокоду-8 [Eurocode 8, 2003] проектирование ведется таким образом, что определенные элементы конструктивной системы выбираются, соответствующим образом проектируются и детализируются в расчете на рассеяние энергии под действием больших деформаций, а для всех остальных элементов конструкции предусматривается достаточная прочность, чтобы обеспечить возможность эксплуатации выбранных средств рассеяния энергии. Отдается предпочтение рассеивающим конструкциям — конструкциям, способным рассеивать энергию на основе пластического гистерезиса и/или других механизмов. В конструктивной системе назначаются зоны рассеяния: заранее определенные части рассеивающей структуры, в которых сконцентрирована основная часть возможностей рассеивания. Эти зоны называются также критическими областями.

При этом нерассеивающая конструкция — конструкция, запроектированная в расчете на определенную расчетную сейсмическую ситуацию без учета нелинейности поведения материала.

**IV. Введены категории сложности конструктивной схемы здания.**

Классификация зданий по категории сложности конструктивной схемы приведена в таблице 1.

Таблица 1

| Категория сложности конструктивной схемы | Высота здания, м<br>(число надземных этажей), не более | Пролет, м,<br>не более | Вылет консоли, м,<br>не более |
|--|--|------------------------|-------------------------------|
| 3 (простая)                              | 21 (5)   | 12                     | 3                             |
| 2 (средней сложности)                    | 55 (16)  | 36                     | 10                            |
| 1 (сложная)                              | 100  | 100                    | 20                            |

#### У. Применение различных методов расчета (в том числе нелинейных) в зависимости от конструктивных систем сооружений.

В расчетах на сейсмические воздействия используются следующие методы:

- линейный спектральный метод (ЛСМ) на основе линейно-спектральной теории (ЛСТ);
- нелинейный статический метод (НСМ);
- нелинейный динамический метод (НДМ).

Нелинейный статический метод широко применяется в зарубежных нормах [АТС-40, 1996; АТС-55, 2005; FEMA-273, 1997; FEMA-356, 2000; Eurocode 8, 2003], может быть относительно легко введен в практику проектирования [Джинчвелашвили, Булушев, Колесников, 2016; Со-снин, 2016] сооружений в сейсмических районах в качестве нормативного (рис. 6).

