

---

**НАШИ ГОСТИ**

---

УДК 699.841

DOI: 10.23671/VNC.2016.1.20722

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МНОГОУРОВНЕВОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ В СЕЙСМОСТОЙКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

© 2016 П.А. Реквава, д. т. н., проф.

Грузинская национальная ассоциация сейсмостойкого строительства и инженерной сейсмологии, Грузия, Тбилиси, ул. М. Лебанидзе, д. 7, e-mail: rekavavaaata@yahoo.com

В статье рассматривается концепция многоуровневого проектирования, которая сформирована анализом последствий разрушительных землетрясений.

Анализ проявлений сильных землетрясений показывает, что в последние десятилетия наблюдается активизация геодинамических процессов на Кавказе. Это в условиях Кавказа предполагает необходимость учета особенностей рельефа той или иной строительной площадки или более обширной территории существующей застройки. Оценка сейсмической опасности горных территорий и создание соответствующих карт предполагает при исследовании влияния воздействия на то или иное здание или сооружение использование метода конечных элементов. Это позволяет исследовать в их органической взаимосвязи: воздействие, пути распространения и реакция грунта и здания (сооружения) на него. Основная суть методологии заключается в планировании поведения зданий на основе вероятностной схемы, которая состоит из четырех шагов – анализ сейсмической опасности, конструктивный анализ, анализ повреждений и прогноз убытков.

**Ключевые слова:** многоуровневое проектирование, карты детального сейсмического районирования, карты сейсмического микрорайонирования.

Анализ проявлений сильных землетрясений показывает, что в последние десятилетия наблюдается активизация геодинамических процессов на Кавказе [Бондырев, Заалишвили, 2003]. Это в условиях Кавказа предполагает необходимость учета особенностей рельефа той или иной строительной площадки или более обширной территории существующей застройки [Заалишвили и др., 2006]. Оценка сейсмической опасности горных территорий и создание соответствующих карт предполагает при исследовании влияния воздействия на то или иное здание или сооружение использование метода конечных элементов, что создает условия для изучения в их органической взаимосвязи воздействие, пути распространения и реакцию грунта и здания (сооружения) на него [Заалишвили и др., 2008а]. Это позволяет учитывать в полной мере динамические свойства грунтов оснований зданий и сооружений при расчетах [Заалишвили и др., 2008б]. При этом большое значение приобретает адекватность создания карт инженерно-геологического районирования населенных пунктов, как основы карт сейсмической опасности грунтов.

Необходимо отметить, что после Рачинского землетрясения (Грузия, 1991) в Грузии были созданы условия для стремительного развития знаний путем вхождения в мировое научное сообщество и использования современных разработок. Участие в международных научных проектах позволило внедрить их в работы по

созданию моделей воздействий и карт сейсмической опасности. Это позволило создать к концу девяностых годов XX столетия в Грузии первые вероятностные карты сейсмической опасности территории Грузии в единицах макросейсмической интенсивности и ускорений. Необходимо отметить, что в 2009 году впервые в России для территории Северной Осетии были разработаны карты детального сейсмического районирования (ДСР) в масштабе 1:200 000. Карты ДСР, являясь по сравнению с картами Общего сейсмического районирования более детальными, позволяют учитывать имеющиеся данные о сейсмичности исследуемой территории и повторяемости сейсмических событий [Заалишвили и др., 2011].

Внедрение вероятностного подхода в задачи прогноза поведения грунтов оснований включает использование впервые разработанных вероятностных карт сейсмического микрорайонирования (СМР), т.е. непосредственный учет конкретных грунтовых условий [Заалишвили, 1986; 1996; Zaalishvili, 2015]. При этом в зависимости от характеристик конкретного сейсмического источника и его пространственного расположения относительно исследуемой площадки, с помощью развитых в последние годы методов рассчитываются сейсмические воздействия, генерируемые тем или иным разломом, для уровней ПЗ и МРЗ, в которых зоны различной сейсмичности будут определяться путем с учётом нелинейных свойств грунтов, приводящим к значительным искажениям исходных спектрально-амплитудных характеристик воздействий.

При этом соответствующие сейсмические зоны рассчитываются в единицах максимальных горизонтальных ускорений и величинах дробных значений сейсмической интенсивности как интегральной вероятностной характеристики проявления землетрясений, являющейся основой защиты сооружений [Заалишвили и др., 2014б; Заалишвили, Кранцфельд, 2014].

