**СРАВНЕНИЕ ТРЁХ МЕТОДОВ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ НА ПРИМЕРАХ СОЧИ И КАМЧАТКИ**

**Павленко В.А.**, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.

(Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва)

**Аннотация** Строительство объектов инфраструктуры в сейсмоактивных районах требует детального анализа возможных сейсмических воздействий. Существующие методы анализа сейсмической опасности классифицируются на детерминированные и вероятностные. На сегодняшний день разработаны несколько методов вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО). В работе сравниваются результаты применения трёх методов ВАСО. В основу расчётов положена модель очагов, основанная на сглаживании пространственного распределения наблюдаемых эпицентров землетрясений. На основе этой модели сравниваются метод Корнелла-МакГуайра, Параметрико-Исторический метод и метод, основанный на использовании синтетических каталогов землетрясений (метод Монте-Карло). Для исследования были выбраны два региона России, для этих регионов были построены карты сейсмической опасности с периодами повторяемости 475 и 2475 лет. Результаты показали, что различия в оценках опасности при таком подходе сравнительно невелики. Метод Корнелла-МакГуайра даёт самые высокие оценки опасности, оценки двух других методов несколько ниже. Различия в оценках оказались практически независимыми от периода повторяемости, и составили порядка 6% для района города Сочи, и порядка 10% для Камчатского Полуострова. Полученные результаты показывают, что рассмотренные методы ВАСО будут давать близкие оценки опасности для районов умеренной сейсмической активности, однако различия в оценках, по-видимому, будут тем выше, чем выше сейсмическая активность региона.

**Ключевые слова**: вероятностный анализ сейсмической опасности, метод Корнелла-МакГуайра, синтетический каталог землетрясений, уравнение прогноза движений грунта

Методика вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) возникла в конце 60-х гг. прошлого века [1, 2, 3]. За прошедшие десятилетия, наряду со ставшим классическим, методом Корнелла-МакГуайра, возникли альтернативные самостоятельные методы ВАСО, такие как Параметрико-Исторический метод [4, 5] и метод, основанный на применении синтетических сейсмических каталогов (метод Монте-Карло) [6, 7]. Вопрос о сопоставимости оценок сейсмической опасности, полученных на основе различных вероятностных методов, особенно актуален для России, страны с огромной территорией и существенными региональными особенностями сейсмичности, различиями характеристик излучения и распространения сейсмических волн.

В данной работе выполнено сравнение оценок сейсмической опасности, полученных методом Корнелла-МакГуайра, Параметрико-Историческим методом, и методом Монте-Карло.

В работе использован каталог землетрясений, подготовленный в ИФЗ РАН. Этот каталог покрывает всю территорию Евразии и содержит данные об основных сейсмических событиях произошедших до 2011 г. включительно. Основной каталог был дополнен данными, размещёнными на интернет-ресурсе Геофизической службы США (USGS, http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search). Эти данные были очищены от зависимых событий по алгоритму, предложенному в работе [8]. На следующем этапе сводный каталог был приведён к однородной шкале магнитуд Mw на основе имеющихся эмпирических соотношений [9, 10, 11, 12].

Оценки магнитуды представительной регистрации для региональных каталогов Сочи и Камчатки были получены на основе критерия суммы рангов Уилкоксона, [13]. Далее анализируемые территории покрывались равномерной сеткой точечных очагов землетрясений, в соответствии с методикой, изложенной в [14]. По подготовленным региональным каталогам, для каждого очага оценивались параметры сейсмического режима - плотность потока землетрясений λ, показатель распределения Гутенберга-Рихтера β и магнитуда максимального возможного землетрясения Мmax. [15, 16]

В виду отстутствия региональных уравнений прогноза движений грунта (УПДГ) для выбранных регионов использовались рекомендации проекта Global Earthquake Model (http://www.globalquakemodel.org). Для города Сочи и прилегающих территорий были использованы УПДГ для сейсмоактивных регионов с преобладающей коровой сейсмичностью [17, 18, 19, 20, 21]. Поскольку для Камчатки характерны как субдукционные, так и коровые землетрясения, набор УПДГ для этого региона был дополнен уравнениями для субдукционных землетрясений, предложенными в работах [22, 23, 24]. Кроме того, центральная часть полуострова, где могут ощущаться воздействия как коровых так и субдукционных событий, моделировалась как переходная зона смешанной сейсмичности, где параметры сильных движений оценивались как сумма взвешенных значений оценок, полученных по УПДГ для коровых и субдукционных землетрясений.

