

# АЛГОРИТМЫ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ

В. А. Миронов<sup>1</sup>, С. А. Перетокин<sup>2</sup>, К. В. Симонов<sup>1</sup>, М. А. Курако<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> *Институт вычислительного моделирования СО РАН, 660036, Красноярск*

<sup>2</sup> *СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН, 660049, Красноярск*

<sup>3</sup> *Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск*

УДК 550.34

DOI: 10.24411/9999-016A-2019-10053

Исследование посвящено разработке вычислительной методики вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) как одного из основных этапов в инженерно-сейсмологических изысканиях. От выбора программного обеспечения для проведения ВАСО, понимания его возможностей и ограничений во многом зависит результат исследований. В работе рассматриваются современные подходы к оценке сейсмической опасности и представлен обзор развития программных средств ВАСО.

**Ключевые слова:** ВАСО, анализ сейсмической опасности, землетрясение, сейсмические параметры опасности, программное обеспечение для ВАСО.

## Введение

Оценка сейсмической опасности площадки строительства — это неотъемлемая часть комплекса инженерно-геологических изысканий при проектировании ответственных объектов. В отечественных нормативных документах сейсмическая опасность, как правило, складывается из оценки исходной сейсмичности на некоторых средних грунтах и поправки на реальные грунтовые условия площадки (сейсмическое микрорайонирование — СМР). При этом оценки исходной сейсмичности либо принимаются по картам общего сейсмического районирования (ОСР), либо уточняются по результатам детального сейсмического районирования (ДСР). С 26.11.2018 г. в действие вступил свод правил СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». В соответствии с пунктом 4.3 для уточнения сейсмичности района строительства объектов повышенного уровня ответственности необходимо проводить специализированные сейсмологические и сейсмотектонические исследования (ДСР).

Состав исследований ДСР существенно зависит от типа и уровня ответственности проектируемого сооружения. Например, для гидротехнических сооружений и объектов атомной отрасли приняты ведомственные нормативные документы, регламентирующие перечень требований, мероприятий и методик, обязательных при выполнении ДСР. Однако, общее для всех то, что характеристики сейсмических воздействий, получаемые в результате работ ДСР, должны иметь обеспеченность, соответствующую уточняемой карте ОСР.

Как и в большинстве стран мира, в Российской Федерации принят вероятностный подход к оценке сейсмической опасности. Нормативный комплект карт ОСР состоит из трёх карт А, В и С, отражающих интенсивность сотрясений, которая не будет превышена в течение 50 лет с вероятностью 90%, 95% и 99% соответственно. Выбор карты А, В или С, по сути, это выбор уровня приемлемого риска в 10%, 5% или 1% того, что будет превышено сейсмическое воздействие, на которое проектируется сооружение.

## 1 Детерминистский подход при анализе сейсмической опасности

Детерминистский анализ сейсмической опасности (ДАСО, англ. DSHA — deterministic seismic hazard analysis) — это наиболее очевидный и исторически сложившийся подход. Значение интересующего параметра опасности оценивается для максимально возможной магнитуды землетрясения в каждой зоне возникновения очагов

землетрясения (ВОЗ) по кратчайшему расстоянию до гипоцентра [1]. Детерминистский подход не учитывает случайную природу, присущую таким параметрам землетрясения, как магнитуда, времена повторяемости, положение гипоцентра [2]. Для расчёта используется один сценарий, описывающий вариант максимально-возможного землетрясения.

Существует несколько процедур выбора максимально возможной магнитуды землетрясения. Первая основана на записях о крупнейших исторических землетрясениях и палеосейсмических данных. Этот подход особенно применим в районах с низкой сейсмичностью, где крупные события имеют долгий период повторяемости [2]. При отсутствии каких-либо тектоно-геологических данных предполагается, что максимально возможная магнитуда равна либо максимально наблюдаемой в заданном районе, либо к ней прибавляется некоторое приращение. Обычно это приращение варьируется от 0,25 до 1 единицы магнитуды [1].

Другая часто используемая детерминистическая процедура для оценки максимальной магнитуды, особенно для площадных сейсмических источников, основана на экстраполяции магнитудно-частотной зависимости Гутенберга-Рихтера. Примером таких процедур экстраполяции являются процедура, изложенная Фрелихом, и процедура, применяемая Нютли [1]. Также существуют методы, где значение максимальной магнитуды оценивают по скорости накопления напряжения или градиенту скорости долговременной тектонической деформации. Однако в большинстве случаев неопределённость по максимальной магнитуде часто достигает 1 единицы магнитуды.

