

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

В. А. Павленко

ИФЗ им. О.Ю.Шмидта

Ноябрь 2017

Сравнение трёх методов вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) на примерах Сочи и Камчатки

Предыдущие исследования по данной теме были направлены на изучение влияния различных очаговых моделей на результаты ВАСО:

- ▶ [Molina et al. \(2001\)](#) и [Beauval et al. \(2006\)](#): сравнение традиционной линеаментно-доменной модели и метода ядерного сглаживания [Woo \(1996\)](#)
- ▶ [Hong et al. \(2006\)](#): сравнение линеаментно-доменной модели, метода [Milne and Davenport \(1969\)](#) и метода эпицентральных ячеек
- ▶ [Goda et al. \(2013\)](#): сравнение линеаментно-доменной модели, метода ядерного сглаживания и метода эпицентральных ячеек

В этой работе три метода ВАСО сравниваются на основе одной очаговой модели:

- ▶ Метод Корнелла-МакГуайра
- ▶ Параметрико-Исторический метод ([Kijko and Graham, 1998, 1999](#))
- ▶ Метод основанный на использовании синтетических каталогов землетрясений (метод Монте-Карло)
[Ebel and Kafka \(1999\)](#), [Musson \(2000\)](#), [Shumilina et al. \(2000\)](#)

Каталог землетрясений

1. Каталог ИФЗ РАН (до 2011 г.)
2. Каталог USGS (2012-2016 гг.) (<http://earthquake.usgs.gov>)

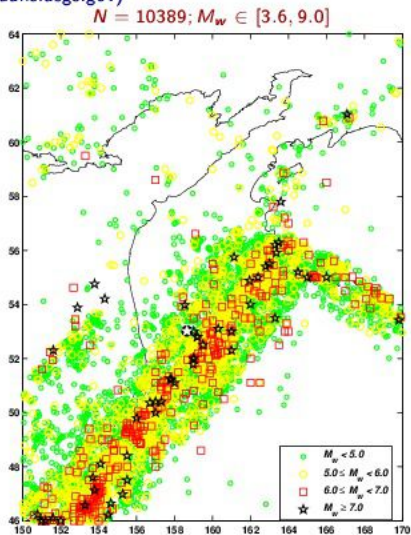
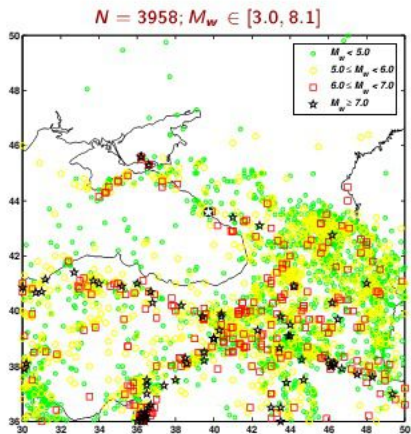


Схема преобразования магнитуд

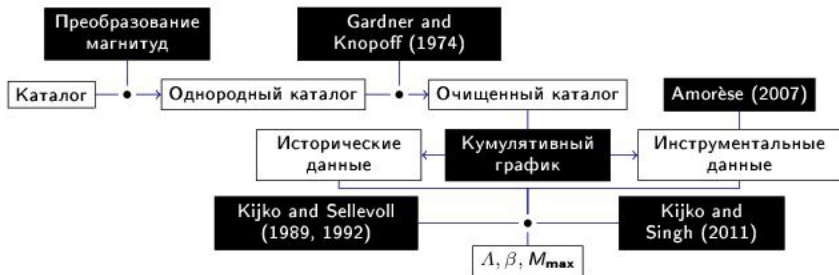
Сочи

| | | | |
|--|--------------------------------------|--|--------------------------|
| | $m_b < 5.0$ | $M_w = \exp(1.19 + 0.16 m_b) - 2.26$ | (Gasperini et al., 2013) |
| | $m_b \geq 5.0, H \geq 70 \text{ km}$ | $M_w = 0.165 m_b^2 - 0.372 m_b + 2.816$ | (Tsampas et al., 2016) |
| | $H < 70 \text{ km}$ | $M_w = 1.64 m_b - 3.18$ | (Das et al., 2011) |
| $H < 70 \text{ km}, M_s \in [3.0, 6.1]$ | | $M_w = 0.67 M_s + 2.12$ | (Das et al., 2011) |
| | $M_s \in [6.2, 8.4]$ | $M_w = 1.06 M_s - 0.38$ | (Das et al., 2011) |
| $H \geq 70 \text{ km}, M_s \in [3.3, 4.3]$ | | $M_w = 0.67 M_s + 2.33$ | (Das et al., 2011) |
| | $M_s \in [4.4, 7.7]$ | $M_w = -0.006 M_s^2 + 0.850 M_s + 1.540$ | (Tsampas et al., 2016) |