Для двух регионов были подготовлены карты сейсмической опасности для вероятностей превышения 10% и 2% в течение 50 лет, что соответствует периодам повторяемости 475 лет и 2475 лет. Далее полученные оценки сравнивались в пунктах вдоль двух профилей, проходящих через зоны высокой, умеренной и низкой сейсмической опасности. Было показано, что результаты метода Корнелла-МакГуайра систематически выше оценок Параметрико-Исторического метода и метода Монте-Карло. Для двух рассмотренных регионов относительная разница оценок, полученных тремя методами, имела систематический характер, оставаясь практически неизменной при изменении периода повторяемости с 475 до 2475 лет. Для региона Сочи, характеризующегося высокой сейсмической активностью, разница между оценками находится в пределах 6%. Для Камчатского Полуострова, где сейсмическая активность очень высока, разница в оценках достигала 10%. Такие результаты показывают, что все три метода ВАСО будут приводить к близким результатам при анализе опасности в регионах умеренной сейсмической активности. Однако разница в результатах, по всей видимости, будет становиться тем более выраженной, чем выше сейсмическая активность региона.

**Литература**

[1] Cornell, C. A. Engineering seismic risk analysis. Bull. Seismol. Soc. Am. 58(5), 1583–1606. 1968.

[2] Milne, W. G. and A. G. Davenport. Distribution of earthquake risk in Canada. Bull. Seismol. Soc. Am. 59(2), 729–754. 1969.

[3] Molchan, G. M., V. I. Keilis-Borok, and G. V. Vilkovich. Seismicity and principal seismic effects. Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 21(3), 323–335. 1970.

[4] Kijko, A. and G. Graham. Parametric-historic procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part I: Estimation of maximum regional magnitude mmax. Pure Appl. Geophys. 152(3), 413–442. 1998.

[5] Kijko, A. and G. Graham. “Parametric-historic” procedure for probabilistic seismic hazard analysis. Part II: Assessment of seismic hazard at specified site. Pure Appl. Geophys. 154(1), 1–22. 1999.

[6] Ebel, J. E. and A. L. Kafka. A Monte Carlo approach to seismic hazard analysis. Bull. Seismol. Soc. Am. 89(4), 854–866. 1999.

[7] Shumilina, L. S., A. A. Gusev, and V. M. Pavlov. An improved technique for determination of seismic hazard. J. Earthq. Predict. Res. 8, 104–110. 2000.

[8] Gardner, J. K. and L. Knopoff. Is the sequence of earthquakes in Southern California, with

aftershocks removed, Poissonian? Bull. Seismol. Soc. Am. 64(5), 1363–1367. 1974.

[9] Gusev, A. A. Intermagnitude relationships and asperity statistics. Pure Appl. Geophys. 136(4), 515–527. 1991.

[10] Das, R., H. R. Wason, and M. L. Sharma. Global regression relations for conversion of surface wave and body wave magnitudes to moment magnitude. Nat. Hazards 59(2), 801–810. 2011.

[11] Gasperini, P., B. Lolli, and G. Vannucci. Body-wave magnitude *m*b is a good proxy of moment magnitude *M*w for small earthquakes (*m*b < 4.5 − 5.0). Seismol. Res. Lett. 84(6), 932–937. 2013.

[12] Tsampas, A. D., E. M. Scordilis, C. B. Papazachos, and G. F. Karakaisis. Global-magnitude scaling relations for intermediate-depth and deep-focus earthquakes. Bull. Seismol. Soc. Am. 106(2), 418–434. 2016.

[13] Amorese, D. Applying a change-point detection method on frequency-magnitude distributions. Bull. Seismol. Soc. Am. 97(5), 1742–1749. 2007.

[14] Frankel, A. Mapping seismic hazard in the central and eastern United States. Seismol. Res. Lett. 66(4), 8–21. 1995.

[15] Kijko, A. and M. A. Sellevoll. Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part I. Utilization of extreme and complete catalogs with different threshold magnitudes. Bull. Seismol. Soc. Am. 79(3), 645–654. 1989.

[16] Kijko, A. and M. A. Sellevoll. Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part II. Incorporation of magnitude heterogeneity. Bull. Seismol. Soc. Am. 82(1), 120–134. 1992.

[17] Akkar, S. and J. J. Bommer. Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 36, 1275–1301. 2007.

[18] Boore, D. M. and G. M. Atkinson. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s. Earthquake Spectra. 24(1), 99–138. 2008.

[19] Campbell, K. W. and Y. Bozorgnia. NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s. Earthquake Spectra 24(1), 139–171. 2008

[20] Cauzzi, C. and E. Faccioli. Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. J. Seismol. 12, 453–475. 2008

[21] Chiou, B. S.-J. and R. R. Youngs. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. Earthquake Spectra 24(1), 173–215. 2008

[22] Youngs, R. R., S.-J. Chiou, W. J. Silva, and J. R. Humphrey. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. Seismol. Res. Lett. 68(1), 58–73. 1997.

[23] Atkinson, G. M. and D. M. Boore (2003). Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions. Bull. Seismol. Soc. Am. 93(4), 1703–1729. 2003.

[24] Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima. A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. Bull. Seismol. Soc. Am. 96(3), 879–897. 2006.