Таким образом, ДАСО позволяет определить сейсмическую опасность исходя из наиболее негативного сценария — максимально возможного землетрясения, без учёта надёжности определения максимальных магнитуд, без учёта неоднозначности модели затухания и т.д.

## 2 Классический подход для вероятностного анализа сейсмической опасности

Поскольку одиночный сценарий землетрясения не в состоянии обеспечить высокий уровень надёжности полученных результатов, альтернативным подходом для оценки сейсмичности исследуемых площадок является вероятностный анализ сейсмической опасности (ВАСО, англ. PSHA — probabilistic seismic hazard analysis). Оценка опасности методом ВАСО состоит в определении ожидаемого уровня превышения параметров сейсмической опасности с необходимым уровнем надёжности (достоверности), с заданной вероятностью, для всех возможных землетрясений, которые вероятно произойдут в течение заданного промежутка времени [3]. Сейсмическая опасность по ВАСО тесно связана с понятием сейсмической сотрясаемости, введённым Ю.В. Ризниченко в 1965 г.

Как вычислительная процедура подход ВАСО впервые был представлен Корнеллом для пикового ускорения грунта [3]. Чтобы учесть случайную природу возникновения землетрясений он использовал магнитудно-частотную зависимость Гутенберга-Рихтера. Повторяемость землетрясений по времени Корнелл рассматривал как пуассоновский процесс [4], который соответственно следует пуассоновскому распределению. Эпицентры возможных землетрясений равномерно распределялись вдоль линейного разлома или по площади вокруг исследуемой точки наблюдения, а также рассматривались как точечные источники [3]. Для оценки интенсивности в баллах шкалы Меркалли использовалась модель затухания или так называемое уравнение прогнозирования движения грунта (УПДГ, англ. GMPE — ground motion prediction equation) следующего вида:

$$\text{MMI} = c_1 + c_2 M - c_3 \ln R, \quad (1)$$

где MMI — интенсивность в баллах шкалы Меркалли,  $R$  — фокальное расстояние до очага,  $M$  — магнитуда,  $c_1, c_2, c_3$  — полуэмпирические константы [5].

Для оценки пикового ускорения грунта (ПУГ, англ. PGA — peak ground acceleration) использовалось следующее УПДГ со своим набором констант:

$$\text{PGA} = b_1 \cdot e^{b_2 M} \cdot R^{-b_2}. \quad (2)$$

Отметим, что уравнение для оценки интенсивности землетрясения по шкале Меркалли имеет очень схожий характер с уравнением макросейсмического поля Блейка-Шебалина для точечного источника. В своих исследованиях Корнелл также отмечал, что полная вероятность превышения параметров сейсмической опасности является суммой вкладов от всех источников землетрясений [4].

Вероятностный подход, который предложил Корнелл для оценки сейсмической опасности, в современной литературе трактуется как *классический* ВАСО. Согласно данному подходу, для того чтобы вычислить вероятность превышения заданной амплитуды движения грунта на исследуемой площадке, вклады опасности интегрируются по всем магнитудам и расстояниям для всех зон ВОЗ по теореме о полной вероятности [2]. Таким образом, вероятность превышения определённого уровня сотрясения  $y^*$  на площадке равна:

$$\mathbb{P}(Y > y^*) = \sum_i \alpha_i \int_{M_{MIN}}^{M_{MAX}} \int_{R_0}^{R_{MAX}} f_{m,i}(M) \cdot f_{r,i}(R) \cdot \mathbb{P}(Y > y^* | M, R) dM dR, \quad (3)$$

где  $\alpha_i$  — средняя годовая повторяемость землетрясений в  $i$ -м источнике,  $f_{m,i}(M)$  — функция плотности вероятности магнитуды в  $i$ -м источнике,  $f_{r,i}(R)$  — функция плотности вероятности эпицентрального расстояния между различными положениями эпицентров в  $i$ -м источнике и площадкой,  $\mathbb{P}(Y > y^* | M, R)$  — вероятность того, что амплитуда движения грунта при землетрясении с магнитудой  $M$  и эпицентральной расстоянием  $R$  превысит  $y^*$  [2].

