Bulgarian Geophysical Journal, 2020, Vol. 43
National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences

ОЦЕНКА ОГНИЩНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ ОТ РОЕВ ТИП

Пл. Райкова

Национален институт по геофизика, геодезия и география – БАН, София 1113, ул. Акад. Г. Бончев, бл. 3; plamena.raikova@gmail

DOI: 10.34975/bgj-2020.43.10

Резюме: Спектралният анализ на сеизмичните вълни е един от основните източници на информация за земетресенията. Представени са спектрите на P- и S-вълни за земетресения от роев тип: поредицата от месец април 2009 година в района на град Кърджали, и поредица реализирана през 2014 г., в близост до град Пловдив. Проведеното изследване се основава на цифрови данни от Българската сеизмологична мрежа - НОТССИ. Генерирани са спектри по преместване за P- и S- вълни, с цел да се определят някои от параметрите на сеизмичния източник, като сеизмичен момент, свалено напрежение и радиус на източника. Оценката на огнищните параметри е базирана на модела на Brune. Определени са параметрите на 10 земетресения: 5 от събитията от поредицата в района на град Кърджали и 5 от събитията от поредицата в района на град Пловдив, с магнитуд в интервала 2.7 ÷ 4.1. Получените стойности за свалено напрежение са в рамките на очаквания диапазон. При поредицата от 2009 г. се наблюдават по ниски стойнсти на свалено напрежение, в сравнение с поредицата от 2014 г.

Ключови думи: роев тип сеизмичност, свалено напрежение, радиус на източника, сеизмичен момент

Въведение

Земетресението е уникално природно явление, определящо се от голям брой фактори, които не могат да бъдат непосредствено наблюдавани и трудно се контролират. За сеизмично застрашените области (каквато е и територията на България) земетресенията са неделима част от околната среда. Няма друго природно явление с така силно изявен дуализъм, каквото е земетресението – изключително полезно

за изучаване на планетата Земя (сеизмичните вълни, породени от земетресенията са източник на информация за вътрешния строеж на Земята) и катастрофално от социално - икономическа гледна точка.

Ефектите от земетресенията са функция на редица фактори, вариращи в широки граници, които могат да бъдат адекватно моделирани въз основа на физически съображения и налични сеизмологични наблюдния.

Сеизмологичните данни добре се описват с Поасонов процес, ако от тях се изключат поредиците от земетресения - сеизмичните клъстери. Поасоновото разпределение, като модел на сеизмичния процес, не отчита възможността земетресенията да се генерират в групи. Такива групи (или клъстери) от земетресения са фор-афтършоковите поредици и роевата сеизмичност (сеизмични роеве).

Фор-афтършоковите и роевете поредици представляват основна част от процеса на генериране на земетресения, поради което те са често третиран проблем в сеизмологичните изследвания. В много изследвания е доказано, че ако не се отчита наличието на поредиците, оказващи съществено влияние върху разпределението на земетресенията в пространство и времето, може да се достигне до некорекни резултати и изводи за сеизмичния процес.

Форшоковите събития са група земетресения, предхождащи по-силното главно събитие. Ако този клъстер може да бъде разпознат преди да се реализира главното земетресение, то тази група би се превърнала в полезен инструмент за прогнозиране на силни земетресения.

Афтършоковите поредици са тези групи от земетресения, които се реализират непосредствено след главното събитие и постепенно затихват във времето. Една от феноменалните характеристики на афтършоковия процес е намаляване на броя афтършоците във времето по обратен степенен закон, докато повечето от физичните процеси затихват експоненциално във времето.

За роев тип сеизмичност се счита множество от земетресения относително близки във времето и пространството с приблизително еднакъв магнитуд. За първи път в литературата понятието „сеизмичен рой“ е използвано от Credner (1876). Възникването на този тип сеизмичност се обяснява със силно разнороден характер на област, и/или с отслабени области в земната кора, неспособни да издържат на приложеното напрежение (Mogi, 1963).

Изучаването на пространствено-времево и енергийно разпределение на земетресенията е основен аспект от съвременните сеизмологични изследвания.

Друг аспект, свързан със сеизмологичните изследвания, е спектралният анализ на сеизмичните вълни. Спектралият анализ на сеизмичните вълни е основен източник на информация за земетръсното огнище и средата на разпространение. Спектърът на сеизмичните вълни може да се използва за оценка на параметрите на сеизмичния източник. За изследване спектралните характеристики на земетресенията най-често се използва моделът на Brune (Brune, 1970).