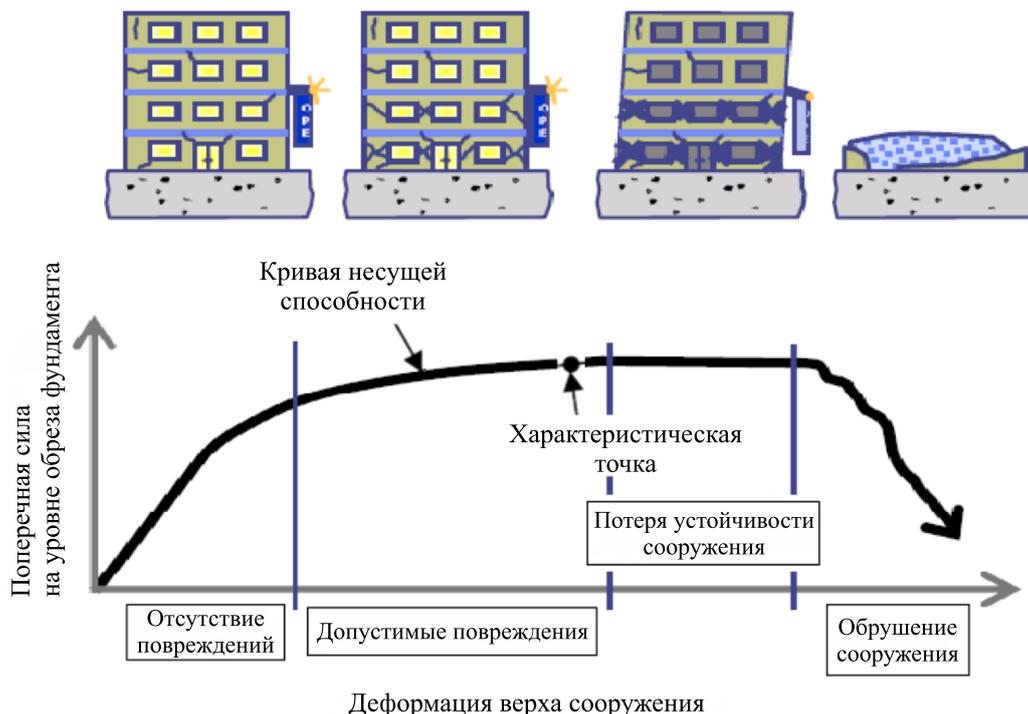


Рис. 6. Привязка кривой несущей способности сооружения к степени повреждаемости

В зависимости от категории сложности конструктивной схемы зданий и сооружений выполняются указанные в таблице 2 типы расчетов на сейсмические воздействия.

В принципе эти положения являются достижениями теории сейсмостойкости и не должны вызывать никаких сомнений у специалистов.

Таблица 2

| Категория сложности   | Тип расчета | Метод расчета | Расчетная ситуация | Расчетное воздействие | Расчетный критерий |
|-----------------------|-------------|---------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| 3 (простая)           | 1а          | ЛСМ           | ПЗ                 | по ЛСТ                | прочностной        |
|                       |             | НСМ           | МРЗ                | по ЛСТ                | необрушения        |
| 2 (средней сложности) | 1а          | ЛСМ           | ПЗ                 | по ЛСТ                | прочностной        |
|                       | 1б          |               |                    | набор аксел.          |                    |
|                       | 2           | НСМ           | МРЗ                | набор аксел.          | необрушения        |
|                       | 1 (сложная) | 1а            | ЛСМ                | ПЗ                    | по ЛСТ             |
| 1б                    |             | набор аксел.  |                    |                       |                    |
| 2                     |             | НСМ           | МРЗ                | набор аксел.          | необрушения        |
|                       | 3           | НДМ           | МРЗ                | синтез аксел.         | необрушения        |

## Заключение

1. Анализ современных подходов обеспечения сейсмостойкости сооружений показал, что существующие методики основаны на представлении эффекта землетрясения как статической эквивалентной силы, которая рассчитывается из упругих спектров реакций, связывающих пиковое ускорение грунта (PGA) с абсолютным ускорением упругой системы. Эти методы недостаточно адекватно описывают поведение системы во время землетрясения.

2. Из-за сложности и случайности движения основания во время землетрясения трудно точно оценить применимость существующих энергетических предложений для оценки сейсмической энергии, поступившей в систему во время землетрясения. Кроме того, объективного количественного метода для оценки применимости таких показателей не существует. Однако уместно отметить преимущество энергетических подходов, позволяющих учитывать зависимость поведения системы от интенсивности, продолжительности движения основания и его частотного состава.

3. На основе анализа исследований по методам сейсмостойкого проектирования конструкций можно сделать вывод, что в настоящее время теория и практика строительства в сейсмических районах достигли высокого уровня развития. Однако существует ряд вопросов, которые требуют более детального изучения. Это касается в первую очередь вопросов, связанных с поведением строительных конструкций в условиях упругопластической деформации: какой метод следует использовать для оценки входной энергии, поступившей в систему, и как оптимально соотносить входную энергию, поступившую в систему, и повреждения, полученные сооружением.

4. Предложен подход количественной оценки сейсмического риска, позволяющий формализовать процесс принятия решений относительно антисейсмических мероприятий.

5. Разработана концепция норм сейсмостойкого строительства нового поколения, позволяющая проектировать здания и сооружения с заданным уровнем сейсмостойкости.

6. Разработанный в МГСУ СТО используются достижения современных методов расчета, он гармонизирован с Еврокодом 8 и не противоречит системе отечественных нормативных документов.