Оригинальный метод не учитывал вероятностный разброс амплитуд движения грунта вокруг среднего значения в моделях затухания. Многие ранние, а так же некоторые более поздние исследования также не учитывали случайный разброс в параметрах опасности при проведении ВАСО [3]. Отметим, что Корнелл в своей работе 1968 г. использовал неограниченную по магнитуде зависимость Гутенберга-Рихтера (отсутствовала верхняя граница возможной магнитуды), что приводило к линейной зависимости в логарифмическом масштабе кривой вероятности превышения амплитуды колебания грунта [5]. Но в дальнейшем, в работе 1969 г. он признавал, что магнитудно-частотная зависимость должна быть ограниченной [6].

Классический подход для ВАСО, известный как подход Корнелла-Макгвайера, включает четыре шага:

- Идентификация и параметризация сейсмических источников, которые оказывают влияние на исследуемую площадку. Источники могут быть представлены как площади, разломы, точки и др. Площадной источник часто используется, когда мы не можем идентифицировать определённый разлом. Каждому источнику землетрясений присваивается равномерное распределение сейсмичности, допуская, что очаги землетрясений равновероятно будут происходить в любой точке в зоне источника [1];
- Характеристика временного и магнитудного распределения сейсмичности для источника. Классический подход предполагает, что повторяемость землетрясений во времени статистически независима, что землетрясения происходят с постоянной частотой, а повторяемость будущих событий не зависит от последнего произошедшего землетрясения [1]. Наиболее часто используемая модель повторяемости магнитуд — это магнитудно-частотная зависимость Гутенберга-Рихтера и зависимость характеристических землетрясений (обе используются в различных модификациях);
- Вычисление УПДГ и их неопределённостей. УПДГ используется, чтобы прогнозировать движение грунта в точках наблюдения. Вычисляемые параметры в УПДГ включают в себя пиковое ускорение грунта, пиковые скорости грунта, пиковые смещения грунта, спектральные ускорения, интенсивность, продолжительность сильного движения грунта и пр. Большинство УПДГ, доступные сегодня — эмпирические, и зависят от магнитуды, расстояния источник-площадка, типа разлома и локальных условий площадки [1]. Выбор УПДГ является важным моментом, поскольку часто УПДГ — это основной фактор вклада неопределённостей при выполнении ВАСО;
- Реализация и учёт различных видов неопределённостей. Например, в положении землетрясения в зоне ВОЗ, в магнитудах, в графиках повторяемости. Конечным результатом ВАСО являются вероятности превышения заданного параметра движения грунта хотя бы от одного события и спектры реакции грунта на определённом пункте наблюдения [1].

### 3 Вероятностный анализ сейсмической опасности на основе метода Монте Карло

В последнее время наблюдается тенденция к решению проблемы ВАСО с помощью моделирования методом Монте-Карло. Этот метод также известен как стохастический метод, ранее в 1980-х годах использовался для численной оценки сейсмической опасности. Его использовали Розенхауэр, Шапира, Джонсон и Коянаги, однако широкое распространение метод получил после работ Муссона [7].

Процедуру ВАСО на основе метода Монте-Карло можно условно разделить на два этапа:

1. На основе модели зон ВОЗ генерируется каталог землетрясений для заданного периода времени в  $T$  лет. Каждое землетрясение характеризуется набором параметров: магнитудой; длиной и шириной площадки очага; азимутом её верхней кромки, задающим направление простираения очага; углом её падения (углом между горизонтальной плоскостью и площадкой очага); географическими координатами и глубиной гипоцентра;
2. Вычисляется сейсмический эффект от каждого землетрясения в расчётной точке на основе принятой модели затухания и набирается статистика по количеству сотрясений разной интенсивности. Полученная статистика переводится в кумулятивный вид, из которого рассчитываются кривые опасности.

Использование метода Монте-Карло позволяет получить прозрачную схему расчёта на каждом шаге вычислений и возможность более тонкой настройки моделей зон ВОЗ. Использование весьма длительного синтетического каталога землетрясений позволяет учесть неопределённости в случайном характере параметров возможных землетрясений, что позволяет существенно упрощать логическое дерево в части учёта неопределённостей параметров зон ВОЗ.