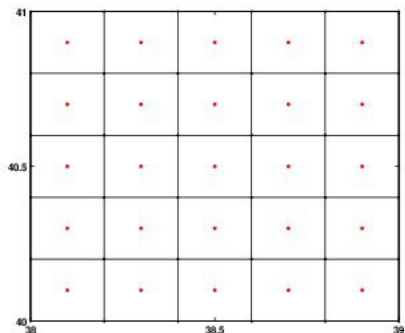
Камчатка

| | | | |
|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| | $m_b < 4.5$ | $M_w = \exp(-0.60 + 0.34 m_b) + 2.15$ | (Gasperini et al., 2013) |
| | $m_b \in [4.5, 6.3]$ | Интерполяция | (Gusev, 1991) |
| $M_s < 3.9, H \geq 70 \text{ km}$ | | $M_w = 0.67 M_s + 2.33$ | (Das et al., 2011) |
| | $H < 70 \text{ km}$ | $M_w = 0.67 M_s + 2.12$ | (Das et al., 2011) |
| | $M_s \geq 3.9$ | Интерполяция | (Gusev, 1991) |

Обработка данных



Очаговая модель



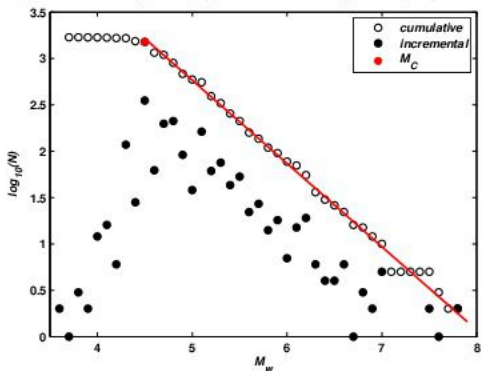
Frankel (1995)
Frankel et al. (1996, 2002)

Параметры сейсмического режима

- ▶ M_c - магнитуда представительной регистрации землетрясений
- ▶ Λ - годовая частота землетрясений с $M \geq M_{\min}$
- ▶ $\beta = b \ln(10)$ - показатель распределения магнитуды
- ▶ M_{\max} - максимальная возможная магнитуда для данного очага

Оценка параметров

- ▶ Оценка магнитуды представительной регистрации M_c (Amorèse, 2007)



- ▶ $\hat{M}_{\max} = M_{\max}^{obs} + \frac{1}{n_0} \left(M_{\max}^{obs} - \frac{1}{n_0 - 1} \sum_{i=2}^{n_0} M_{n-i+1} \right)$ (Kijko and Singh, 2011)
- ▶ Оценка параметров Λ и β (Kijko and Sellevoll, 1989, 1992)

Оценка сейсмической опасности

Предполагается, что последовательность основных событий соответствует стационарному процессу Пуассона:

$$P(y > a_0, T) = 1 - e^{-\lambda(a_0)T} \quad (1)$$

где $\lambda(a_0)$ - средняя частота событий, при которых $y > a_0$.

Для единичного очага величину $\lambda(a_0)$ можно рассчитать по формуле:

$$\lambda(a_0) = \Lambda P(y > a_0) \quad (2)$$

где Λ - годовая частота землетрясений, представляющих инженерный интерес.

Метод Корнелла-МакГуайра:

$$\lambda(a_0) = \sum_i^N \Lambda_i \int_{M_{\min}}^{M_{\max}^i} P(y > a_0 | m, r) f_{M_i}(m) dm \quad (3)$$

Параметрико-Исторический метод:

$$\lambda(a_0) = P(y > a_0) \sum_i^{N_s} \sum_j^{N_m} \Lambda_i(a \geq a_{\min}) \int_{m_j - \Delta m/2}^{m_j + \Delta m/2} f_{M_i}(m) dm \quad (4)$$