## Список литературы (References)

*Гир Дж., Шах Х.* Зыбкая твердь. Что такое землетрясение и как к нему подготовиться. — М.: Мир, 1988. — 220 с.

*Geer J., Shah H.* Zybkaaya tver'd'. Chto takoye zemletryaseniye i kak k nemu podgotovit'sya. — Moscow: Mir, 1988. — 220 p. (in Russian).

*Денисенкова Н. Н., Джинчвелашвили Г. А.* Политика в сфере образования и науки как инструмент модернизации общества (на примере инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства) // Геология и геофизика Юга России. — 2016. — № 3. — С. 38–47.

*Denisenkova N. N., Dzhinchvelashvili G. A.* Politika v sfere obrazovaniya i nauki kak instrument modernizatsii obshchestva (na primere inzhenernoy seysmologii i seysmostoykogo stroitel'stva) // Geologiya i geofizika Yuga Rossii. — 2016. — No. 3. — P. 38–47 (in Russian).

*Джинчвелашвили Г. А., Булушев С. В., Колесников А. В.* Нелинейный статический метод анализа сейсмостойкости зданий и сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. — 2016. — № 5. — С. 39–47.

*Dzhinchvelashvili G. A., Bulushev S. V., Kolesnikov A. V.* Nonlinear static method of analysis of seismic resistance of buildings and structures // Journal of Seismic Resistance Construction. Safety of facilities. — 2016. — No. 5. — P. 39–47 (in Russian).

*Джинчвелашвили Г. А.* Нелинейные динамические методы расчета зданий и сооружений с заданной обеспеченностью сейсмостойкости: диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук. — М.: Московский государственный строительный университет, 2015. — 426 с.

