

ОБ ОСНОВНЫХ ПРИНЦИПАХ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Быкова В.В., Татевосян Р.Э.

Институт физики Земли, РАН, г. Москва, vvb@ifz.ru

Введение

Целью вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) является получение оценок вероятности превышения некоторого уровня воздействий, выраженного в баллах макросейсмической шкалы или в количественных параметрах движения грунта. Оценки выполняются в заданной пространственной области и для заданного интервала времени. Сейсмические воздействия обусловлены землетрясениями, происходящими в некоторых очаговых областях – зонах возможных очагов землетрясений (ВОЗ). Основные принципы ВАСО были сформулированы еще в 1968 г. К.А. Корнеллом, который впервые и формализовал алгоритм. В настоящее время этот алгоритм стал классическим, и современные методы отличаются лишь более сложной реализацией. При расчетах используются уравнения ожидаемых движений грунтов с большим количеством коэффициентов, более точно оцениваются алеаторная и эпистемическая неопределенности; логические деревья включают большое количество ветвей, проводится деагрегация опасности.

В настоящей работе на примере оценки сейсмической опасности для участка магистрального газопровода «Якутия-Хабаровск-Владивосток» показаны основные принципы проведения ВАСО в его современной реализации и приведены полученные результаты.

Методика и постановка задачи

Методика проведения ВАСО сформировалась в конце прошлого века и хорошо описана в многочисленных публикациях (например, классических [1, 2]). Вычисления ВАСО основываются на формуле полной вероятности. Предполагая, что опасность определяется только одним землетрясением, которое может произойти в одном возможном очаге, вероятность того, что некоторый параметр сейсмических воздействий (пиковое ускорение, спектральное ускорение, интенсивность или др.) Y превысит значение y можно рассчитать как [1]:

$$P[Y > y] = \int P[Y > y | \mathbf{X}] f_X(\mathbf{X}) dx$$

где \mathbf{X} – вектор случайных переменных, определяющих y , $P[Y > y | \mathbf{X}]$ – вероятность того, что Y превысит y при заданном наборе \mathbf{X} , а $f_X(\mathbf{X})$ – плотность распределения \mathbf{X} . Обычно вектор \mathbf{X} включает в себя только магнитуду M и расстояние от очага до площадки R . Тогда в предположении независимости переменных M и R , вероятность превышения может быть переписана в виде:

$$P[Y > y] = \iint P[Y > y | m, r] f_M(m) f_R(r) dm dr$$

где $P[Y > y | m, r]$ – вероятность того, что землетрясение магнитуды m на расстоянии r вызовет воздействия, превышающие y , а $f_M(m)$ и $f_R(r)$ – плотности распределения магнитуды и расстояния. Однако последнее уравнение не несет никакой информации о том, насколько часто могут происходить землетрясения, поэтому вместо вычисления вероятности превышения уровня сейсмических воздействий y обычно вычисляют частоту превышения этого уровня за некоторый период времени:

$$\lambda[Y > y] = \lambda(M > m_{\min}) \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \int_0^{r_{\max}} P[Y > y | m, r] f_M(m) f_R(r) dm dr$$

где $\lambda(M > M_{\min})$ – частота землетрясений с магнитудой $M > M_{\min}$, а $\lambda(Y > y)$ – частота превышения воздействия y .

Для дальнейшего обобщения постановки задачи необходимо рассмотреть воздействия от нескольких источников N_S (зон ВОЗ), которые необходимо просто просуммировать. Наконец, для облегчения компьютерных вычислений можно перейти от интегралов по m и r к суммированию по соответствующим дискретным величинам, разбив диапазон возможных изменений M и R на интервалы N_M и N_R .

$$\lambda[Y > y] = \sum_{i=1}^{N_s} \lambda(M > m_{\min}) \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} P[Y > y | m_j, r_k] P(M_i = m_j) P(R_i = r_k)$$

В настоящей работе эти известные формулы приводятся для напоминания основных идей метода и его алгоритма. Таким образом, методология ВАСО совмещает неопределенности в положении эпицентров землетрясений, их магнитуд и сейсмических воздействий с тем, чтобы получить частоту превышения заданного воздействия в некоторый период времени или определить воздействие, которое не будет превышено в заданный интервал времени.