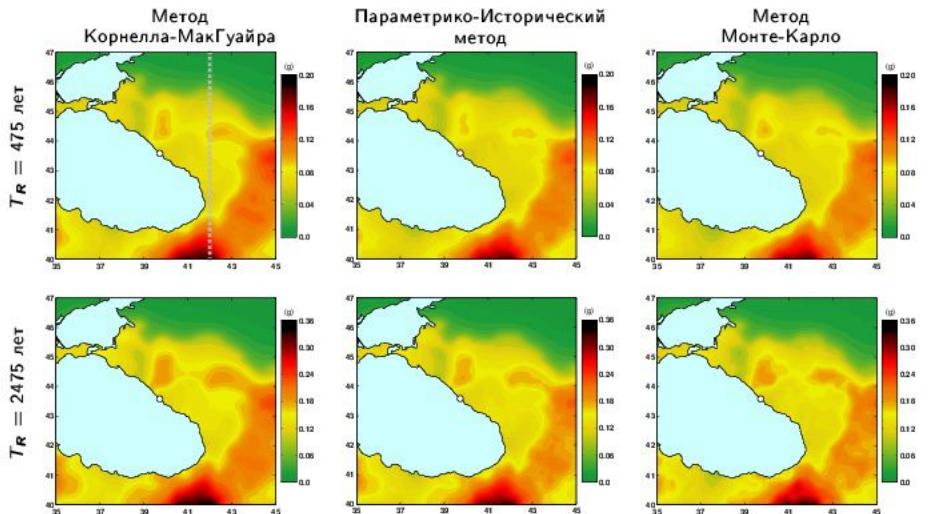
Метод Монте-Карло: оценка $\lambda(a_0)$ напрямую по гистограмме значений y , рассчитанных по синтетическому каталогу землетрясений

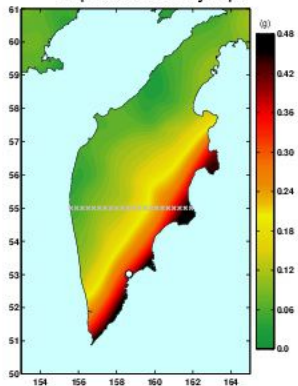
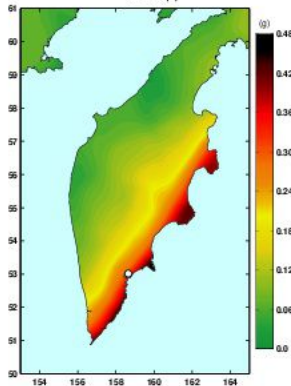
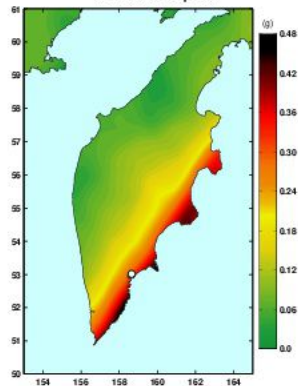
Выбор уравнений прогноза движений грунта

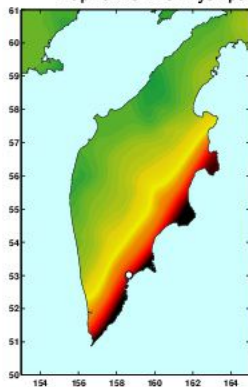
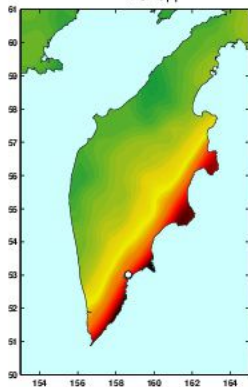
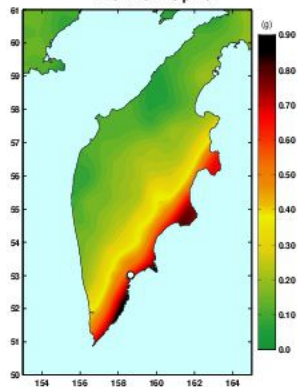
Рекомендации проекта GEM (globalquakemodel.org)

| Литература | Основные Параметры | Сочи | Камчатка | Вес |
|-------------------------------|--------------------|------|----------|------|
| Akkar and Bommer (2007) | M_w, R_{JB} | ✓ | ✓ | 0.2 |
| Boore and Atkinson (2008) | M_w, R_{JB} | ✓ | ✓ | 0.2 |
| Campbell and Bozorgnia (2008) | M_w, R_{rup} | ✓ | ✓ | 0.2 |
| Cauzzi and Faccioli (2008) | M_w, R_{hyp} | ✓ | ✓ | 0.2 |
| Chiou and Youngs (2008) | M_w, R_{rup} | ✓ | ✓ | 0.2 |
| Youngs et al. (1997) | M_w, R_{rup} | - | ✓ | 0.34 |
| Atkinson and Boore (2003) | M_w, R_{rup} | - | ✓ | 0.33 |
| Kanno et al. (2006) | M_w, R_{rup} | - | ✓ | 0.33 |

