БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ • BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
ПРОБЛЕМИ НА ГЕОГРАФИЯТА • 1 • PROBLEMS OF GEOGRAPHY
София • 2019 • Sofia

СЕИЗМИЧЕН МОМЕНТ, СВАЛЕНО НАПРЕЖЕНИЕ И РАДИУС НА ИЗТОЧНИКА НА ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ ОТ ВРЕМЕВАТА ПОРЕДИЦА, РЕАЛИЗИРАНА ПРЕЗ 2009 Г. В СЕИЗМОГЕННА ЗОНА ВАЛАНДОВО

Пламена Райкова[1], Димчо Солаков[1], Стела Симеонова[1]

Разгледани са спектри на P- и S-вълни на земетресения от сеизмичния клъстер (форшокова активност–главно земетресение–афтършокова активност), реализиран във Валандовската сеизмогенна зона, разположена в Република Северна Македония близо до граничния регион България–Гърция. Оценката на параметрите е базирана на модела на Brune (1970). За главното земетресение (M_w=5.3) от 24.05.2009 г. и събитията от поредиците, генерирани преди (форшокови събития) и след него (афтършокови събития), са оценени параметрите: сеизмичен момент (M_0), свалено напрежение ($\Delta\sigma$), както и радиус на източника (R). Разгледани са 11 събития, от които 5 форшока (с магнитуд в интервала 2.8 ÷ 4.3), главното земетресение (M_w=5.3) и 5 по-силни афтършока (с магнитуд в интервала 4.1 ÷ 5.0).

Ключови думи: спектрални характеристики, снето напрежение, сеизмичен момент

SEISMIC MOMENT, STRESS DROP AND SOURCE RADIUS FOR THE SEISMIC CLUSTER OF THE 2009 EARTHQUAKE IN VALANDOVO SEISMOGENIC ZONE

Plamena Raykova[1], Dimcho Solakov[1], Stela Simeonova[1]

Abstract: In this study are presented the spectra of P- and S-waves for earthquakes from the seismic cluster (foreshock - main earthquake - aftershock) of the May 24, 2009 earthquake with moment magnitude M_w5.3, occurred in Valandovo seismogenic zone (situated in FYR of Macedonia close to Bulgaria-Greece border region). Earthquake parameters (seismic moment, source radius, stress drop) are estimated applying Brune model. The model has been used extensively and it has been shown that it gives a good agreement with observations from many different tectonic regions and for a large range of magnitudes. The seismic moment (M_0) is a direct measure of the tectonic size (product of rupture area, average static displacement

[1] Национален институт по геофизика, геодезия и география – БАН; plamena.raikova@gmail.com, dimos@geophys.bas.bg, stelas@geophys.bas.bg

and share module). Stress drop *(Δσ)* is the average difference between initial and final stress along a fault before and after an earthquake. It is an important physical parameter associated with the rupture along the fault.

Earthquake occurrence is well described with the Poisson process if earthquake sequences or clusters are excluded. Such groups (or clusters) of earthquakes are foreshocks and aftershock sequences. Foreshocks are one of the few well-documented precursors to large earthquakes. Foreshocks are those earthquakes that occur before (months, days, hours) the main event in the same area. Aftershocks occur after the main shock and their frequency decays through time with approximately reciprocal of elapsed time since the main earthquake. The database is compiled using digital data from the Bulgarian Seismological Network - NOTSSI (National Operative Telemetric System for Seismological Information). Displacement spectra are generated for P- and S- waves to estimate some source parameters, such as seismic moment, stress drop, source radius and moment magnitude. The source parameters are estimated for 11 earthquakes: for five foreshocks with magnitude M_p in interval 2.8 ÷ 4.3, for the main event with magnitude M_w=5.3 and for five aftershocks with magnitude M_p in interval 4.1 ÷ 5.0. The estimated stress drop values for the main event is within the expected range for moderate earthquakes. The stress drop values for the foreshocks are lower than stress drop value for the main event. The strongest aftershocks are characterized with higher stress drop values than stress drop value for the main event.