В настоящото изследване са генерирани спектри на P и S-вълни и са оценени огнищните параметри на събитията от два сеизмични роя. Единият, продължил по-малко от месец, е наблюдаван през април 2009 година в района на град Кърджа-

ли, който е част от сеизмогенна зона Източни Родопи. Втората поредица е реализирана през месеците януари-февруари 2014 г., в близост до град Пловдив, който е част от сеизмогенна зона Марица.

Методика и входни данни

В настоящото изследване са оценени чрез спектрален анализ основни параметри на сеизмичния източник такива като: сеизмичен момент (M_0), свалено напрежение ($\Delta\sigma$) и радиус на източника (r)

Сеизмичният момент M_0 (измерващ се в N*m) е величина, която обединява площта на разкъсване и остатъчното преместване по разлома с якостните свойства на средата, и се определя: чрез релацията:

$$M_0 = \mu SD, \tag{1}$$

където μ (в Pa) е модула на срязване (твърдостта), S е площ на разломната повърхнина, по която е станало преместването (измерваща се в m^2) и D е относителното преместване по разломната повърхнина (в m). Сеизмичният момент може да се определи чрез инверсия на тензора на момента или чрез спектрален анализ на сеизмичните вълни. Този параметър е надеждна оценка на размера на земетресението и се използва за определяне на магнитуд по сеизмичен момент M_W.

Сваленото напрежение (stress drop) е разликата между първоначалната и крайната стойност на напрежението в средата. Сваленото напрежение е свързано с енергията освободена при реализацията на земетресение, основно със сеизмичния момент, а от там с магнитуда на земетресението (Frankel, 2009). Вариации в стойността на сваленото напрежение се наблюдават, поради различните физични свойства на средата, и дълбочината на сеизмичния източник. Наблюдаваните стойности на този параметър, при по силните зметресения, са между 10 – 100 бара или от 1-10 MPa (Kanamori and Anderson, 1975; Kanamori and Brodsky, 2004). За земетресения в близост до границите на плочите (междуплочеви събития) средните стойностти на този параметър са по-ниски, отколкото при тези в континенталните части - вътрешноплочеви събития, каквито са земтресенията, генерирани на територията на България (e.g., Kanamori and Anderson, 1975; Kanamori and Allen, 1986). Средната стойност на сваленото напрежение е около 3MPa за междуплочеви земетресения и около 6MPa за вътрешноплочеви земетресения (Allmann and Shearer, 2007).

Сваленото напрежение се определя по формулата (Eshelby, 1957):

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16}\frac{M_0}{r^3}, \tag{2}$$

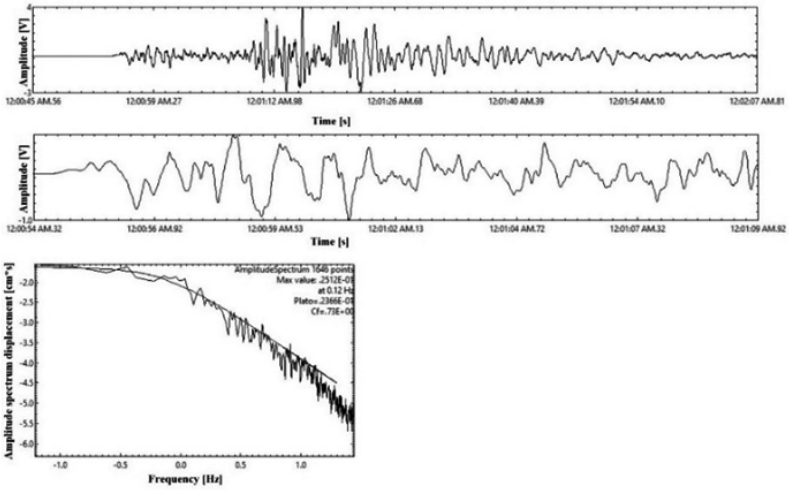
където $\Delta\sigma$ е средният stress drop (в bars), M_0 е сеизмичния момент и r е радиусът на разломната повърхност (в m или km).

Радиусът r е свързан с ъгловата честота f_c (основен параметър, свързан със спектрите, генерирани от сеизмичен или екплозивен източник (Hanks and Wyss, 1972)), оценена от спектъра на съответната вълна. Този параметър се представя с формулата:

$$r = \frac{k\beta}{f_c}, \tag{3}$$

където r е радиусът на разлома (в m или km), f_c е наблюдаваната ъглова честота (в Hz), а k е константа, която зависи от конкретния теоретичен модел.