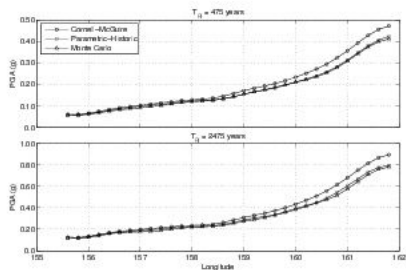
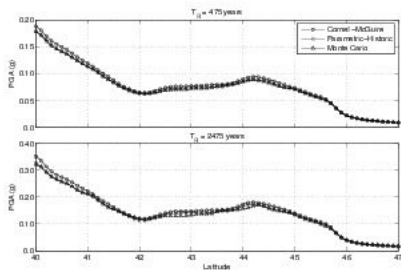
Карты сейсмической опасности для Сочи



Карты сейсмической опасности для Камчатки ($T_R = 475$ лет)Метод
Корнелла-МакГуайраПараметрико-Исторический
методМетод
Монте-Карло

Карты сейсмической опасности для Камчатки ($T_R = 2475$ лет)Метод
Корнелла-МакГуайраПараметрико-Исторический
методМетод
Монте-Карло

Сравнение оценок PGA



| Профиль 1 | | | | | Профиль 2 | | | |
|---------------------|--------------|-----------|---------------------|-----------|--------------|-----------|---------------------|-----------|
| $T_R = 475$ лет | $A_{max}(g)$ | R_{max} | $\langle R \rangle$ | R_{min} | $A_{max}(g)$ | R_{max} | $\langle R \rangle$ | R_{min} |
| Cornell-McGuire | 0.188 | | | | 0.472 | | | |
| Parametric-Historic | 0.180 | 0.955 | 0.952 | 0.935 | 0.423 | 0.896 | 0.919 | 0.940 |
| Monte Carlo | 0.178 | 0.944 | 0.943 | 0.935 | 0.411 | 0.871 | 0.900 | 0.919 |
| $T_R = 2475$ лет | | | | | | | | |
| Cornell-McGuire | 0.352 | | | | 0.894 | | | |
| Parametric-Historic | 0.329 | 0.934 | 0.948 | 0.921 | 0.797 | 0.891 | 0.919 | 0.943 |
| Monte Carlo | 0.320 | 0.910 | 0.937 | 0.920 | 0.780 | 0.872 | 0.902 | 0.924 |

Выводы

- ▶ Метод Корнелла-МакГуайра даёт самые высокие оценки опасности
- ▶ Различия в оценках, полученных разными методами, практически не зависят от периода повторяемости, и находятся в пределах 6% для района города Сочи, в пределах 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.

- Akkar, S. and J. J. Bommer (2007). Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 36, 1275–1301. doi: [10.1002/eqe.679](https://doi.org/10.1002/eqe.679).
- Amorèse, D. (2007). Applying a Change-point Detection Method on Frequency-Magnitude Distributions. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 97(5), 1742–1749. doi: [10.1785/0120060181](https://doi.org/10.1785/0120060181).
- 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. doi: [10.1785/0120020156](https://doi.org/10.1785/0120020156).
- Beauval, C., O. Scotti, and F. Bonilla (2006). The role of seismicity models in probabilistic seismic hazard estimation: comparison of a zoning and a smoothing approach. *Geophys. J. Int.* 165(2), 584–595. doi: [10.1111/j.1365-246X.2006.02945.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02945.x).
- Boore, D. M. and G. M. Atkinson (2008). 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. doi: [10.1193/1.2830434](https://doi.org/10.1193/1.2830434).
- Campbell, K. W. and Y. Bozorgnia (2008). 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. doi: [10.1193/1.2857546](https://doi.org/10.1193/1.2857546).
- Cauzzi, C. and E. Faccioli (2008). Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *J. Seismol.* 12, 453–475. doi: [10.1007/s10950-008-9098-y](https://doi.org/10.1007/s10950-008-9098-y).
- Chiou, B. S.-J. and R. R. Youngs (2008). An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra* 24(1), 173–215. doi: [10.1193/1.2894832](https://doi.org/10.1193/1.2894832).
- Das, R., H. R. Wason, and M. L. Sharma (2011). Global regression relations for conversion of surface wave and body wave magnitudes to moment magnitude. *Nat. Hazards* 59(2), 801–810. doi: [10.1007/s11069-011-9796-6](https://doi.org/10.1007/s11069-011-9796-6).
- Ebel, J. E. and A. L. Kafka (1999). A Monte Carlo Approach to Seismic Hazard Analysis. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 89(4), 854–866.
- Frankel, A. (1995). Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States. *Seismol. Res. Lett.* 66(4), 8–21. doi: [10.1785/gssrl.66.4.8](https://doi.org/10.1785/gssrl.66.4.8).