***Keywords*:** spectral characteristics, stress drop, seismic moment

ВЪВЕДЕНИЕ

Земетресението е уникално природно явление, определящо се от голям брой фактори, които не могат да бъдат непосредствено наблюдавани. Те са неравномерно разпределени в пространството и времето. Изследването на пространствено-времевото разпределение на земетресенията е съществено за опознаване на сеизмогенния процес.

Разпределението на земетресенията във времето добре се описват с Поасонов процес, ако от сеизмологичните данни се изключат времевите клъстери (групи). Поасоновият процес предполага стационарност (постоянна скорост на реализация) и като модел на сеизмичния процес изключва възможността земетресенията да се генерират във времеви клъстери (групи). Групите от земетресения се разглеждат като съществен, но не случаен елемент на сеизмичността. Най-изявени и разпознаваеми клъстери от земетресения са фор-афтършоковите поредици и сеизмичните роеве.

Форшоковите събития са група земетресения, предхождащи главното събитие. Ако този клъстер бъде разпознат, преди да се реализира главното земетресение, той би се превърнал 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 и отслабват по сила във времето.

Сеизмичният рой е земетръсен клъстер от събития с приблизително еднакъв магнитуд, групирани в пространството и времето. Тези земетръсни групи не се характеризират с изразено главно земетресение.

Приема се, че реализацията на афтършоковите събития е израз на вискозоеластичната релаксация на напреженията в средата. Предполага се, че тези

събития са резултат от процесите на разрушение в огнището на главното земетресение и преразпределяне на напреженията след неговата реализация. Особеният интерес към афтършоковия процес е продиктуван от неговата специфика и особености. От една страна, афтършоковите серии са източник на информация за състоянието както на физико-механичните свойства на средата в огнищата зона, така и за процесите, протичащи в нея (Mogi, 1963). От друга страна, не е възможно създаване на физичен модел за сеизмичния процес, без да се отчитат параметрите, характеризиращи пространственото, времевото и енергетичното разпределения на афтършоковите събития като съществена част от този процес.

Обект на настоящото изследване е времевата поредица (включваща фор- и афтършокова активност), свързана със земетресението от 24.05.2009 г. (M_w=5.3), реализирана всеизмогенна зона Валандово, разположена на територията на Република Северна Македония близо до граничния регион България–Гърция. Най-силното известно събитие в тази сеизмогенна зона е земетресението от 1931 г. с магнитуд по повърхностни вълни M_S=6.8 и епицентрална интензивност I_0=10 MSK. Събитието е последвано от интензивна афтършокова активност (Симеонова, 1999).

За оценка на параметрите на земетресенията от разглеждания времеви клъстер са генерирани спектрите на P- и S-вълни. За целите на изследването през 2017 г. е създадена софтуерна програма (от Д. Солаков), базирана на модела на Brune (1970). Оценени са следните параметрите: сеизмичен момент (M_0), свалено напрежение ($\Delta\sigma$) и радиус на източника (R) за различните земетресения.

Сеизмичният момент (M_0) е величина, която обединява площта на разкъсване и остатъчното преместване по разлома с якостните свойства на средата, и се определя от:

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

където μ е модулът на срязване (твърдостта), S – площта на разломната повърхнина, по която е станало преместването, и D – относителното преместване по разломната повърхнина.

Свареното напрежение (*stress drop, Dσ*) е разлика между началната и крайната стойност на напрежението в средата. Това е критичен параметър, пряко свързан със сеизмичния момент (Frankel, 2009). В разработката на Aki (1967) е установено, че свареното напрежение зависи от тектонската обстановка, в която е генерирано събитието. Свареното напрежение е свързано с енергията, освободена при земетресението, и зависи от физичните свойства на средата и дълбочина, на която е генерирано сеизмичното събитие. За земетресения в близост до границите на плочите (междуплочови събития) средните стойности на параметъра са по-ниски, отколкото при тези в континенталните части (вътрешноплочови събития) (Kanamori, Anderson, 1975; Kanamori, Allen, 1986). Средната стойност на свареното напрежение е около 3 MPa (30 bars) за междуплочови земетресения и около 6 MPa (60 bars) за вътрешноплочови земетресения (Allmann,Shearer, 2009).

Получените стойности за параметрите на главното земетресение, форшоковите и афтършоковите събития са анализирани и сравнени.

