Selection of Ground Motion Prediction Equations-GMPEs for the territory of Bulgaria

D. Solakov[1], S. Simeonova[1], P. Raykova[1]

[1]National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography-BAS, Acad. G .Bonchev str., bl.3, BG-1113 Sofia, Bulgaria
e-mails: dimos@geophys.bas.bg, stelas@geophys.bas.bg, plamena.raikova@gmail.com

Key words: Ground motion attenuation relationships, Bulgaria

Abstract
Ground Motion Prediction Equations-GMPEs define the values of a ground motion parameter as a function of earthquake size (magnitude M) and the distance in terms of both expected values and dispersion of the expected values. The ground motion attenuation relationships and their uncertainties are of substantial importance in hazard analysis. GMPEs are developed usually from statistical analysis of strong motion data or from peak ground motion parameters inferred from reported shaking intensity. Only a few strong motion records are presently available for the territory of Bulgaria where most of the earthquake history is pre-instrumental (only a few moderate earthquakes of magnitude less than 6.0, have occurred in modern times). Two approaches for choosing PGA attenuation relations that correspond to the regional data are possible. The first approach is to estimate PGA by using macroseismic intensity attenuation relations based on local data. An alternative is to compare well-based empirical PGA attenuation relationships for other regions to the available data. These relationships should incorporate known local seismotectonic characteristics. The first method has the disadvantage of unacceptable large uncertainties and known differences cannot be incorporated directly. Therefore, in the present study it has been chosen for the second method. Six attenuation relationships were selected on the base of general criteria. The LLH approach were used for quantifying the goodness of fit of these relations to a dataset of 101 ground motion data from Bulgaria and surrounding.

Избор на релации за затихване на земни движения за територията на България

Д. Солаков[1], С. Симеонова[1], Пл. Райкова[1]

[1] Национален Институт по Геофизика, Геодезия и География – БАН, ул. "Акад. Г. Бончев", бл. 3, гр. София, 1113, България,
e-mails: dimos@geophys.bas.bg, stelas@geophys.bas.bg, plamena.raikova@gmail.com

Ключови думи: прогностични релации за земните движения, България

Резюме
Прогностичните релациите за земните движения, или релации (закони) за затихване, са средство за прогнозиране нивото на земните движения в зависимост от магнитуда, разстоянието земетръсен източник–площадка, локалните почвени условия, механизъм на реализация на земетресенията и др. Законите за затихване на земните движения са един от най-важните елементи при оценката на сеизмичната опасност. Законите за затихване се разработват от статистически анализ на данни от силни земни движения или от параметри на земни движения, изведени от наблюдавана интензивност. За територията на България съществува малък брой записи на силни земни движения, като те са от слаби до умерени земетресения (с магнитуд по-малко от 6,0). Съществуват два подхода за избор на закони на затихване, които най-добре съответстват на регионалните данни. Първият подход за оценка на максималното земно ускорение чрез използването на регионални макросеизмични данни е свързан с големи неопределености и грешки. Алтернатива е да се използват емпирични закони за затихване базирани на голям брой световни данни, като те се верифицират със записи за разглежданата територия. Тези закони трябва да са в съответствие с местните сеизмотектонни характеристики. В настоящото изследване е избран вторият подход. Избрани са 6 закона за затихване на базата на зададени критерии. Допълнително, за количествена оценка близостта на прогнозираните от релациите силни движения и съществуващите за територията на България и околностите са използвани регионални данни (101 двукомпонентни акселерограми). Използван е метод, който оценява близостта на регионалните данни до даден модел.

Въведение

Затихването на сеизмичните вълни е процесът на намаляване на амплитудите на сеизмичните вълни при разпространението им от земетръсното огнище до дадена точка, отдалечена на определено разстояние от огнището. Обикновено затихването се представя чрез съответни релации (закони, модели) на затихването. В последните години често се използва понятието „прогностични релации за земните движения" (Ground Motion Prediction Equations - GMPEs). Прогностичните релациите за земните движения, или релации (закони) за затихване са средство за прогнозиране на нивото на земните движения заедно с техните неопределености в зависимост от магнитуда, разстоянието земетръсен източник-площадка, локалните почвени условия, механизъм на реализация на земетресенията и др.