Анализ последствий сильных и разрушительных землетрясений показывает, что здания, которые запроектированы и построены в соответствии с требованиями строительных норм, в основном обеспечивают защиту жизни людей. Однако, из-за повреждения конструктивных и неконструктивных компонентов системы, экономические потери оказываются значительно выше, чем можно было ожидать. Это вызвало формирование новой концепции сейсмостойкого строительства, которая позволяет при проектировании планировать поведение зданий после землетрясений различной интенсивности по предварительно определённым предельным состояниям.

Это концепция или методология многоуровневого проектирования закладывает основы для проектных решений. Они принимаются по ожидаемым при землетрясениях результатам, с наименьшими финансовыми потерями для собственников и строителей.

Путём предварительного прогнозирования повреждений зданий, опирающегося на определённом опыте инженера-проектировщика, определяются ожидаемые результаты от несчастных случаев, финансовых убытков и прерывания функции зданий. Эта информация даёт возможность проектировщику и владельцу принять наиболее лучшее решение относительно эффективности различных альтернатив для контроля этих результатов.

В свете вышеизложенного, основная суть методологии заключается в планиро-

вании поведения зданий на основе вероятностной схемы, которая состоит из четырех шагов – анализ сейсмической опасности, конструктивный анализ, анализ повреждений и прогноз убытков. Результат каждого шага математически характеризуется одним из четырех обобщенных параметров: величиной интенсивности воздействия (IM), параметром технических требований (EDP), мерой повреждения (DM) и переменной решения (DV). Эти параметры выражаются в виде условной вероятности превышения и компоненты оценки поведения здания рассматриваются как марковский дискретный процесс, где узловые вероятности между параметрами независимые [Moehle et al., 2005].

Для решения поставленной задачи следует выполнять нелинейный анализ пространственной системы «здание-поверхность раздела – основание» при расчётном землетрясении, которое отражает интенсивность сейсмического движения грунтов исходя из регионального характера.

При формировании комплексной расчётной модели здания большое значение имеет учёт взаимодействия конструктивных и геотехнических компонентов и реальных свойств их материалов. Реакция сооружения в нелинейной стадии, т.е. предельное состояние безопасности жизни, связана с предельными величинами деформационных параметров конструкций. Таковыми являются: перемещения, податливость, индекс повреждения конструкции и значения перекосов этажей. Когда такие уровни поведения (состояния) здания, каковыми являются эксплуатационная пригодность, полное рабочее состояние, рабочее состояние, безопасность для жизни, предшествующее разрушению подобраны, тогда связанные с ними величины предельных параметров становятся приемлемыми критериями, которые проверяются на последующих стадиях проектирования.

Следующим шагом анализа является оценка повреждения, которая связывает параметры технических требований (неупругие деформации, перекосы этажей, усилия, напряжения) с мерой повреждения, что в свою очередь описывает физическое повреждение сооружения, для определения необходимости ремонта в целях обеспечения безопасности при повреждении.

Важный шаг процедуры – оценка убытков от землетрясения, в которой подразумевается прямая потеря (средства на ремонт и реставрацию) и потеря от прекращения функционирования объекта.

Заключительный шаг многоуровневого проектирования – принятие решения относительно экономического менеджмента (уменьшения) риска территории застройки.

Прогноз расчетного сейсмического воздействия, в условиях проектного и максимального расчетного землетрясения, для решения проблемы оценки реальной эксплуатационной надежности зданий, непосредственно связывается с интересом инвесторов, строительных компаний, проектных организаций и владельцев зданий.

Концептуальная зависимость между интенсивностью сейсмической опасности и конструктивным поведением здания представлена на рис. 1. Следовательно, современный подход проектирования в сейсмостойком строительстве фокусируется на дискретные уровни опасности и поведения, которые связаны с нужными состояниями зданий при землетрясениях.