Наиболее известным комплексом программных модулей для проведения ВАСО методом Монте-Карло является программный комплекс EqHaz. В нём реализованы три программных модуля. EqHaz1 генерирует синтетический каталог на основе заданных параметров. EqHaz2 вычисляет кривые опасности на основе сгенерированного каталога, выбранного УПДВ и заданных неопределённостей. EqHaz3 вычисляет значение движения грунта для заданного периода повторяемости и выполняет процесс деагрегации вкладов вероятностей превышения значения движения грунта от землетрясений [8].

Отметим, что для создания отечественного комплекта карт ОСП-97 был использован пакет программ PRB-60, разработанный в 1994-1995 гг. Реализованная в нём процедура ВАСО базируется на методе Монте-Карло. Методические основы пакета и базовые алгоритмы были разработаны А.А. Гусевым с участием Л.С. Шумилиной и В.М. Павлова. Программная реализация пакета осуществлена В.М. Павловым. Актуализация PRB-60 выполнялась в 2003, 2010 и 2016 годах. Последняя модификация этого ПО получила наименование EAST-2016.

## 4 Развитие программных средств на основе классического подхода ВАСО

В 1976 году Макгвайер реализовал алгоритм вычисления ВАСО на основе метода Корнелла в программе EQRISK [9]. Программа EQRISK выполняла ВАСО, используя только площадные источники землетрясений и уже ограниченное магнитудно-частотное распределение Гутерберга-Рихтера 1958 года [10]. В заложенном алгоритме площадной источник землетрясений делится на субисточники окружностями, центр которых находится в точке исследования с заданным шагом по радиусу. Так как повторяемость равномерно распределена по всей площади исходной зоны ВОЗ, повторяемость каждого субисточника соотносится с повторяемостью исходного также как соотносятся их площади. Далее по методу Корнелла производится расчёт сейсмической опасности от каждого субисточника. Однако вычисление ВАСО выполнялись только для средних значений движения грунта, без учёта неопределённостей [10].

В 1978 году Макгвайер реализовал метод Корнелла в программе FRISK [11]. Программа FRISK выполняла ВАСО для прямолинейных разломов или разломов, состоящих из нескольких прямолинейных сегментов. В FRISK использовались ограниченное кусочно-экспоненциальное магнитудно-частотное распределение, логнормальное распределение для длины разрыва и равномерное распределение положения разрыва на разломе. Если разлом (или линеамент) — это линия, вдоль которой равномерно распределены эпицентры землетрясений, то разрыв — это только та область разлома, на которой происходит процесс смещения грунтов при землетрясении (в данном случае разрывы представлены линиями).

Для вычисления использовались ближайшие расстояния от разрыва на разломе до точки наблюдения. В программе учитывались неопределённости для следующих параметров: магнитуды будущих землетрясений; длины разрыва (которая является функцией от магнитуды); положения разрыва на разломе; значений движения грунта.

Кроме введения неопределённостей и типа рассматриваемых источников FRISK отличался от EQRISK тем, что рассчитываемое значение движения грунта зависело и от длины разрыва на разломе. Также имелась возможность задания сетки точек наблюдения на исследуемой площадке. Впоследствии FRISK и EQRISK

были взяты за основу для разработки программы FRISK88M с более расширенными возможностями для расчёта ВАСО [9]. FRISK88M активно использовался в прошлом, например, для построения вероятностных карт сейсмической опасности Южно-Американской субдукционной зоны [12].

Андерсон и Трифунак в 1977 году в своей работе по вычислению Фурье спектра амплитуд ускорений провели ВАСО моделированием сейсмичности с более реалистичным подходом [13]. Они использовали пять различных видов источника: точечный; линейный; площадной с произвольной границей, произвольно падающую плоскость разлома и объёмный источник произвольной формы. В разработанном алгоритме расчёта сейсмической опасности использовались два метода. В первом методе модель затухания зависела от эпицентрального расстояния до источника землетрясения (как в работах Макгвайера и Корнелла), а во втором — от расстояния до ближайшей точки разрыва, происходящего в зонах ВОЗ, с учётом длины и направления разрывов. При этом разрывы были представлены кругами заданного радиуса.

Одним из наиболее распространенных инструментов вычисления сейсмической опасности являлась программа SEISRISK III — последняя версия семейства программ SEISRISK. Данная программа и её предыдущие версии использовали классический подход ВАСО и весьма схожий алгоритм расчёта, который использовали Корнелл и Макгвайер.