ВХОДНИ ДАННИ И МАТЕМАТИЧЕСКИ АПАРАТ

ВХОДНИ ДАННИ

Земетресението от 24.05.2009 г. (M_w=5.3) е предхождано от изявена форшокова активност, включваща 39 събития (магнитуд в интервала 1.0 £M_p≤4.3), реализирани приблизително 24 часа преди главното събитие и от афтършокова активност, включваща 1417 събития с магнитуд в интервала 1.0£M_p≤4.9. Картата на епицентрите на идентифицираните форшокове–основно събитие–афтършокове е представена на фиг. 1 (приложение).

Като основни източници на информация за разгледаните земетресения са използвани данни от Националната оперативна телеметрична система за сеизмологична информация (НОТССИ). За точна оценка на кинематичните параметри на земетресенията е необходимо добро азимутално покритие на станциите, поради което допълнително са използвани данни от сеизмологичните мрежи на Северна Македония и Гърция. Настоящото изследване се базира на сеизмологична информация за времеви период 24.04.–24.05.2012 г. На фигурата с кръгчета в жълто са отбелязани форшоковете, със зелени – форшоковете, с червена звезда – форшоковете с магнитуд в интервала 4.0 ÷ 5.0, а с черна звезда – основното земетресение. Активните разломи се основават на „Неотектонска карта на България“, съставена от Ж. Иванов, Ал. Радулов, Я. Герджиков и Р. Наков, представена в Отчет ГФИ 2008.

МАТЕМАТИЧЕСКИ АПАРАТ

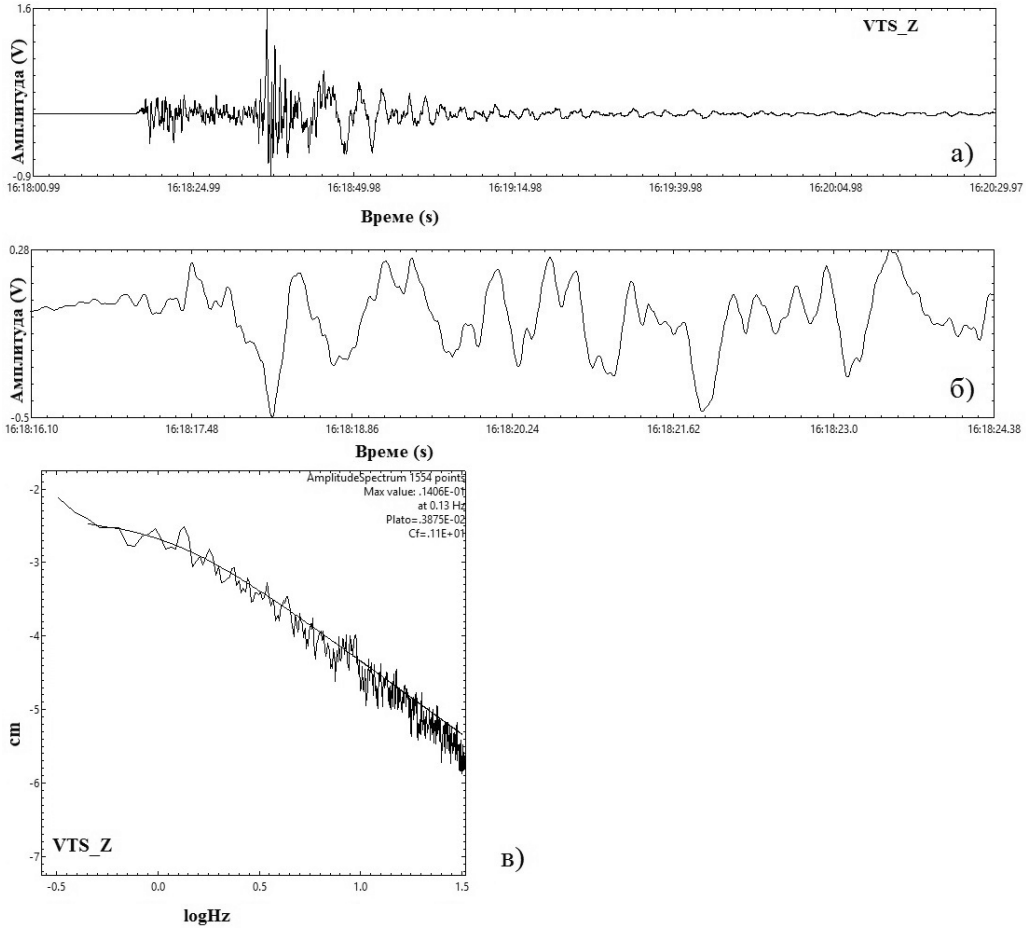
В изследването са разгледани спектрите както по P-вълни, така и по S-вълни, за клъстерите преди и след земетресението от 24.05.2009 г. Сигналите, които са разгледани в изследването, са калибрирани според съответния прибор във всяка станция. За анализа на параметрите на източника се използват записите на земетресения от отделни сеизмични станции, за които са генерирани спектри на преместване за обмените P- и S-вълни, прилагайки модела на Brune (1970). За преобразуването на амплитудно-времеви сигнал в амплитудно-честотен се използва бързо преобразуване на Фурие (FFT). На фиг. 2 е представен пример за преобразуването на амплитудно-времеви сигнал в амплитудно-честотен с цел генериране на спектър по преместване. На фиг. 2 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.