- Dzhinchvelashvili G. A.* Nonlinear dynamic methods for calculating buildings and structures with a given security of seismic stability: Thesis for a scientific degree of Doctor of Engineering. Tech. Sciences. — Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, 2015. — 426 p. (in Russian).
- Задоян П. М.* Оценка сейсмостойкости методом спектра несущей способности // Известия Ереванского государственного университета архитектуры и строительства. — 2009. — № 2.  
*Zadoyan P. M.* Estimation of seismic resistance by the method of the load-carrying capacity spectrum // Proceedings of the Yerevan State University of Architecture and Construction. — 2009. — No. 2 (in Russian).
- Мкртычев О. В., Джинчвелашвили Г. А.* Нормирование в сейсмостойком строительстве. — М.: Перо, 2016. — 78 с.  
*Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili G. A.* Normirovanie v seismostoikom stroitelstve. — Moscow: Pero, 2016. — 78 p. (in Russian).
- Мкртычев О. В., Джинчвелашвили Г. А.* Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). — М.: МГСУ, 2012 (Библиотека научных разработок и проектов МГСУ). — 192 с.  
*Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili G. A.* Problems of accounting for nonlinearities in the theory of seismic stability (hypotheses and errors). — Moscow: MGSU, 2012 (Library of Scientific Developments and Projects of MGSU). — 192 p. (in Russian).
- Мкртычев О. В., Джинчвелашвили Г. А., Дзержинский Р. И.* Философия многоуровневого проектирования в свете обеспечения сейсмостойкости сооружений // Геология и геофизика Юга России. — 2016. — № 1. — С. 71–81.  
*Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili G. A., Dzerzhinsky R. I.* Philosophy of multilevel design in the light of ensuring seismic stability of structures // Geology and Geophysics of the South of Russia. — 2016. — No. 1. — P. 71–81 (in Russian).
- Мкртычев О. В., Джинчвелашвили Г. А.* Оценка работы зданий и сооружений за пределами упругости при сейсмических воздействиях // XXI Russian–Slovak–Polish Seminar, “Theoretical Foundation of Civil Engineering”, Moscow–Archangelsk 03.07–06.07.2012. — P. 177–186.  
*Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili G. A.* Evaluation of the work of buildings and structures beyond the limits of elasticity under seismic influences // XXI Russian–Slovak–Polish Seminar, “Theoretical Foundation of Civil Engineering”, Moscow–Archangelsk 03.07–06.07.2012. — P. 177–186 (in Russian).
- Немчинов Ю. И., Марьенков Н. Г., Хавкин А. К., Бабик К. Н.* Проектирование зданий с заданным уровнем обеспечения сейсмостойкости (с учетом рекомендаций ЕВРОКОДА 8, международных стандартов и требований ДБН): монография. — Киев: Минрегион Украины, ГП НИИСК, 2012. — 53 с.  
*Nemchinov Yu. I., Marienkov N. G., Khavkin A. K., Babik K. N.* Designing buildings with a given level of seismic resistance (taking into account the recommendations of EUROCODE 8, international standards and DBN requirements): monograph. — Kiev: Ministry of Regional Development of Ukraine, GP NIISK, 2012. — 53 p. (in Russian).
- Рутман Ю. Л.* Анализ возможностей применения энергетического критерия САУ для расчета сейсмостойкости сооружения / Ю. Л. Рутман, Э. Симборт. IX Всеукраинская научно-техническая конференция «Строительство в сейсмических районах Украины». Будівельні конструкції зб. Наук. Пр. — К.: ДП НДІБК, 2012. — Вип. 76. — С. 618–625.  
*Rutman Yu. L.* Analysis of the possibilities of applying the CAV energy criterion for calculating the seismic resistance of a structure / Yu. L. Rutman, E. Simbort. IX All-Ukrainian scientific and technical conference “Construction in seismic regions of Ukraine”. Budivelni designs zb. Science. Etc. — K.: DP ND1BK, 2012. — Vol. 76. — P. 618–625 (in Russian).
- Поляков С. В.* Последствия сильных землетрясений. — М.: Стройиздат, 1978. — 311 с.  
*Polyakov S. V.* Posledstviya sil'nykh zemletryaseniy. — Moscow: Stroyizdat, 1978. — 311 p. (in Russian).
- Ломниця Ц., Розенблюэт Э.* Сейсмический риск и инженерные решения. Пер. с англ. / Под ред. Ц. Ломниця, Э. Розенблюэта. — М.: Недра, 1981. — 375 с.  
*Lomnitz C., Rosenbluet E.* Seismic risk and engineering solutions. Trans. From the English / Ed. C. Lomnitz, E. Rosenbluyet. — Moscow: Nedra, 1981. — 375 p. (in Russian).
- Соснин А. В.* Об особенностях методологии нелинейного статического анализа и его согласованности с базовой нормативной методикой расчета зданий и сооружений на действие сейсмических сил // Bulletin of the South Ural University. Ser. Construction Engineering and Architecture. — 2016. — Vol. 16, No. 1. — P. 12–19.