За да се определят параметрите на земетресението, е необходимо да се трансформира сеизмичния сигнал. За преобразуването на амплитудно-времеви сигнал в амплитудно-честотен се използва бързо преобразуване на Фурие (FFT). Фиг. 1 илюстрира преобразуването на амплитудно-времеви сигнал в амплитудно-честотен с цел генериране на спектър по преместване. На фигурата е представен: а) запис на земетресение на вертикалната компонента на станция Витоша (VTS) за определен времеви интервал; б) конкретен времеви интервал, за който ще се генерира спектър по преместване; в) спектър на преместване на P-вълна.



Фиг. 1. Пример за спектър по преместване на P -вълна.

Амплитудата на сеизмичния импулс в идеално еластична среда се контролира от отражението и преноса на енергия през различни граници. Известно е, че Земята не е идеално еластична и вълните затихват с времето и разстоянието. Амплитудите на сеизмичните вълни търпят промени и затова, че те преминават през различните слоеве на земята. Когато фронтът на вълната се движи от източника навън, първоначалната енергия, освободена при земетресението се разпрос-

тира на по-голяма площ и по този начин интензивността на вълната намалява с увеличаване на разстоянието. Процеси, свързани с преразпределението и загуба на енергия при разпространението на вълните са: геометричният спрединг, затихването - качествен фактор Q, насоченост на излъчването, както и затихване в близост до повърхността - κ.

При разглеждането на спектрите по преместване на сеизмичните вълни са направени корекции за някои от тези параметри. Като за качествения фактор е заложена стойност Q = 400 (Malagnini et al., 2000), а за затихването в близост до повърхността е κ = 0.035 (Margaris and Boore, 1998).

В настоящото изследване са генерирани спектрите по P- и S- вълни. За всяко събитие са използвани входни данни от минимум пет станции, а за всяка станция са направени спектри по Z, N, E компоненти. Сигналите, които са разгледани в изследването са калибрирани според съответния прибор във всяка станция. Стойностите на параметрите, характеризиращи огнището са получени чрез математичния апарат, представен по долу.

От получените спектри се определят ъгловата честота (f_0) и нискочестотното спектрално ниво (Ω_0).

Сеизмичният момент по спектъра на P-вълната (M_{0p}) се определя по следната формула:

$$M_{0p} = \frac{\rho.4\pi.\Omega_p.R.v_p^{\,2}}{R_{\theta\varphi}(P)}, \tag{4}$$

където M_{0p} е сеизмичният момент за P-вълната (в N*m), ρ – плътността на средата (в kg/m^3), Ω_p – ниво на платото (в nm*s), определено чрез спектъра на вълната, v_p – скоростта на вълната (km/s), R – хипоцентралното разстояние, $R_{\theta\varphi(P)}$ – насоченост на излъчването (radiation pattern), която при определянето на сеизмичния момент за P-вълни е 0.52.

В много изследвания за насочеността на излъчването при P- или S- вълни се използват стандартни стойности, които са съобразени с азимутите и диапазона на ъглите на излизане. Стойностите на този параметър обикновено са 0.52 за P-вълни и 0.63 за S-вълните (Aki and Richards, 2002).

Сеизмичният момент по S-вълна (M_{0S}) се дава със следното уравнение:

$$M_{0s} = \frac{\rho.4\pi.\Omega_s.R.v_s^{\,2}}{R_{\theta\varphi}(S)}, \tag{5}$$

където M_{0s} е сеизмичният момент за S-вълната, ρ – плътността на средата, Ω_s – ниво платото, определено чрез спектъра на вълната, като стойностите му се определят по Z, N, E – компонента $\left((\Omega_s = \sqrt{\Omega_Z^2 + \Omega_N^2 + \Omega_E^2}\right)$, $R_{\theta\varphi(S)}$ – насоченост на излъчването (radiation pattern), която при определянето на сеизмичният момент за S-вълни е 0.63, а v_s е скоростта на вълната.

За определянето на радиуса на източника и сваленото напрежение са приложение следните формули:

$$r_P = \frac{v_P.3.36}{2\pi f_0}, \tag{6}$$

където v_p е скоростта на вълната, а f_0 е ъгловата честота в Hz.