Основным результатом ВАСО является кривая опасности – график вероятностей превышения (обычно в год) некоторых воздействий (например, пиковых ускорений грунта). ВАСО – это методология, используемая для оценки того, как часто может быть достигнуто или превышено сейсмическое воздействие на исследуемой площадке. Она синтезирует знания о том, где происходят землетрясения, как часто они происходят, какова их магнитуда, какие сейсмические воздействия могут быть ими вызваны и как они могут измениться с магнитудой, расстоянием и, возможно, азимутом, и неопределенности, которые связаны как непосредственно с моделями сейсмогенеза и с эффектами возбуждения-распространения воздействий (эпистемическая неопределенность), так и с внутренней неопределенностью того, какое именно землетрясение происходит, и какие именно воздействия оно вызывает (алеаторная неопределенность).

В последнее десятилетие реализация метода существенно усложнилась. Это связано, в первую очередь, с особенностями учета неопределенностей при расчетах. Алеаторная неопределенность, определяется в моделях движений грунтов (МДГ). Разработка МДГ является в последние годы наиболее бурно развивающейся областью инженерной сейсмологии. Вследствие улучшения качества и расширения сетей регистрации сильных движений по всему миру количество эмпирических моделей движений грунтов существенно увеличилось. В таблице приведены сведения о количестве МДГ с 1964 по 2015 гг. по данным Дж. Дугласа [3-5]. Как видно, увеличивается не только количество МДГ, но и количество параметров, определяемых этими моделями.

Таблица. Количество моделей движений грунтов, разработанных в разные годы по данным [3-5] для пиковых ускорений грунта (PGA), спектральных ускорений (SA), интенсивности Ариаса (Arias intensity), пиковых скоростей и смещений грунта (PGV и PGD), относительной значимой продолжительности колебаний (RSD), кумулятивной средней скорости (CAV), амплитуды спектра Фурье (FAS).

	PGA	SA, T=0–2c	Arias intensity	PGV	PGD	RSD	CAV	FAS	Средний период
1964–2010 Апрель 2011	289	188							
1964-2014 Октябрь 15, 2014	363	230	23	97	25	14			
1964-2015 Август 20, 2015	384	246	25	110	26	14	5	12	4

Кроме того, также увеличивается количество параметров в самих моделях, что приводит к усложнению формул. И если раньше выражение, например, для пиковых ускорений грунта содержало в качестве параметров только магнитуду, расстояние и некоторый коэффициент, учитывающий тип грунтовых условий, то теперь количество параметров в выражении достигает десятка и содержит также V_{s30} – скорость поперечных волн в верхних 30 м, параметры (или тип) механизма очага, глубину до поверхности разрыва, глубину до поверхности осадочного горизонта и т.п. Как кажется, использование больших наборов наблюдательных данных более высокого качества для построения моделей, а также введение большего числа параметров в них должно привести к уменьшению неопределенности, однако, на практике оказывается, что это не так, и алеаторные неопределенности в современных моделях меньше не становятся.

Для учета эпистемической неопределенности стандартным инструментом, широко применяющимся при расчетах ВАСО, является логическое дерево [6], которое включает в себя различные альтернативные модели сейсмической опасности. Экспертно или на основании формальных критериев можно задать веса различным моделям и их отдельным элементам. Целью создания логического дерева является учет неопределенности в каждой из компонент, которые составляют модель опасности.

В отечественной практике оценка сейсмической опасности методом ВАСО есть результат синтеза трех видов работ: а) сейсмологических, б) сеймотектонических и в) сейсмического микрорайонирования. Первые два вида работ составляют детальное сейсмическое районирование (ДСР). В части сейсмологических исходных данных ДСР предусматривает: 1) изыскания в области исторической сейсмичности, 2) обобщение и анализ инструментальных данных о землетрясениях, 3) проведение собственных сейсмических наблюдений на временной сети станций. В части проведения расчетов воздействий ДСР требует 4) реализовать вероятностный подход, который соотносит ожидаемые сейсмические воздействия к определенному периоду времени. ДСР проводится для средних грунтовых условий; 5) итоговая оценка учитывает конкретные грунтовые условия в рамках работ по сейсмическому микрорайонированию.