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 следената формула:

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

където M_{0p} е сеизмичният момент за P-вълната, ρ – плътността на средата, Ω_p – платото, определено чрез спектъра на вълната, v_p – скоростта на вълната,



Фиг. 2. Записи на станция VTS и спектър по P-вълна за земетресението от 24.05.2009 г. с M_w=5.3

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:

$$M_{0s} = \frac{\rho.4\pi.\Omega_p.R.v_s^2}{R_{\theta\varphi}(S)} \quad (3)$$

където M_{0s} е сеизмичният момент за S-вълната, ρ – плътността на средата, Ω_s – платото, определено чрез спектъра на вълната, като стойностите на му се определят по Z, N, E – компонента ($\Omega_s = \sqrt{\Omega_Z^2 + \Omega_N^2 + \Omega_E^2}$), $R_{\theta\varphi}$(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:

$$R_p = \frac{v_p.3.36}{2\pi f_0} \ , \tag{4}$$

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:

$$R_s = \frac{v_s.2.34}{2\pi f_0} \ , \tag{5}$$

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

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

$$\Delta\sigma_p = \frac{7}{16}\frac{M_{0p}}{R_p^3} \tag{6}$$

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

където R_p и R_s са радиусите за P- и S-вълните.

РЕЗУЛТАТИ

В настоящото изследване, прилагайки програма, базирана на модела на Brune (1970), са оценени параметрите (сеизмичен момент – M_0, свалено напрежение – $D\sigma$, и радиус на източника – R) за 11 събития, от които 5 форшока (с магнитуд в интервала 2.8 ÷ 4.3), главното събитие (с магнитуд M_w=5.3) и 5 от по-силните афтършока (с магнитуд в интервала 4.1 ÷ 5.0).