Изходът от тези релации е вероятностно разпределение на разглеждания параметър на земното движение (напр. максимални и спектрални ускорения, скорости, макросеизмична интензивност). Класическият параметър е максималното земно ускорение. Съвременните закони са разработени за редица допълнителни параметри, най-важните от които са максимална земна скорост и спектрални ординати на спектъра на реагиране. Типичната релация е от вида:

$$Ln(Y) = f(X,\Theta) + \sigma \quad (1)$$

където = f(X,Θ) е функция (която може да бъде проста или доста комплицирана), Y е параметърът, който се „предсказва“, X е вектор от променливи-променливи характеризиращи сеизмичния източник (напр. магнитуд, тип разломяване и др), променливи характеризиращи трасето на разпространение на въздействието (напр. разстояние от разглежданата площадка до сеизмичния източник), в много случаи променливи характеризиращи инжинерно-геоложките условия под площадката (напр. средната скорост разпространение на S вълната в горните 30 метра), Θ е вектор на избрани параметри, оценени въз основа на наличната базата данни. Параметърът σ отразява отклонението на наблюденията от прогнозираната от релацията стойност. Той е оценка на неопределеността, присъща на процеса и е неотменна част на релацията.

Параметърът Y-сеизмичното въздействие, в общия случай е вектор с две хоризонтални и една вертикална компонента. Вертикалната компонента е съществено различна от хоризонталните и по тази причина за нея се разработват отделни релации. Тъй като Y е скалар, а хоризонталното земно движение е вектор, е необходимо избор на подход за превръщането на вектора в скалар. Най-често използваните подходи са: а) геометрично средно – където Y_1 и Y_2 са компонентите на вектора; и б) максималната от двете компоненти – $Y = \max(Y_1,Y_2)$.

Изборът на подход трябва да бъде съобразен с изхода от използваните релации за затихване. Най-често съвременните релации са разработени за геометрично средно и по тази причина в настоящото изследване е приет този подход.

Законите за затихване на земните движения са един от най-важните елементи при оценката на сеизмичната опасност. В повечето региони, както и в България няма достатъчно данни, за да се съставят тези модели и поради тази причина се използват модели разработени по данни от региони със сходни сизмотектонски характеристики и затихване на сеизмичните вълни.

Релациите за затихване на земните движения, използвани за оценка на сеизмичния хазарт, трябва да отговарят на определени критерии: 1) релациите трябва да са актуални и установени за времето на изследването; 2) да са описани данните, по които законът е получен - магнитуден интервал; интервал по разстояния и др.; 3) използваните закони трябва да са приведени към една и съща компонента; 4) да са в съответствие с типа на земетресенията и регионалните особености на затихване; 5) да отразяват, във възможно най-голяма степен, тектонските особености на разглеждания регион; 6) да отчитат най-малко тип почва и тип механизъм; 7) магнитудът, разстоянието и другите параметри трябва да са в съответствие с тези параметри, използвани за характеризиране на сеизмичните източници; 8) да е посочена оценката на стандартната девиация, изчислена за съответната релация.

В момента съществуват над 400 релации, свързани със затихването на земните движения (Douglas, 2018). При избора на работни GMPEs и тяхното прилагане е необходимо съблюдаване на по-горе предсравените критерии (или по-голяма част от тях).

В настоящото изследване са избрани закони за затихване на земните движенина от плитки корови земетресения в сеизмично активни райони. Законите са съобразени с прдставнит критерии и допълнително са наложени следните ограничения:

- Закони, в които затихването на земните движения да е изразено чрез средно-квадратичното от двете хоризонтални компоненти;
- Закони, получени на основата на данни от цял свят или основно по данни от Европа;
- Закони, използващи магнитуд по сеизмичен момент;
- Закони, които позволяват прогнозирането на земните движения за почвени условия „скала“, тип А съгласно класификацията на Еврокод 8;
- Закони, получени на базата на данни в широк магнитуден интервал (минимум от 4.5 до 7.5) и за епицентрални разстояния поне до 200 километра;
- Закони отчитащи насищане с магнитуда, т.е. с нарастване на магнитуда намалява влиянието му върху затихването и магнитудно зависима функция, отчитаща влиянието на разстоянието (Stewart et al, 2015, Bommer et al 2010).