За S-вълната радиусът на източника се определя по идентичен начин:

$$r_S = \frac{v_S.2.34}{2\pi f_0}, \tag{7}$$

където v_s е скоростта на вълната, а f_0 е ъгловата честота в Hz.

За сваленото напрежение за P- и S-вълните са в сила следните формули (Eshelby, 1957):

$$\Delta\sigma_p = \frac{7}{16}\frac{M_{0p}}{r_p^3} \tag{8}$$

$$\Delta\sigma_s = \frac{7}{16}\frac{M_{0s}}{r_s^3}, \tag{9}$$

където r_p и r_s са оценките на радиуса по P- и S-вълни (в km).

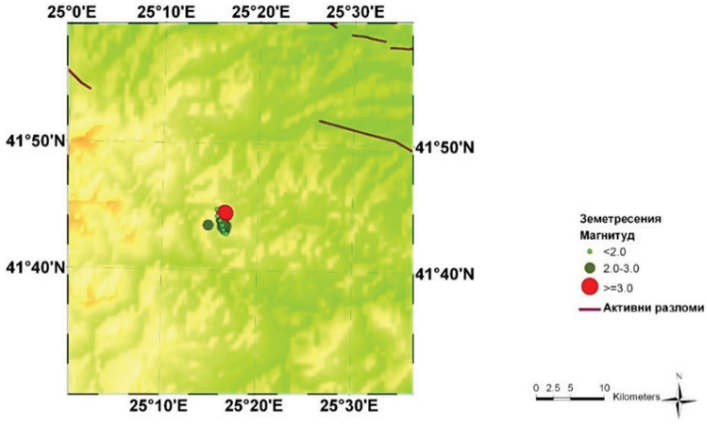
Входни данни

В настоящата работа са оценени огнищните параметри на 10 събития от два роя, реализирани през периода 2009 - 2014 г. на територията на България. Земетресенията са с магнитуд в интервала $2.7 \leq M_p \leq 4.1$ (M_p, дефиниран в Christoskov et al., 2012).

Основен източник на информация за разгледаните земетресения са данни от Националната Оперативна Телеметрична Система за Сеизмологична Информация (НОТССИ).

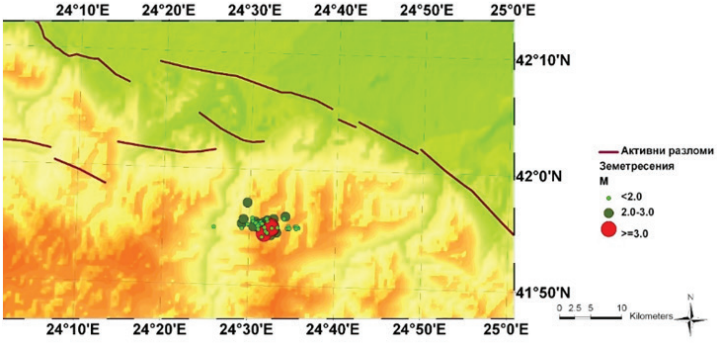
Чрез програмата, базирана на модела на Brune са генерирани 204 спектъра на P и S вълни.

Първата поредица е реализирана през периода 08-30 април 2009 г. в близост до град Кърджали (сеизмогенна зона Източни Родопи). Поредицата съдържа 291 събития, от които 27 земетресения са с магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 4.1$. Останалите събития (264 събития) са много слаби и са регистрирани само от сеизмична станция Кърджали (KDZ) - най-близко разположената станция до активизираната област (на около 18 км). Тези 264 събития не могат да бъдат локализирани и пространствено илюстрирани. Пространственото разпределение на 27-те събития е представено на фигура 2.



Фиг. 2. Пространствено разпределение на роева активност за периода 08.04.2009 г. – 30.04.2009 г.., активните разломи са от „Неотектонска карта на България“, представена в Отчет ГФИ 2007 г.

Втората поредица включва 47 събития с магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 4.1$ и е реализирана в района на град Пловдив (сеизмогенна зона Марица). Периодът на реализация на тези събития е малко повече от 30 дни. Пространствената картина на поредицата е представена на фигура 3.



Фиг. 3. Пространствено разпределение на роев активност, реализирана през периода 12 януари – 16 февруари 2014 г., активните разломи са от „Неотектонска карта на България“, представена в Отчет ГФИ 2007 г.