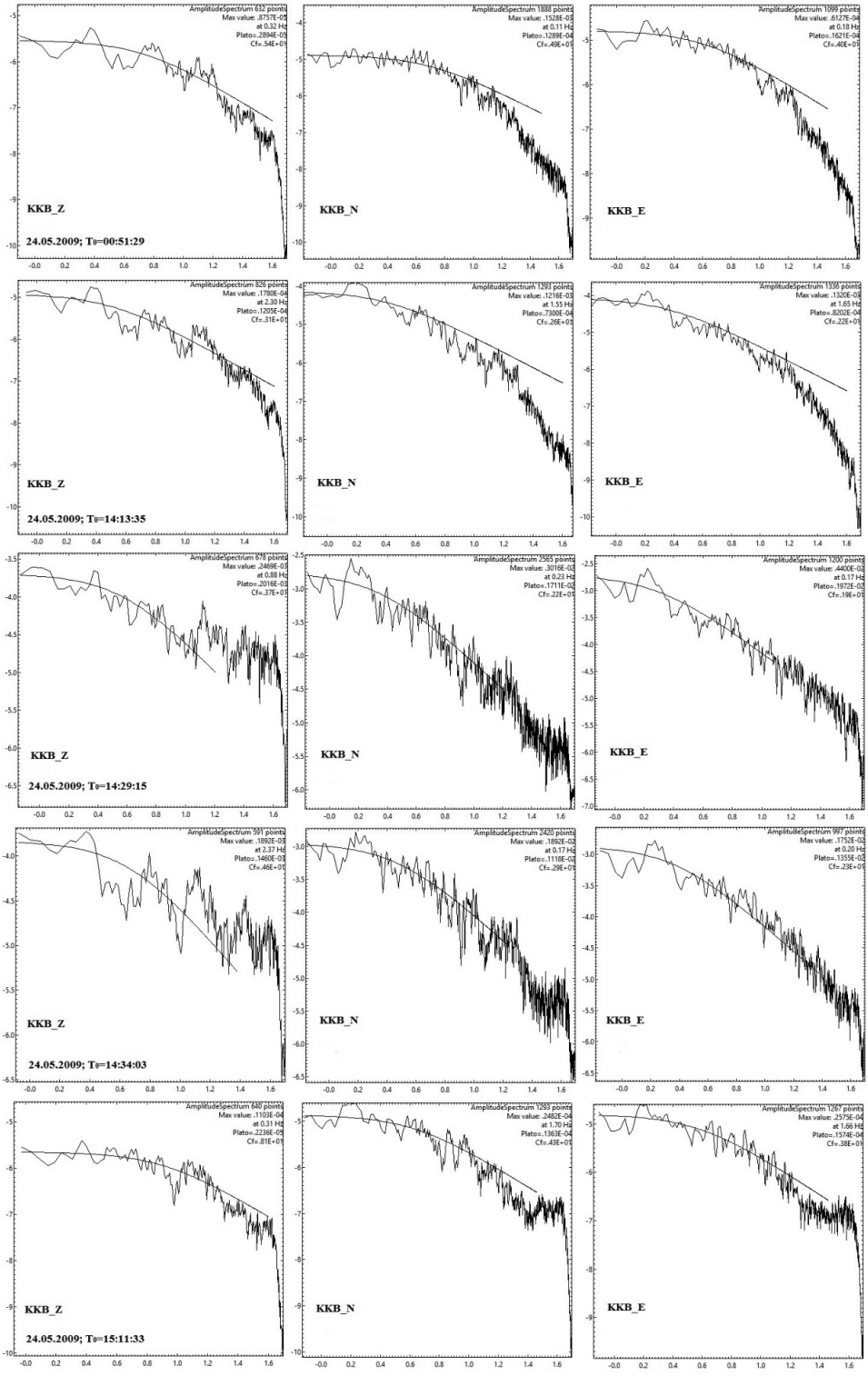
За всяко едно от земетресенията са генерирани спектри по преместване за P и S-вълни, като са използвани записите от трите компоненти (Z – спектри за P-вълна; Z, N и E – спектри за S-вълна) на различните станции – общо 356 спектъра. Записите, които са използвани в изследването, са калибрирани според съответния прибор във всяка станция. На фиг. 3 са представени спектрите за 5^{те} най-силни форшокови събития. На фиг. 4 са представени спектрите за главното събитие от 24.05.2009 г., а фиг. 5 илюстрира спектрите на 5^{те} по-силни афтършокови събития. За форшоковите и афтършоковите събития са представени спектрите от най-близките до епицентъра станции. Оценените параметри на сеизмичния източник за всяко от събитията са дадени в хронологичен ред (форшокови събития, главно земетресение, афтършокови събития) в табл. 1.

От времевата поредица форшок–главно събитие–афтършок може да се отбележи, че при по-голяма част от събитията от форшоковата поредица се наблюдават по-ниски стойности на параметрите: сеизмичен момент (M_0), снетото напрежение ($D\sigma$) и радиус на източника (R). Стойностите на форшоковата активност за снетото напрежение ($D\sigma$) са в диапазона 3.0 ÷ 31 бара за P-вълна и 4 ÷ 34 за S-вълна. Тук получените резултати са в съответствие със стойностите на