Метод

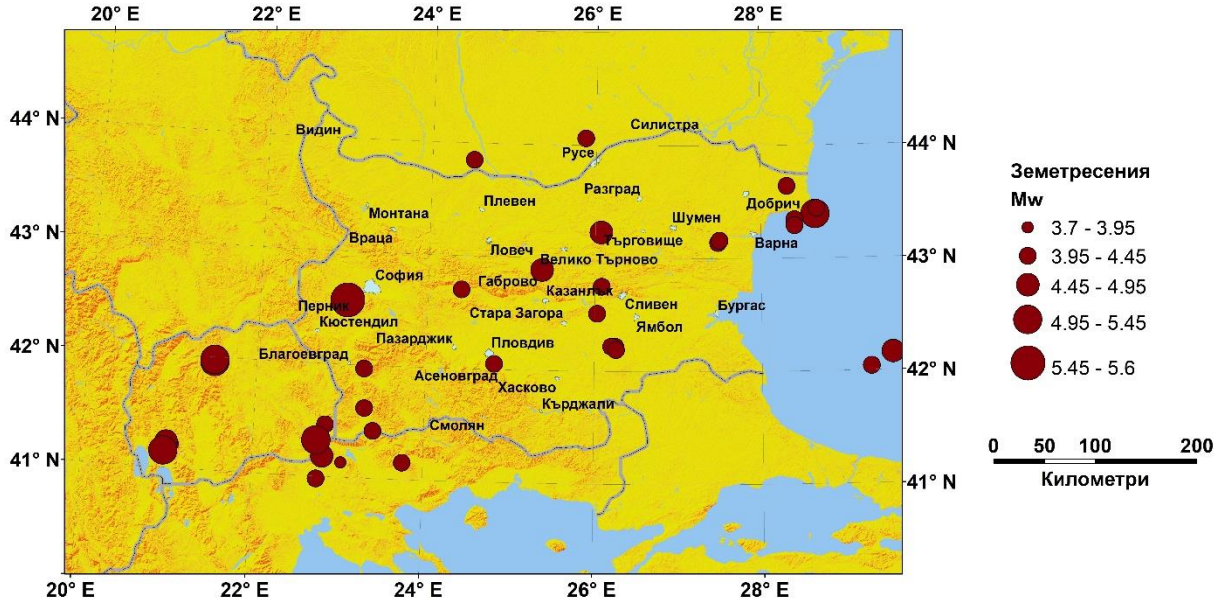
В настоящото изследване са избрани закони за затихване от плитки корови земетресения, които са съобразени с представените по-горе критерии и ограничения.
Избрани са следните 6 GMPEs, публикувани в Douglas (2018): Abrahamson et al. (2013, 2014), Boore et al. (2013, 2014), Campbell and Bozorgnia (2013, 2014), Chiou and Youngs (2013, 2014), базирани на данни от цял свят, и моделите Akkar et al. (2014a,b), Cauzzi et al. (2015b), базирани на голям брой данни, както на европейски, така и на данни от близкия източник.
Допълнително, за количествена оценка близостта на прогнозираните от релации силни движения и съществуващите за територията на страната данни, е използван методът, предложен в Scherbaum et al. (2009), който представлява критерий за оценка на близостта на данните до даден модел. Методът се базира на вероятността едно наблюдение да бъде реализирано, при хипотезата, че моделът е верен и се представя чрез логаритмично правдоподобие (стойност на правдоподобие):

$$LLH = -\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\log_2(g(x_i)), \qquad (2)$$