В качестве примера реализации всех этих этапов можно рассмотреть проведение ВАСО, выполненного ИФЗ РАН для участка магистрального газопровода «Якутия - Хабаровск – Владивосток». Целью работ было получение оценки параметров сейсмических воздействий (интенсивностей и пиковых ускорений грунта), которые не будут превышены с вероятностью 1, 5 и 10% в течение 50 лет. Исследовались два альтернативных варианта трассы проектируемого газопровода (Рис. 1). Уникальность исследования определяется самим объектом, протяженность которого превышает 2500 км. Такие большие расстояния изначально подразумевают принадлежность различных участков трассы к совершенно различным сеймотектоническим и сейсмическим условиям: от достаточно активных до относительно спокойных. ИФЗ РАН были организованы полномасштабные сеймотектонические и сейсмологические наблюдения, а также работы по сейсмическому микрорайонированию.

Сейсмологические исследования

Важной составной частью сейсмологических работ является исследование исторической сейсмичности. Исследования проводились на основании современных подходов исторической сейсмологии, которые предписывают использование информации из оригинальных источников, учета исторического контекста и всех обстоятельств, в которых создавался документ. В частности, были пересмотрены магнитуда и координаты известного землетрясения 1725 г. Используя публикации дневников натуралиста Даниэля Готлиба Мессершмидта, который на момент землетрясения был в Читинском остроге (ныне г. Чита) и сам ощущал его, мы убедились, что в последующем к его оригинальным сообщениям были добавлены некоторые непроверенные сведения. Кроме того, к макросейсмической информации с конкретной датировкой были добавлены сведения о палеосейсмоструктурах, возраст которых определялся в лучшем случае с точностью ± 500 лет. Это позволило обоснованно предложить альтернативные варианты решений, которые удовлетворяют новым данным. В результате решение с магнитудой 6.8 признано более предпочтительным по сравнению с решением ($M=8.5$), опубликованном в [7].

При исследовании землетрясений по инструментальным данным (1900-2011 г.) пришлось столкнуться с серьезными проблемами. Поскольку в различных агентствах для одного и того же землетрясения приводятся отличающиеся друг от друга решения, сначала было необходимо собрать все имеющиеся сведения из различных источников. Создана база данных, включающая сведения из международных сейсмологических агентств и региональных центров. Записи из различных агентств, относящиеся к одному и тому же землетрясению, были сгруппированы. Все разнотипные магнитуды приведены к единой шкале. Количество записей в базе данных – 41642; количество землетрясений в каталоге – 33630. Для некоторых наиболее сильных землетрясений проверялись исходные данные, и окончательное решение выбиралось индивидуально. Для остальных сейсмических событий была выработана система приоритетов источников информации в зависимости от величины землетрясения. Для более сильных землетрясений высокий приоритет был отдан международным агентствам, поскольку они используют станции всей мировой сети, улучшая тем самым азимутальное покрытие. Для слабых событий более высокий приоритет у региональных агентств, поскольку мировые сейсмологические центры не всегда аккуратно и детально обрабатывают такие события.

Точность локации гипоцентров землетрясений существенным образом зависит от того, насколько близко расположена сейсмометрическая сеть к очагу сейсмического события. Обычно региональные расстояния между станциями в сотни километров не обеспечивают необходимой точности. При больших расстояниях между станциями особенно проблематично надежно контролировать глубину гипоцентра. В рамках проведенных работ по оценке сейсмической опасности была развернута временная сеть станций. Сеть была организована таким образом, чтобы контролировать локальную сейсмичность вдоль проектируемой трассы магистрального газопровода,

т.е. была проблемно ориентированной. На рисунке 1 показана сеть временных сейсмологических станций (черные треугольники), установленных ИФЗ РАН, а также альтернативные варианты трассы проектируемого газопровода (черные линии) и эпицентры зарегистрированных землетрясений (белые кружки). Необходимо отметить, что в пределах действия временной сети нет ни одной региональной станции. Сеть успешно проработала в течение всего периода наблюдений с июля по декабрь 2014 г. Получены уникальные данные о локальной сейсмичности.