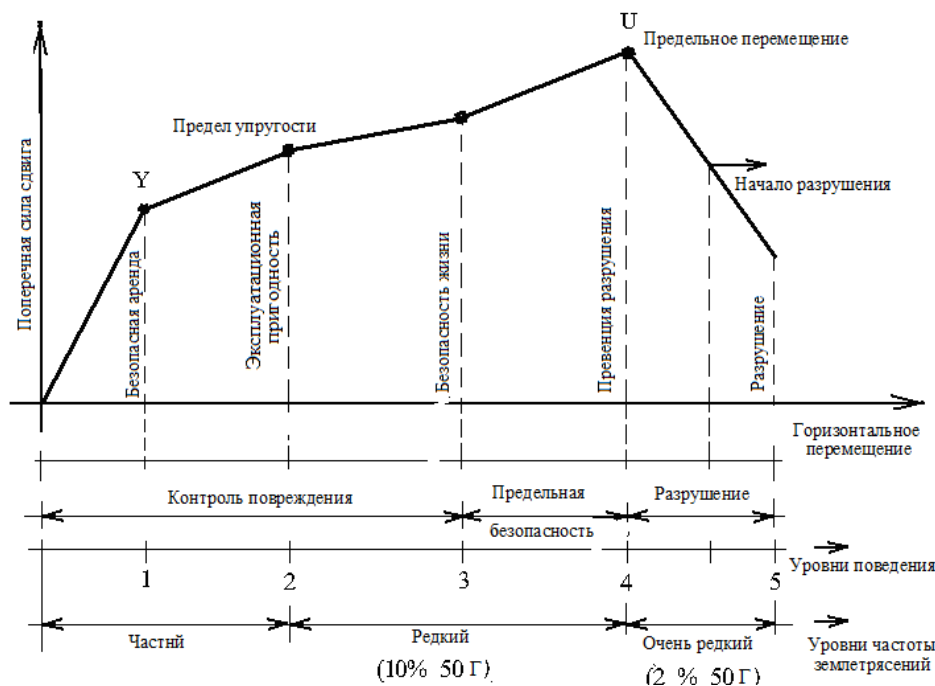


Рис. 1. Концептуальная зависимость между интенсивностью сейсмической опасности и поведением сооружения

Поведение здания можно выразить в виде непрерывных переменных, которыми являются выраженная в деньгах стоимость замены здания, исходя из интенсивности повреждения пропуск рабочего времени и интенсивности несчастных случаев. Специфические значения этих переменных могут быть связаны со специфическими уровнями поведения, но большое преимущество этих переменных заключается в том, что они определяются вероятностным методом и не требуют включения в предварительно определенных уровнях поведения [Реквава, 2009].

Таким образом, для включения переменной решения (DV) необходима оценка тех параметров, которые определяют сейсмическую опасность, технические требования к конструктивным системам и состояние повреждения.

Для вышеприведенных переменных основными параметрами являются:

для IM – местоположение и тип очага землетрясения, расположение и длина разлома, условия строительной площадки и грунтов;

для EDP – свойства основания и конструктивной системы, параметры расчетной модели, нагрузки от собственного веса конструкции;

для DM – здания и их конструктивные элементы, системы водопровода и электропроводки, элементы покрытия и перегородок, содержимое сооружения;

для DV – заселение, период ликвидации последствий землетрясения и связанные с ней ресурсы.

При этом обобщенные переменные обозначаются условными вероятностями превышения их определённых значений, т.е.:

$$P[A|B] = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (1)$$

Компоненты метода оценки поведения даны в табл. 1.

Таблица 1

Схема метода оценки поведения здания

Цели поведения	Переменные решения DV	Меры повреждения DM	Технические требования EDP	Сейсмическая опасность I,M
- разрушение и безопасность жизни $P_i < y$ - потери $< x$ - пропущенное время $< z$	- разрушение - количество несчастных случаев - потеря денег - продолжительность пропуска времени	- хрупкость предельных состояний - конструктивные - неконструктивные - содержимое	- инженерный анализ (перекос этажей, ускорение перекрытий), система “здание-поверхность раздела-основание”	- анализ опасности - сейсмическое движение грунтов
$\lambda$ (DM)	G(DV/DM)	G(DM/EDP)	G(EDP/IM)	$\lambda$ (IM)

Приведенные этапы, которые составляют основу поведения здания, выражаются соответствующим уравнением для желаемой реализации DV, в частности, его средняя годовая частота  $\lambda$  (DV) на основе теоремы полной вероятности имеет вид [Moehle et al., 2005]:

$$\lambda (DV) = \iiint G(DV|DM)dG(DM|EDP)dG(EDP|IM)d\lambda (IM) \quad (2)$$

Уравнение (2) выражает связь между основными элементами оценки поведения (анализ сейсмической опасности, прогноз параметров технических требований, моделирование состояния повреждения и оценка разрушения или убытков) – посредством трёх промежуточных IM, EDP и DM переменных.