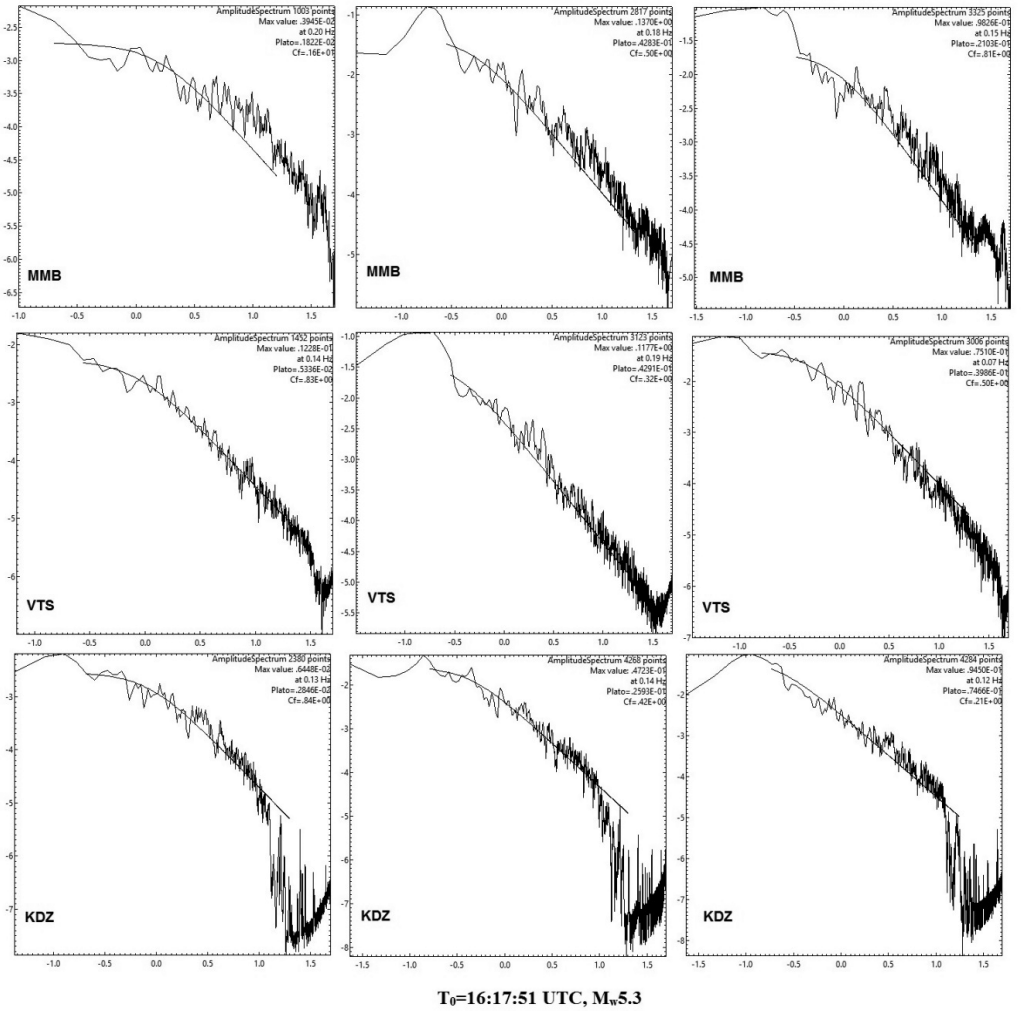
Таблица 1

Оценки на параметрите за главното земетресение и по-силните фор-афтършокови събития, генерирани през 2009 г. в сеизмогенна зона Валандово