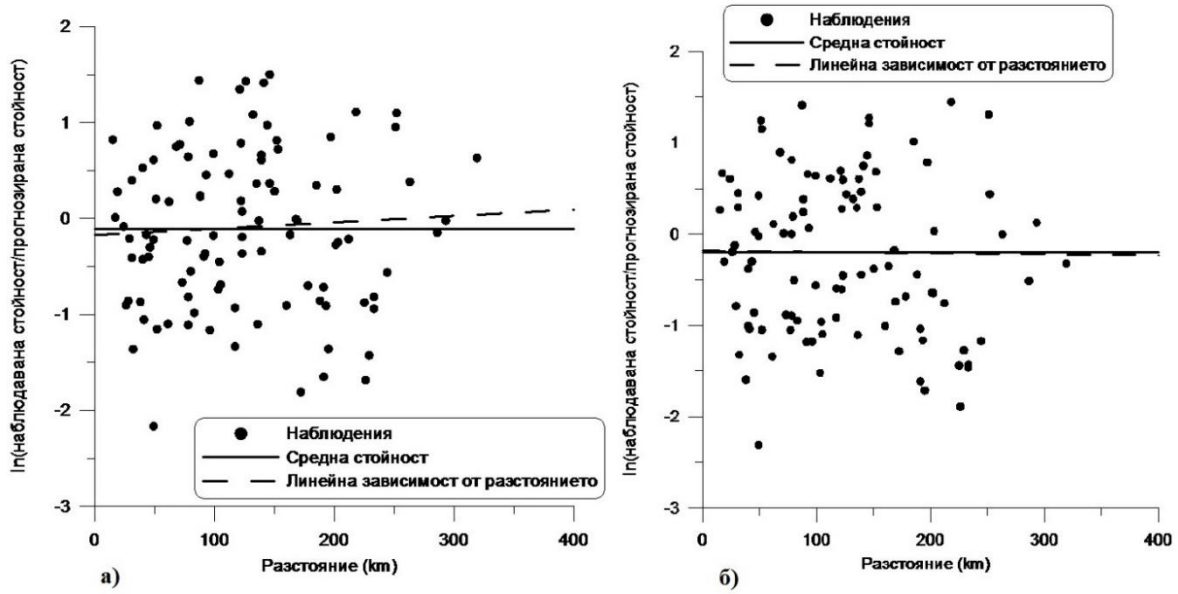
където N е броят наблюдения x_i ($i=1,2...N$), g е вероятностната плътностна функция, прогнозирана от модела (в разглежданите случаи нормално разпределение със средно прогнозираното от модела и съответното стандартно отклонение). Малки стойности на LLH са индикация за близост на данните до модела.

Резултати

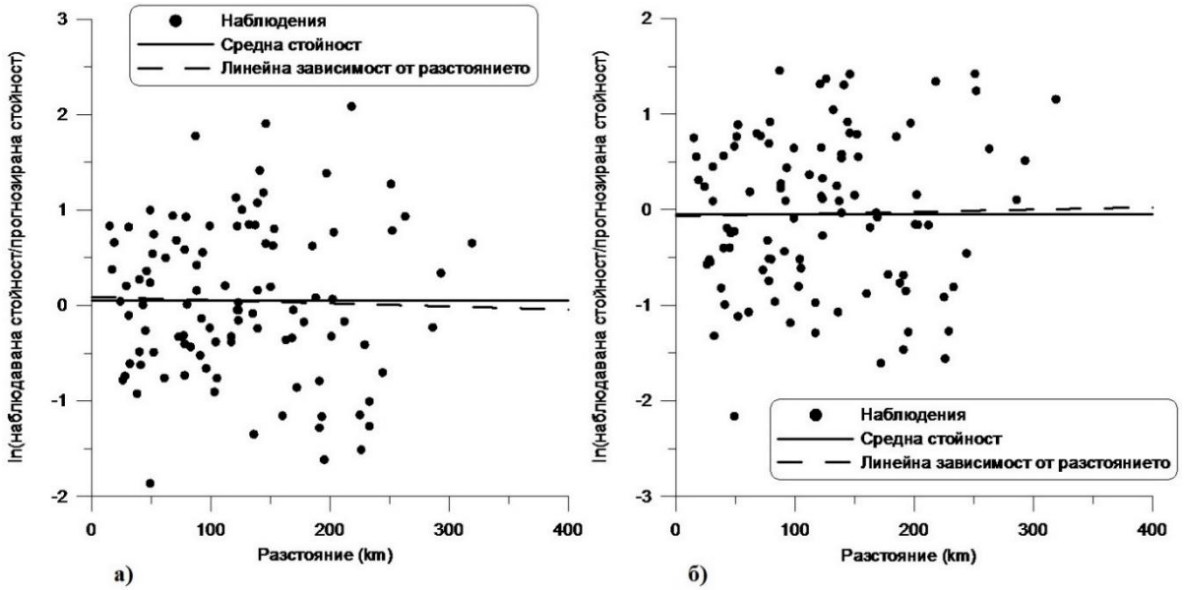
В изследването са обработени 101 двукомпонентни акселерограми от 33 земетресения, реализирани през периода 2008-2018 г., на територията на страната и близките околности (представени на Фиг. 1). На базата на тези записи са изчислени медианите стойности прогнозирани от всеки закон и логаритъмът от отношението наблюдавана стойност върху прогнозирана стойност. На фигури 2-4 е дадено разпределението на ln(наблюдавана стойност/теоретична стойност) в зависимост от разстоянието за шестте изследвани релации. На фигурите е представената линейната зависимост на ln(наблюдавана стойност/теоретична стойност) от разстоянието.