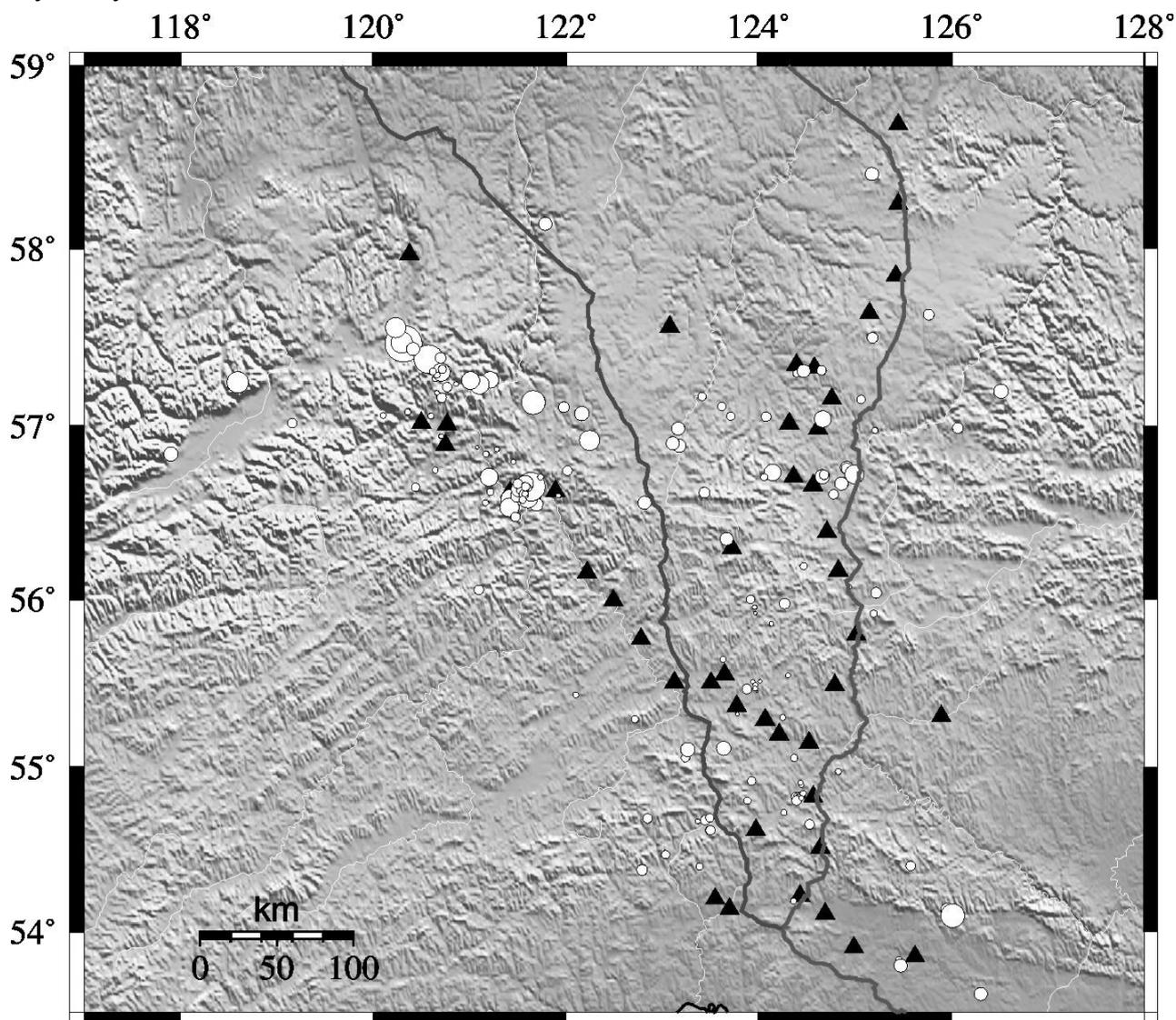


Рис. 1. Сеть временных сейсмологических станций (черные треугольники), установленных ИФЗ РАН, альтернативные варианты трассы проектируемого газопровода (черные линии) и эпицентры зарегистрированных землетрясений (белые кружки).

Описание результатов

На основании синтеза результатов сейсмологических и сеймотектонических работ была создана модель, которая использовалась на следующем этапе работ для расчета сейсмической опасности. Итоговая модель зон ВОЗ состояла из 32 зон, каждая из которых характеризовалась максимальной ожидаемой магнитудой землетрясения M_{max} , глубиной, на которой может реализоваться такое событие, преобладающим механизмом очагов в зоне и графиком повторяемости землетрясений различных магнитуд. Диапазон изменения M_{max} в различных зонах составлял от 4.5 до 7.5. Распределение землетрясений по глубине позволило построить огибающую, которая использована в оценке опасности. Детальность карты зон ВОЗ позволяет утверждать, что оценка сейсмической опасности, рассчитанная на ее основании, соответствует уровню ДСР. Для сравнения можно указать, что для расчета карт общего сейсмического районирования на данной территории выделены всего несколько сильно генерализованных зон. На рисунке 2 приведены результаты расчетов в терминах интенсивности сейсмических воздействий.