От двете фигури (Фиг. 2 и Фиг. 3) се вижда, че събитията в тези поредици се групират в много малка пространствена област, която не може да се привърже към дефинирана разломна структура.

Резултати

Резултатите от изследването са представени на фиг. 4-5 и в табл. 1-2. Резултатите от спектралния анализ за 5 от по-силните събития от поредицата в района на град Кърджали е представена на фиг. 4. На фиг. 5 са предствени спектрите на 5 събития от поредицата в района на град Пловдив.

От серията реализирана през месец април 2009 г. в района на град Кърджали (част от сеизмогенна зона Източни Родопи), са разгледани 5 събития. Предствените събития са реализирани в началните часове на серията и са с по-висок магнитуд в интервала 3.3 ÷ 4.1.

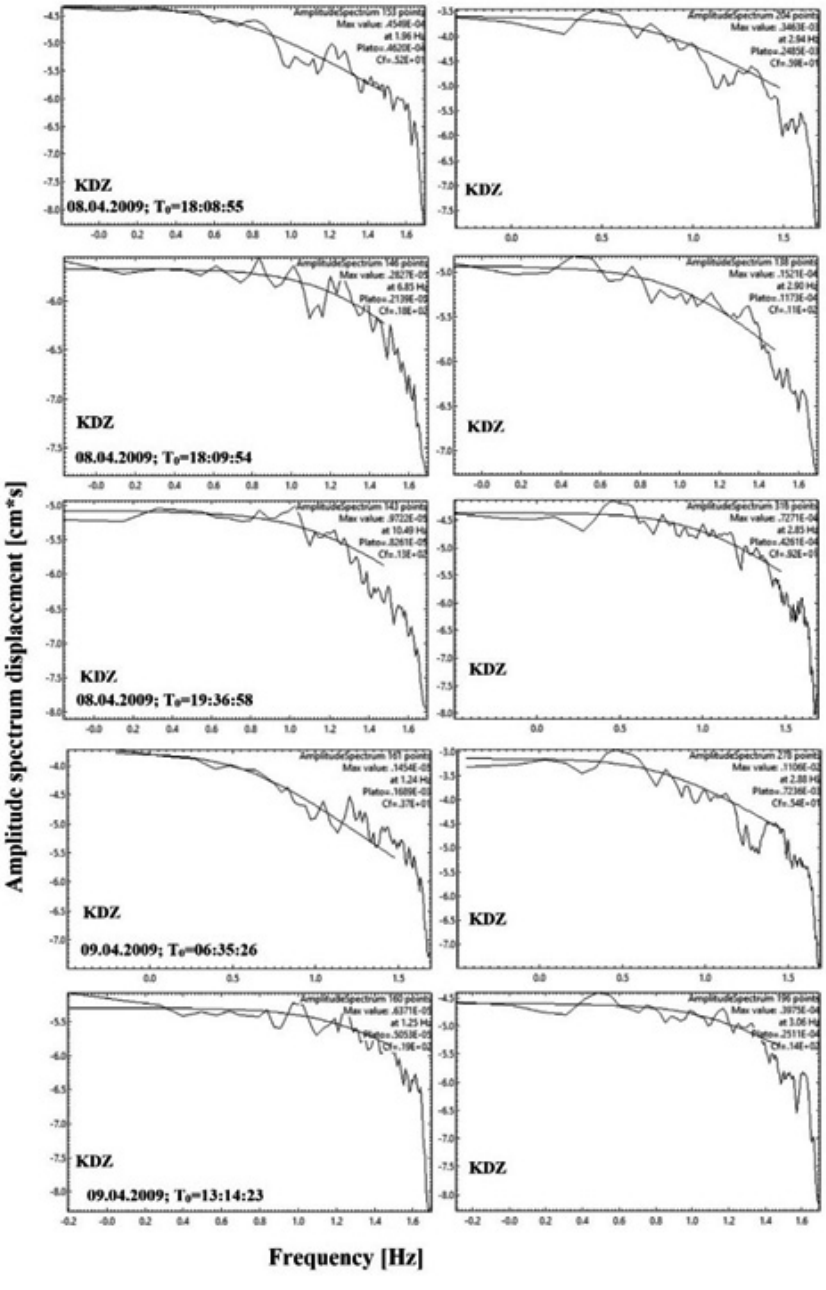
За всяко земетресение са генерирани спектри по преместване за P и S - вълни, като са използвани записите от трите компоненти (Z - спектри за P-вълна; Z, N и E - спектри за S -вълна) на различни станции. На фигура 4 са представени спектрите, генерирани за разгледаните събития, по най-близките до епицентъра станции. Оценените **параметри на сеизмичния източник за всяко от събитията** са дадени в табл. 1.