Дата Ден месец година	Координати φ(°)/ λ(°)	H (km)	M	Бр. станции	M_{0p} (Nm)	$D\sigma_p$ (bar)	Радиус на източника (*R*, km)	M_{0s} (Nm)	$D\sigma_s$ (bar)	Радиус на източника (*R*, km)
24.05.2009 г.	41.28/22.68	20	2.8	6	6.69E+13	3.10	0.45	5.77E+13	3.73	0.41
24.05.2009 г.	41.33/22.71	8	3.2	9	2.14E+14	3.01	0.69	4.23E+14	5.92	0.74
24.05.2009 г.	41.35/22.71	8	4.3	11	3.44E+15	24.32	1.05	7.76E+15	33.54	1.05
24.05.2009 г.	41.33/22.73	2	4.1	9	1.50E+15	30.94	0.65	1.49E+15	34.44	0.63
24.05.2009 г.	41.30/22.72	8	3.0	5	5.37E+13	5.68	0.37	4.98E+13	8.96	0.31
24.05.2009 г.	41.32/22.74	5	5.3	11	8.83E+16	34.78	2.25	4.41E+17	47.12	3.75
24.05.2009 г.	41.32/22.74	5	4.6	11	3.89E+15	46.27	0.72	7.16E+15	72.87	0.71
24.05.2009 г.	41.32/22.71	7	4.1	9	1.22E+15	17.89	0.76	1.36E+15	21.10	0.65
24.05.2009 г.	41.32/22.74	7	4.9	12	2.26E+16	66.86	1.13	4.78E+16	67.68	1.56
25.05.2009 г.	41.31/22.67	4	4.0	5	1.23E+15	39.87	0.69	7.54E+14	41.12	0.55
01.06.2009 г.	41.27/22.73	5	4.3	11	2.53E+15	32.34	0.77	5.15E+15	34.27	0.96



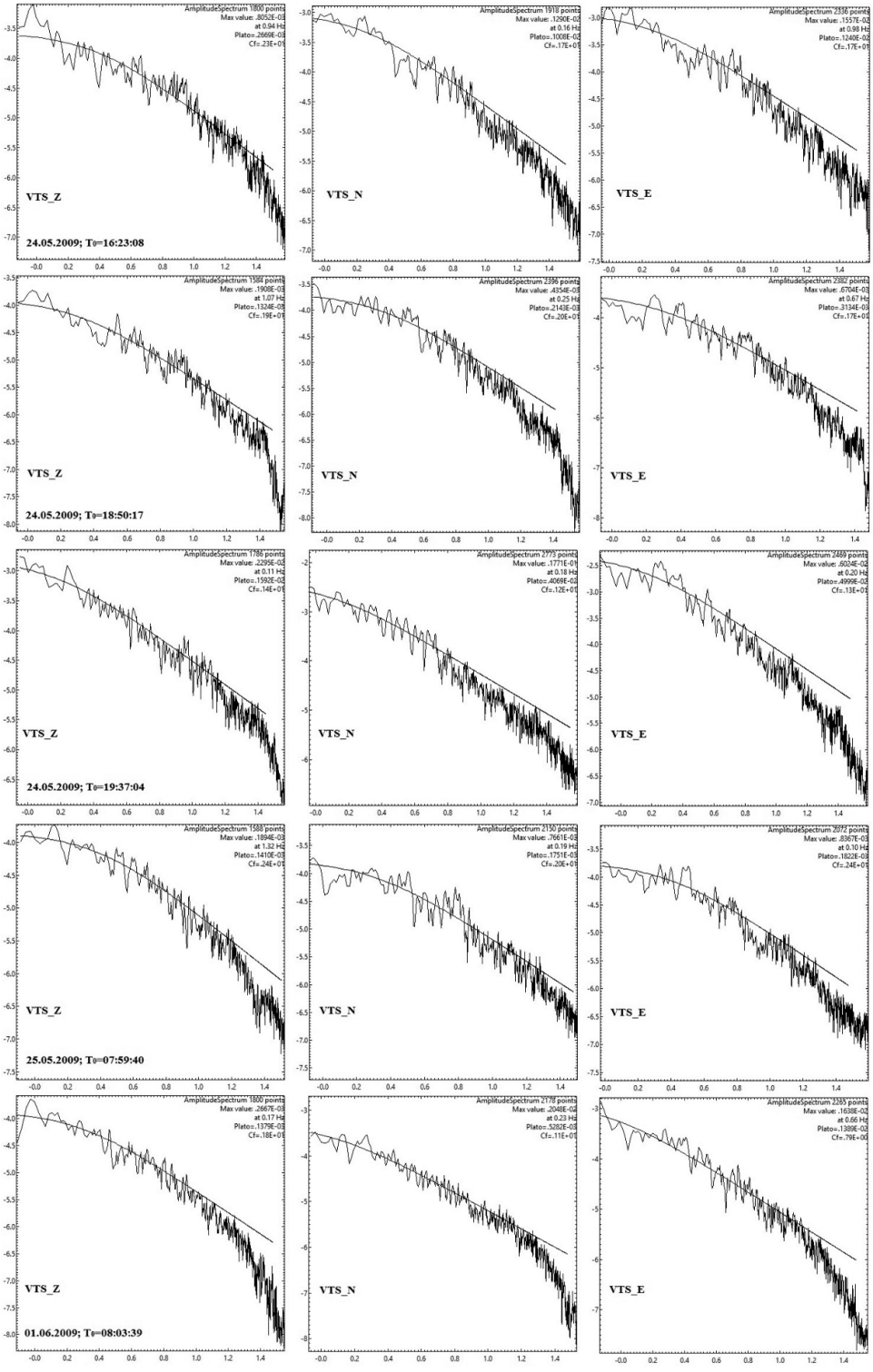
Фиг. 3. Спектри (за P- и S-вълна) на 5[те] най-силни форшокови събития