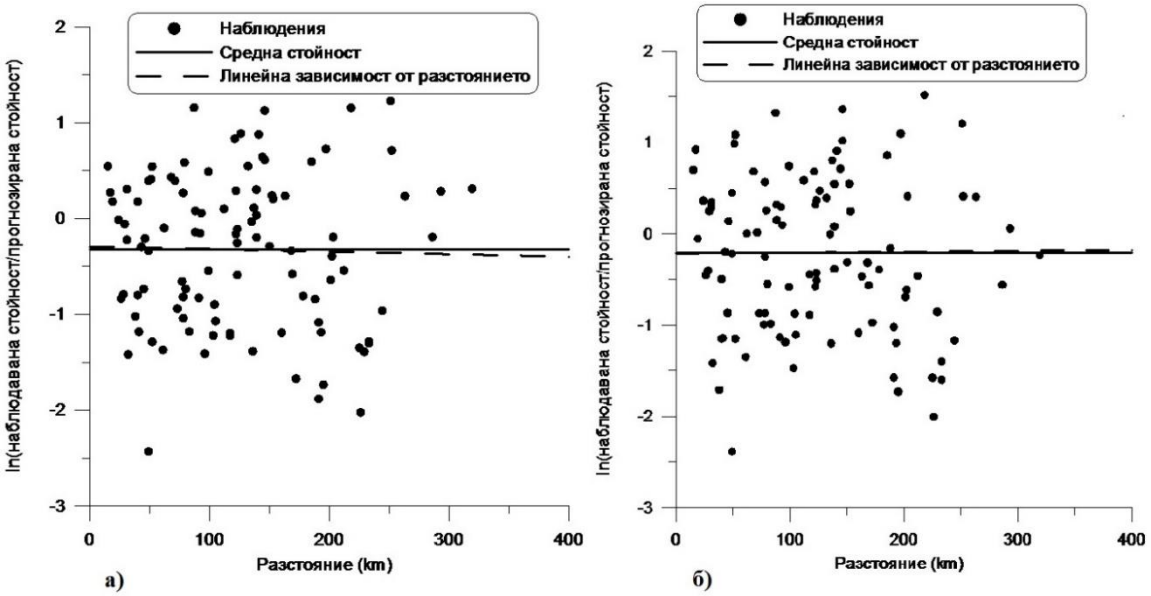
Фиг. 1. Използвани земетресения.



Фиг. 2. Разпределение на логаритъма от отношението наблюдавана стойност върху прогнозирана стойност: а) релация Campbell and Bozorgnia, 2014; б) релация Abrahamson et al., 2014.



Фиг. 3. Разпределение на логаритъма от отношението наблюдавана стойност върху прогнозирана стойност: а) релация Boore et al., 2014; б) релация Chiou and Youngs, 2014.



Фиг. 4. Разпределение на логаритъма от отношението наблюдавана стойност върху прогнозирана стойност: а) релация Akkar et al, 2014a, b); б) релация Cauzzi et al., 2015 a,b.

На базата на 84 двукомпонентни акселерограми (за разстояния до 200 km) от земетресения, станали на територията на страната и близките околности са оценени и LLH стойностите за шестте закона. Резултатите са представени в Табл. 1.

Модел	LLH
Campbell and Bozorgnia (2013, 2014)	1.756
Abrahamson et al. (2013, 2014)	1.823
Boore et al. (2013, 2014)	1.707
Chiou and Youngs (2013,2014)	1.753
Akkar et al. (2014a,b)	1.959
Cauzzi et al. (2015b)	1.886

Табл. 1. LLH стойности за различните закони.

От таблицата се вижда, че избраните шест GMPEs показват сравнително близки LLH стойности. От сравнението с наличните данни за силни движения се установява, че моделите дават стабилни резултати като средно и стандартно отклонение и не се наблюдава значима зависимост от разстоянието.