Таблица 1. Оценки на параметрите на сеизмичния източник за събития от роев тип сеизмичност, генерирани през 2009 г. в района на град Кърджали

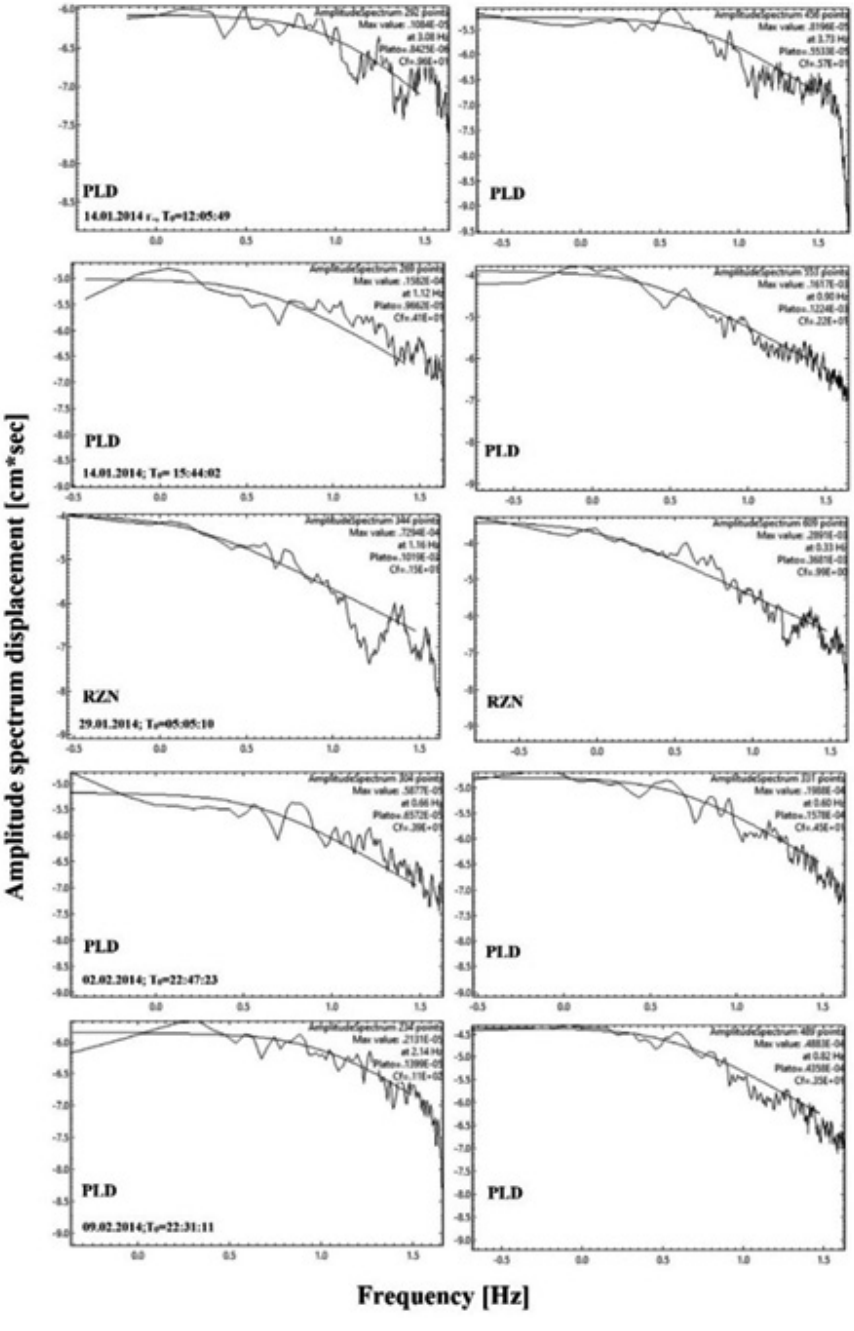
Дата	M_p	Брой станции	M_{0p} [N*m]	$\Delta\sigma_p$ [bar]	r_p [км]	M_{0s} [N*m]	$\Delta\sigma_s$ [bar]	r_s [км]
08.04.2009	3.5	8	8.87E+13	11.07	0.42	9.75E+13	20.33	0.36
08.04.2009	3.3	5	1.69E+13	6.77	0.23	1.58E+13	13.00	0.20
08.04.2009	3.5	7	1.72E+13	9.54	0.19	2.03E+13	11.00	0.20
09.04.2009	4.1	8	3.41E+14	10.34	0.57	5.67E+14	29.76	0.65
09.04.2009	3.4	5	8.74E+12	13.93	0.16	1.08E+13	11.23	0.18