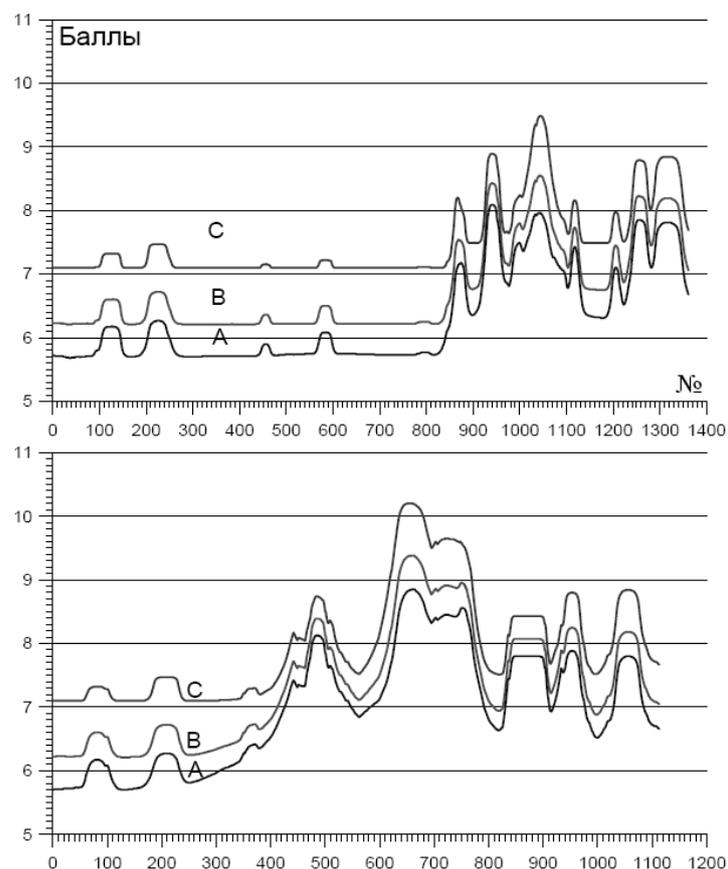


Рис. 2. Результаты расчета макросейсмической интенсивности, выполненные для вероятности превышения 1, 5 и 10% в течение 50 лет, что соответствует картам ОСР-97 А, В, С (периоды повторяемости соответственно 100, 1000, 5000 лет); по оси абсцисс – номера пикетов трассы, по оси ординат – интенсивность в баллах. Вверху – вариант трассы 1, внизу – вариант 2.

Заключение

В работе описаны основные принципы вероятностного анализа сейсмической опасности, сформулированы этапы его проведения в отечественной практике, намечены проблемы современных реализаций. В качестве примера приведено выполнение ВАСО в рамках работ по инженерно-геологическим изысканиям трассы магистрального газопровода «Якутия–Хабаровск–Владивосток», для чего были проведены сейсмологические и сеймотектонические исследования территории и сейсмическое микрорайонирование. Расчеты опираются на схему зон ВОЗ, конфигурация которых и максимально ожидаемые магнитуды землетрясений в них определены в результате совместного анализа результатов сейсмологических и сеймотектонических исследований. Расчеты относятся к средним грунтовым условиям. В результате проведенных работ из двух вариантов проекта определен более безопасный по сейсмическим условиям.

Работа частично поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований, проект № 14-05-00258.

Список литературы

1. Kramer S.L., Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall Inc., 1996, 672 pp.
2. McGuire, R.K., Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Engineering Research Institute Monograph MNO-10, 2004, 221 pp.
3. Douglas, J. Ground-motion prediction equations 1964-2010. // Final Report BRGM/RP-59356-FR, 2011, 446p.
4. Douglas, J., Fifty years of ground-motion models, // Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Turkey, 2014.
5. Douglas, J., Ground motion prediction equations 1964-2015, Website <http://www.gmpe.org.uk>, 2015.
6. IAEA Safety Guide № SSG-9, Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. Vienna, 2010.
7. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г., ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин, М.: Наука, 1977, 506с.