Таким образом, можно отметить, что метод, который разработал Корнелл, претерпевал изменения, реализовывался и развивался в различных программах для решения задачи оценки сейсмической опасности. Модели зон ВОЗ становились всё более физическими, а расчёты сейсмической опасности выполнялись на ЭВМ.

## Заключение

Поскольку получение корректных оценок сейсмической опасности территорий под строительство и эксплуатацию объектов разной степени ответственности является актуальной задачей, выбор программы и алгоритмов, на основе которых выполняется ВАСО, является очень важным моментом в исследованиях. Можно утверждать, что выбор инструмента ВАСО сказывается на корректности и надёжности полученных результатов.

На протяжении более полувека методы расчета ВАСО улучшаются и претерпевают изменения. Простые точечные источники землетрясений стали более сложными по геометрии и параметрам, стали физически более обоснованными. УПДГ становятся более сложными, с большим набором влияющих параметров. В настоящее время, в связи с развитием ЭВМ, развитием ГИС технологий, накоплением базы данных записанных землетрясений и определением их параметров, существует необходимость постоянно развивать и дополнять возможности программных модулей.

## Список литературы

- [1] Kijko A. Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis // Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Springer, 2011. p. 1–27.
- [2] Atkinson G.M. The Integration of Emerging Trends in Engineering Seismology // 13th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal (September 24–28, 2012). Lisbon, 2012.
- [3] Gupta I.D. Probabilistic seismic hazard analyses method for mapping of spectral amplitudes and other design-specific quantities to estimate the earthquake effects on manmade structures // ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 480. 2007. V. 44. No. 1, March. p. 127–167.
- [4] McGuire R.K. Probabilistic seismic hazard analysis: Early history // Earthquake Engng Struct. Dyn. 2008, 37. p. 329–338.
- [5] Cornell C.A. Engineering seismic risk analysis // Bulletin of the Seismological Society of America. 1968, 58 (5). p. 1583–1606.
- [6] Cornell C.A., Vanmarcke E.H. The major influences on seismic risk // Proceedings of the 4th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile, 1969.
- [7] Musson R.M.W. The use of Monte Carlo simulations for seismic hazard assessment in the U.K. // Annali Di Geofisica. 2000, No. 43. p. 1–9.

- [8] Atkinson G.M., Assatourians K. EqHaz: An Open-Source Probabilistic Seismic-Hazard Code Based on the Monte Carlo Simulation Approach // Seismological Research Letters, 2013. V. 84, No. 3. p. 516–524.
- [9] Monelli P.D., Weatherill G., et al. OpenQuake Engine: An Open Hazard (and Risk) Software for the Global Earthquake Model // Seismological Research Letters. 2014. V. 85, No. 3. p. 692–702.
- [10] McGuire R. Fortran program for seismic risk analysis // U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 76-67.
- [11] McGuire R. FRISK: Computer program for seismic risk analysis using faults as earthquake sources // U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 78-1007.
- [12] Dimate C., Drake L., Yepes H., et al. Seismic hazard assessment in the Northern Andes (PILOTO Project) // Annally Di Geofisica. 1999. V. 42. No. 6. p. 1039–1055.
- [13] Anderson J.G., and Trifunac M.D. On Uniform Risk Functionals Which Describe Strong Earthquake Ground Motion: Definition, Numerical Estimation, and an Application to the Fourier Amplitude Spectrum of Acceleration // Report CE 77-02, University of Southern California, Los Angeles, U.S.A, 1977.

*Симонов Константин Васильевич — д.т.н., в.н.с. Института вычислительного моделирования СО РАН;*  
*e-mail: simonovkv@ict.krasn.ru;*

*Перетокин Сергей Анатольевич — к.т.н., с.н.с. Института вычислительных технологий СО РАН; e-mail:*  
*saperetokin@yandex.ru;*

*Миронов Василий Александрович — аспирант Института вычислительного моделирования СО РАН; e-mail:*  
*vasya-kun@mail.ru;*

*Курако Михаил Александрович — ст. преп. Института космических и информационных технологий*  
*Сибирского федерального университета;*

*e-mail: mkuirako@sfu-kras.ru.*

*Дата поступления — 30 апреля 2019 г.*