Заключение

Избраните шест закона за затихване на земните движения дават надеждна оценка на очакваните земни движения за територията на България и могат да се прилагат както при детерминистичния, така и при вероятностния анализ на сеизмичния хазарт.
Оценката на сеизмичния хазарт е основа за оценка на сеизмичния риск, прилага се в разработване на регионални карти на сеизмичната опасност за целите на строителни норми, градоустройствени и аварийни планове, превенция и прогнозиране на обстановката след силни земетрсния, социални и финансови оценки на загубите от земетръсни въздействия и др.
Не трябва да се забравя, че коректна оценка на сизмичния хазарт в комбинация със съвремнните методи на сеизмичното инженрство могат да намалят, до голяма степен, щетите и жертвите от бъдещи земетресения.

Благодарности:

По време на работата Пламена Райкова е стипендиант на Световната федерация на учените.

ЛИТЕРАТУРА

Abrahamson, N., W. Silva, R. Kamai, 2013. Update of the AS08 ground-motion prediction equations based on the NGA-West2 data set. Technical Report 2013/04, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.

Abrahamson, N., W. Silva, R. Kamai, 2014. Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. Earthquake Spectra, 30(3):1025_1055, doi: 10.1193/070913EQS198M

Akkar S., M. A. Sandikkaya, and J. J. Bommer, 2014a. Empirical ground-motion models for point-and extendedsource crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. Bulletin of Earthquake Engineering, 12 (1):359_387, 2014a. doi: 10.1007/s10518-013-9461-4.

Akkar S., M. A. Sandikkaya, and J. J. Bommer, 2014b. Erratum to: Empirical ground-motion models for pointand extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. Bulletin of Earthquake Engineering, 12(1):389_390, 2014b. doi: 10.1007/s10518-013-9508-6.

Bommer J., J. Douglas, F. Scherbaum, F. Cotton S., H. Bungum, D. Fah, 2010. On the Selection of Ground-Motion Prediction Equations for Seismic Hazard Analysis, Seismological Research Letters, 81, 783-793, ISSN: 0895-0695

Boore D. M., J. P. Stewart, E. Seyhan, and G. M. Atkinson, 2013. NGA-West2 equations for predicting response spectral accelerations for shallow crustal earthquakes. Technical Report 2013/05, Paci_c Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2013.

Boore D. M., J. P. Stewart, E. Seyhan, and G. M. Atkinson, 2014. NGA-West 2 equations for predicting PGA, PGV, and 5%-damped PSA for shallow crustal earthquakes. Earthquake Spectra, 30(3):1057_1085, Aug 2014. doi: 10.1193/070113EQS184M.

Campbell K. W. and Y. Bozorgnia, 2013. NGA-West2 Campbell-Bozorgnia ground motion model for the horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped elastic pseudo-acceleration response spectra for periods ranging from 0:01 to 10 sec. Technical Report 2013/06, Paci_c Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 2013.

Campbell K. W. and Y. Bozorgnia, 2014. NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA, PGV, and 5%-damped linear acceleration response spectra. Earthquake Spectra, 30(3):1087_1115, Aug 2014. doi: 10.1193/062913EQS175M.

Cauzzi C., E. Faccioli, M. Vanini, and A. Bianchini, 2015b. Updated predictive equations for broadband (0:01_10 s) horizontal response spectra and peak ground motions, based on a global dataset of digital acceleration records. Bulletin of Earthquake Engineering, 13(6):1587_1612, Jun 2015b. doi: 10.1007/s10518-014-9685-y.

Chiou B. S. J. and R. R. Youngs, 2013. Update of the Chiou and Youngs NGA ground motion model for average horizontal component of peak ground motion and response spectra. Technical Report 2013/07, Pacic Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.

Chiou B. S.J. and R. R. Youngs, 2014. Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. Earthquake Spectra, 30(3):1117_1153, Aug 2014. doi:10.1193/072813EQS219M.

Douglas, J., 2018. Ground motion prediction equations 1964-2018. http://www.gmpe.org.uk/gmpereport2014.pdf, pp 624.

Scherbaum F., E. Delavaud and C. Riggelsen, 2009. Model Selection in Seismic Hazard Analysis: An Information-Theoretic Perspective, Bull. Seism. Soc. Am, Vol. 99, No. 6, pp. 3234–3247.

Stewart, J., J. Douglas, M. Javanbarg, Y. Bozorgnia, N. Abrahamson, D. Boore, K. Campbell, E. Delavaud, M. Erdik, P. Stafford, 2015. Selection of Ground Motion Prediction Equations for the Global Earthquake Model. Earthquake Spectra, 31, 1, pp. 19-45.