Тези земетресения са с приблизително еднакъв магнитуд със стойности на свалено напрежение в диапазона 7 ÷ 14 бара за P-вълна и 11 ÷ 30 бара за S- вълна и стойности за радиус на източника в диапазона 0.2 ÷ 0.6 км за P-вълна и 0.2 ÷ 0.7 км за S- вълна. Получените резултати са в очаквания диапазон, тъй като това са предимно слаби събития в диапазон с магнитуд между 3.3 ÷ 4.1. Подобни резултати са получени и в други изследвания (напр. Süle, 2010). Стойностите за сеизмичен момент са в диапазона $8.74\times10^{12}\leq M_0\leq3.41\times10^{14}$(N*m) за P-вълна и $1.08\times10^{13}\leq M_0\leq5.67\times10^{14}$(N*m) за S- вълна.

От серията, реализирана през месеците януари-февруари 2014 г., в близост до град Пловдив, територия разположена в маргиналната част на сеизмогенна зона Марица, са разгледани 5 събития. Изследваните събития са с магнитуд в интервала 2.7 ÷ 3.4. На фигура 5 са представени спектрите, генерирани за разгледаните събития, по най-близките до епицентъра станции. Оценените **параметри на сеизмичния източник за всяко от събитията** са дадени в Табл. 2.



Фиг. 4. Спектри (за P и S – вълна) на пет земетресения от роев тип сеизмичност в района на град Кърджали



Фиг. 5. Спектри (за P и S – вълна) на пет земетресения от роев тип сеизмичност в района на град Пловдив

Таблица 2. Оценки на параметрите на сеизмичния източник за събития от роев тип сеизмичност, генерирани през 2014 г. в района на град Пловдив

Дата	M_p	Брой станции	M_{0p} [N*m]	$\Delta\sigma_p$ [bar]	r_p [км]	M_{0s} [N*m]	$\Delta\sigma_s$ [bar]	r_s [км]
14.01.2014	3.2	5	1.12E+13	18.04	0.20	1.19E+13	11.80	0.17
14.01.2014	3.1	8	1.03E+14	23.03	0.30	1.36E+14	32.13	0.33
29.01.2014	3.4	9	2.77E+14	13.69	0.56	4.91E+14	26.83	0.50
02.02.2014	2.8	7	3.13E+13	9.64	0.24	2.91E+13	16.32	0.20
09.02.2014	2.7	6	9.12E+13	20.25	0.32	5.15E+13	14.37	0.26

При тази поредица стойности на свалено напрежение са в диапазона 10 ÷ 23 бара за P-вълна и 12 ÷ 32 бара за S- вълна и стойности за радиус на източника: от 0.2 ÷ 0.6 км за P-вълна и 0.2 ÷ 0.5 за S- вълна. Стойностите на оценените параметри са в очаквания диапазон и потвърждават резултатите, получени от други автори (напр. Süle, 2010; Bhat, 2013). Стойностите за сеизмичен момент са в диапазона $1.12\times10^{13}\leq M_0\leq2.77\times10^{14}$(N*m) за P-вълна и $1.19\times10^{13}\leq M_0\leq4.91\times10^{14}$(N*m) за S- вълна.

Заключение

Чрез анализ на получените резултати се достига до следните заключения за параметрите на сеизмичните източници в разгледаните два роя:

- ✓ Получените стойности за свалено напрежението са в рамките на очаквания диапазон от 10 до 100 бара. Средната стойност на сваленото напрежение е в интервала 7 ÷ 23 бара по P-вълна и 11 ÷ 32 бара по S-вълна. Като при роя от 2009, генериран в района на град Кърджали, се наблюдават по ниски стойнсти на сваленото напрежение;
- ✓ За двата роя стойностите на сеизмичния момент $M_{0,}$ оценени по спектъра на P и S- вълна, са в интервала $10^{12}<M_0<10^{14}$(N*m);
- ✓ Стойности за радиус на източника са в диапазона от 0.2 ÷ 0.6 км за P-вълна и 0.2 ÷ 0.7 за S- вълна. И при двете поредици се наблюдават идентични стойности на този параметър.