- Frankel, A., C. Mueller, T. Barnhard, D. Perkins, E. V. Leyendecker, N. Dickman, S. Hanson, and M. Hopper (1996). *National Seismic-Hazard Maps: Documentation*. U.S. Geological Survey. Open-File Report 96-532.
- Frankel, A. D., M. D. Petersen, C. S. Mueller, K. M. Haller, R. L. Wheeler, E. V. Leyendecker, R. L. Wesson, S. C. Harmsen, C. H. Cramer, D. M. Perkins, and K. S. Rukstales (2002). *Documentation for the 2002 Update of the National Seismic Hazard Maps*. U.S. Geological Survey. Open-File Report 02-420.
- Gardner, J. K. and L. Knopoff (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bull. Seismol. Soc. Am.* 64(5), 1363–1367.
- Gasperini, P., B. Lolli, and G. Vannucci (2013). 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. doi: [10.1785/0220130105](https://doi.org/10.1785/0220130105).
- Goda, K., W. Aspinall, and C. A. Taylor (2013). Seismic Hazard Analysis for the U.K.: Sensitivity to Spatial Seismicity Modelling and Ground Motion Prediction Equations. *Seismol. Res. Lett.* 84(1), 112–129. doi: [10.1785/0220120064](https://doi.org/10.1785/0220120064).
- Gusev, A. A. (1991). Intermagnitude relationships and asperity statistics. *Pure Appl. Geophys.* 136(4), 515–527. doi: [10.1007/BF00878585](https://doi.org/10.1007/BF00878585).
- Hong, H. P., K. Goda, and A. G. Davenport (2006). Seismic hazard analysis: a comparative study. *Can. J. Civ. Eng.* 33(9), 1156–1171. doi: [10.1139/l06-062](https://doi.org/10.1139/l06-062).
- Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima (2006). A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 96(3), 879–897. doi: [10.1785/0120050138](https://doi.org/10.1785/0120050138).
- Kijko, A. and G. Graham (1998). Parametric-historic Procedure for Probabilistic Seismic Hazard Analysis. Part I: Estimation of Maximum Regional Magnitude m_{max} . *Pure Appl. Geophys.* 152(3), 413–442. doi: [10.1007/s000240050161](https://doi.org/10.1007/s000240050161).
- Kijko, A. and G. Graham (1999). "Parametric-historic" Procedure for Probabilistic Seismic Hazard Analysis. Part II: Assessment of Seismic Hazard at Specified Site. *Pure Appl. Geophys.* 154(1), 1–22. doi: [10.1007/s000240050218](https://doi.org/10.1007/s000240050218).

- Kijko, A. and M. A. Sellevoll (1989). 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.
- Kijko, A. and M. A. Sellevoll (1992). Estimation of earthquake hazard parameters from incomplete data files. Part II. Incorporation of magnitude heterogeneity. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 82(1), 120–134.
- Kijko, A. and M. Singh (2011). Statistical Tools for Maximum Possible Earthquake Magnitude Estimation. *Acta Geophys. Pol.* 59(4), 674–700. doi: [10.2478/s11600-011-0012-6](https://doi.org/10.2478/s11600-011-0012-6).
- Milne, W. G. and A. G. Davenport (1969). Distribution of earthquake risk in Canada. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 59(2), 729–754.
- Molina, S., C. D. Lindholm, and H. Bungum (2001). Probabilistic seismic hazard analysis: zoning free versus zoning methodology. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 42(1-2), 19–39.
- Musson, R. M. W. (2000). The use of Monte Carlo simulations for seismic hazard assessment in the U.K. *Ann. Geofisc.* 43(1), 1–9. doi: [10.4401/ag-3617](https://doi.org/10.4401/ag-3617).
- Shumilina, L. S., A. A. Gusev, and V. M. Pavlov (2000). An improved technique for determination of seismic hazard. *J. Earthq. Predict. Res.* 8, 104–110.
- Tsampas, A. D., E. M. Scordilis, C. B. Papazachos, and G. F. Karakaisis (2016). Global-Magnitude Scaling Relations for Intermediate-Depth and Deep-Focus Earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 106(2), 418–434. doi: [10.1785/0120150201](https://doi.org/10.1785/0120150201).
- Woo, G. (1996). Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Source Modeling. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 86(2), 353–362.
- Youngs, R. R., S.-J. Chiou, W. J. Silva, and J. R. Humphrey (1997). Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismol. Res. Lett.* 68(1), 58–73. doi: [10.1785/gssrl.68.1.58](https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.58).