- Sosnin A. V.* On the peculiarities of the methodology of non-linear static analysis and its consistency with the basic normative method for calculating buildings and structures for the action of seismic forces // Bulletin of the South Ural University. Ser. Construction Engineering and Architecture. — 2016. — Vol. 16, No. 1. — P. 12–19 (in Russian).
- СП 14.13330.2014. «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*». — М., 2014.
- SP 14.13330.2014. Construction in seismic regions. The updated edition of SNiP II-7-81\*. — Moscow, 2014 (in Russian).
- Стефанишин Д. В.* К вопросу оценки и учета сейсмического риска при принятии решений // Электронный журнал «Предотвращение аварий зданий и сооружений». — 2012. — 8 с. — [http://www.pamag.ru/prensa/calculation\\_seismic-risk](http://www.pamag.ru/prensa/calculation_seismic-risk)
- Stephanishin D. V.* On the issue of assessing and accounting for seismic risk in decision making // Electronic Journal “Prevention of accidents of buildings and structures”. — 2012. — 8 p. (in Russian).
- Уломов В. И., Шумилина Л. С.* Проблемы сейсмического районирования территории России. — М.: ВНИИТПИ Госстроя России, 1999. — 56 с.
- Ulomov V. I., Shumilina L. S.* Problems of seismic zoning of the territory of Russia. — Moscow: VNIINTPI Gosstroy Russia, 1999. — 56 p. (in Russian).
- Шивуа А. Д.* Энергетический метод расчета сейсмостойкости зданий и сооружений: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2016. — 118 с.
- Shivua A. D.* Energy method of calculation of seismic resistance of buildings and structures // Thesis for a scientific degree of Cand. Tech. Sciences. — St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2016. — 118 p. (in Russian).
- ATC-40.* Applied Technology Council (ATC). «Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings». Rep. No. ATC-40, Volumes 1 and 2, Redwood City, CA, 1996.
- ATC-55.* Applied Technology Council (ATC). «Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures». Rep. No. ATC-55, Redwood City, CA, 2005.
- Benavent-Climent A.* An energy-based procedure for assessment of seismic capacity of existing frames: Application to RC wide beam systems in Spain / A. Benavent-Climent, R. Zahran // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. — 2010. — Vol. 30. — P. 354–367.
- Chai R. Y. H.* Energy-based linear damage model for high-intensity seismic loading / R. Y. H. Chai // Journal of Structural Engineering, ASCE. — 1995. — 121 (5). — P. 857–863.
- Chopra A. K.* Capacity-demand diagram methods based on inelastic design spectrum / Chopra A. K., Goel R. K. // Proceedings of 12 World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000. — Paper No. 1612.
- Cosenza E.* An Evaluation of the Use of Damage Functional in Earthquake-Resistant Design / E. Cosenza, G. Manfredi, R. Ramasco // 9th European Conference on Earthquake Engineering. — Russia. — 1990. — Vol. 9. — P. 303–312.
- Erberik A., Sucuoglu H.* Seismic energy dissipation in deteriorating systems through low cycle fatigue // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. — 2004. — Vol. 33. — P. 49–67.
- Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance — Part 1: General Rules, Seismic actions and Rules for Buildings.* European Committee for Standardization. — Brussels, 2003. — 229 p.
- European Standard.* Eurocode-Basis of structural design: EN 1990: 2002 (E). — April, 2002. — 87 p.
- FEMA-273.* Building Seismic Safety Council. NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1997.
- FEMA-274.* Federal Emergency Management Agency. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington, D.C. — October, 1997.
- FEMA 356.* Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. American Society of Civil Engineers (ASCE), Washington, D.C. — November, 2000.

- Fajfar P., Krawinkler H.* (2004) Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation — Proceedings of the International Workshop Bled, Slovenia, June 28 – July 1, 2004. PEER Report 2004/05, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- Gupta B.* Enhanced pushover procedure and inelastic demand estimation for performance-based seismic evaluation of buildings, Ph.D. Dissertation, Orlando, Florida, University of Central Florida. — 1998.
- Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili G. A., Busalova M. S.* Assessing the reliability of a multi-storey monolithic concrete building with base // *Procedia Engineering*. — 2015. — No. 111. — P. 550–555 / WoS — 9TH ASIA–OCEANIA SYMPOSIUM ON FIRE SCIENCE AND TECHNOLOGY, No. 1, 2015.
- Mkrtychev O. V., Dzhinchvelashvili G. A., Busalova M. S.* Calculation accelerograms parameters for a “Construction-Basis” model, nonlinear properties of the soil taken into account / *Procedia Engineering*. — 2014. — Vol. 91. — P. 54–57.
- NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures.* Part 1: 1997 Edition. Building Seismic Safety Council (USA). — 342 p.
- Paz M.* Structural Dynamics: Theory and Computation / Mario Paz, William Leigh. — 5th ed., 2004. — 844 p.
- Sucuoglu H.* Energy-based hysteresis and damage for deteriorating systems / H. Sucuoglu, A. Erberik // *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. — 2004. — No. 33. — P. 69–88.
- Themelis S.* Pushover analysis for seismic assessment and design of structures, Heriot-Watt University, School of Built Environment, 2008.