Литература

Aki, K., P. G. Richards, 2002. Quantitative seismology. Second Edition, ISBN 0-935702-96-2, University Science Books, Sausalito, 704 pp.

Allmann, B. P., P. M. Shearer, 2007. Spatial and temporal stress drop variations. J. Geophys. Res, . 112, B04305, doi:10.1029/2006JB004395

Bhat, 2013. Estimation of Source Parameters of Local Earthquakes in Jammu and Kashmir, India. International Journal of Scientific and Research Publications, V. 3, Iss. 2, ISSN 2250-3153

Brune, J., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. J. Geophys. Res., 75, 4997-5009.

Brune, J., 1971. Correction (to Brune (1970)), J. Geophys. Res. 76, 5002.

Christoskov L., L. Dimitrova, D. Solakov, 2012. Magnitude determinations of P wave by digital broadband seismometers of NOTSSI network for local and regional events. Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences, 65 (5), 653-660.

Credner, H., 1876. Das vogtländisch-erzgebirgische Erdbeben vom 23. November 1875. Z. Ges. Naturwiss. 48, 246-269.

Eshelby, J. D., 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. In: Proc. R. Soc. Lond. A 241, 376-396.

Frankel, A. 2009. A constant stress-drop model for producing broadband synthetic seismograms: Comparison with the Next Generation Attenuation relations, Bull. Seism. Soc. Am., 99(2A), 664-680, doi: 10.1785/0120080079.

Hanks, T. C. and M. Wyss, 1972. The use of body-wave spectra in the determination of seismic source parameters. Bull. Seism. Soc. Am. 62, 561-589.

Kanamori, H. and Anderson, D. L., 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull. Seismol. Soc. Am., 65, 1073-1095.

Kanamori, H., and C. Allen, 1986. Earthquake repeat time and average stress drop, in Earthquake Source Mechanics, Geoph.. Monogr. Ser., vol. 37, pp. 227-2352

Kanamori, H., Brodsky, E.E., 2004. The physics of earthquakes. Reports on Progress in Physics, 67, 1429-1496.

Malagnini, L., R. B. Herrmann and K. Koch, 2000. Regional ground motion scaling in Central Europe. Bull. Seism. Soc. Am. 90, 1052-1061.

Margaris, N., and D. M. Boore, 1998. Determination of σ and κ0 from response spectra of large earthquakes in Greece. Bull. Seism. Soc. Am. 88, 170-182.

Mogi, K. 1963. Some discussion on aftershocks, foreshocks and earthquake swarm - The fracture of a semi-infinite body caused by inner stress originated its relation to the earthquake phenomena. Bull. Earthq. Res. Inst., 41, 15-658.

Süle, 2010. Spectral source parameters for weak local earthquakes in the Pannonian basin, Cent. Eur. J. Geosci.,2(4), 475-480.

Отчет ГФИ, 2007. Сеизмично райониране на Република България, съобразено с изискванията на Еврокод 8 „Сеизмично осигуряване на строителни конструкции" и изработване на карти за сеизмичното райониране с отчитане на сеизмичния хазарт за територията на страната, Част I, БАН, Геофизичен Институт, С., стр. 205.

Estimation of source parameters for swarm type of seismicity

P. Raykova

Abstract: Spectral analysis of seismic waves is one of the most important origins of information for the earthquake sources. In this study are presented P- and S-waves spectra of the earthquakes from two seismic swarms: the April 2009 swarm located in the vicinity of the city of Kardzhali and the 2014 swarm located near the city of Plovdiv. The database used in the study is compiled using digital data from the Bulgarian Seismological Network – NOTSSI. Displacement spectra are generated for P- and S- waves to estimate

some of the source parameters, such as seismic moment, stress drop, source radius and moment magnitude. Earthquake source parameters are estimated applying Brune model. The source parameters are estimated for 10 earthquakes: five earthquakes of the sequence near the city of Kardzhali and five earthquakes of the sequence near the city of Plovdiv with magnitude in interval 2.7 ÷ 4.1. The estimated stress drop values are within the expected range. The 2009 swarm have lower values of the stress drop, in comparison with 2014 swarm.