Для вычисления интеграла необходимо параметрически оценить условные вероятности G(DV/DM), G(DM/EDP), G(EDP/IM) в диапазоне уровней соответствующих величин DM, EDP и IM. При этом в уравнении (2) dG(EDP/IM) следует вычислять для полного диапазона IM, что необходимо для установления окончательной величины DV.

### Литература

1. Бондырев И.В., Заалишвили В.Б. Опасность активизации геодинамических процессов на Северном Кавказе // Вестник Владикавказского научного центра. 2003. Т. 3. №2. С. 39-46.
2. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование по данным искусственного возбуждения колебаний грунтовой толщи // Автореферат кандидатской диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Институт Геофизики АН ГССР. Тбилиси, 1986.
3. Заалишвили В.Б. Сейсмическое микрорайонирование на основе изучения нелинейных свойств грунтов искусственными источниками // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Москва, 1996.

4. Заалишвили В.Б., Габеева И.Л., Гогмачадзе С.А. Оценка сейсмической опасности грунтов при сильных землетрясениях в условиях пересеченного рельефа в горных районах // В сборнике: Системные исследования современного состояния и пути развития Юга России (природа, общество, человек) Тезисы докладов международной научной конференции. 2006. С. 135-136.

5. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Отинадзе М.Г. Использование метода конечных элементов при оценке сейсмической опасности горных территорий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2008а. №3. С.49-52.

6. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В. Особенности динамического поведения грунтов территории г. Владикавказа // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2008б. №2. С. 67-71.

7. Заалишвили В.Б., Дзеранов Б.В., Габараев А.Ф. Актуализация карт сейсмической опасности территории Республики Северная Осетия-Алания // Труды IV Кавказской международной школы-семинара молодых ученых «Сейсмическая опасность и управление сейсмическим риском на Кавказе», Владикавказ, 24-26 октября 2011г., С. С.155-167.

8. Заалишвили В.Б., Мельков Д.А., Дзеранов Б.В., Шепелев В.Д. К вопросу использования дробных значений величин сейсмической интенсивности и ускорений // Вестник Академии наук Чеченской Республики. 2014б. №4(25). С. 86-95.

9. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). – М.: МГСУ, 2012. – 192 с.

10. Реквава П.А. Современное сейсмостойкое строительство. “Интеллект”, Тбилиси, 2009, 240 с.

11. Moehle J., Stojadinovic B., Der Kiureghian A., Yang T.Y. An application of PEER Performance-Based Earthquake Engineering Methodology. Research Digest No. 2005-1, PEER, University of California, Berkeley, CA, 2005.

DOI: 10.23671/VNC.2016.1.20722

## **SOME QUESTIONS OF MULTILEVEL DESIGN IN THE EARTHQUAKE-ENGINEERING**

**© 2016 P.A. Rekvava, Sc. Doctor (Tech.), prof.**

Georgian National Association for Earthquake Engineering and Engineering  
Seismology, Georgia, Tbilisi, M. Lebanidze street, 7,  
e-mail: rekvavapaata@yahoo.com

The concept of multilevel design, which is formed by the analysis of the destructive earthquakes consequences is examined.

The analysis of the strong earthquakes manifestations shows that the activation of geodynamic processes in the Caucasus is observed in the recent decades. This under the conditions of the Caucasus assumes the need for the calculation of the special relief features of one or other construction site or another or more extensive territory of the existing building. The estimation of the seismic danger of mountain territories and compiling the corresponding maps assumes using the final elements method with a study

of the impact influence on one or other building or construction. This makes it possible to investigate in their organic interrelation: the impact, the way of propagation and the response of soil and building (construction). The basic methodology essence consists in buildings behavior planning on the basis of probability scheme, which consists of four steps – the seismic danger analysis, design analysis, the damages analysis and the forecast of losses.

**Keywords:** multilevel design, the map of detailed seismic zonation, map of seismic microzonation.