Фиг. 4. Спектри (за P- и S-вълна) на главното земетресение от 24.05.2009 г., T_0=16:17:50, генерирани по записи на три от най-близките станции, регистрирали събитието

тези параметри, оценени от други автори в изследванията им върху форшокови поредици (Chen, 2013).

Оценките за снетото напрежение *(Dσ)* за главното земетресение са 35 бара за P-вълна и 47 бара за S-вълна, което е в рамките на очакваните стойности за умерено силно земетресение (Havskov and Ottemöller, 2010). Установено е, че стойността на този параметър варира между 10–100 бара, или от 1–10 MPa (Kanamori and Anderson, 1975; Kanamori and Brodsky, 2004). Подобни резултати са получени и в други изследвания върху афтършокови клъстери (Mayeda et al., 2005). Най-общо за афтършоковите събития стойността на снетото напрежение е в диапазона 18 ÷ 67 бара за P-вълна и 21 ÷ 73 за S-вълна.



Фиг. 5. Спектри (за P- и S-вълна) на 5те най-силни афтършокови събития

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящото изследване са оценени параметри на земетресения от поредицата събития в района на Валандово, Република Северна Македония (форшок–основно събитие–афтършок) чрез спектри по преместване за P- и S-вълни. Прилагайки програма, базирана на модела на Brune (1970), са определени: сеизмичен момент (M_0), снето напрежение ($D\sigma$) и радиус на източника (R). Получените резултати могат да се обобщят в следните заключения:

1. Всички събития от форшоковата поредица се характеризират с по-ниска стойност на снетото напрежение ($D\sigma$) от тази на главното земетресение;

2. Получените резултати показват, че стойностите за снето напрежение ($D\sigma$) на главното земетресение са в очаквания диапазон за умерено силно земетресение;

3. Най-силните земетресения от афтършоковата поредица се характеризират с по-високи стойности на снетото напрежение ($D\sigma$) от тази на основното събитие.

Благодарности:

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Опазване на околната среда и намаляване на риска от неблагоприятни явления и природни бедствия“, одобрена с Решение на МС № 577/17.08.2018 г. и финансирана от МОН (Споразумение № Д01-230/06.12.2018 г.). По време на работата Пламена Райкова е стипендиант на Световната федерация на учените.

Л И Т Е Р А Т У Р А

Симеонова, С. 1999. Изследване на афтършоковия процес на територията на Централни Балкани (България и близките ѝ околности). Автореферат за ОНС „доктор“, С. 38 с./ Simeonova S., Investigation of the aftershock process on the territory of the Central Balkans (Bulgaria and surroundings). PhD Thesis, 38, (Bg).

Отчет ГФИ. 2008. Сеизмично районiране на Република България, съобразено с изискванията на Еврокод 8 “Сеизмично осигуряване на строителни конструкции” и изработване на карти за сеизмичното районiране с отчитане на сеизмичния хазарт върху територията на страната, Част 6, стр. 80-113/ **Report Geoph. Ist.- BAS**. 2008. Part 6: Geology, Sofia, fund of NIGGG, 80-113. (Bg)

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

Aki, K. 1967. Scaling law of seismic spectrum, *J. Geophys. Res.*, **72**(4), 1217–1231.

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

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.

Chen, X. 2013. Aspects of earthquake triggering and seismicity clustering. UC San Diego Electronic Theses and Dissertations.

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.

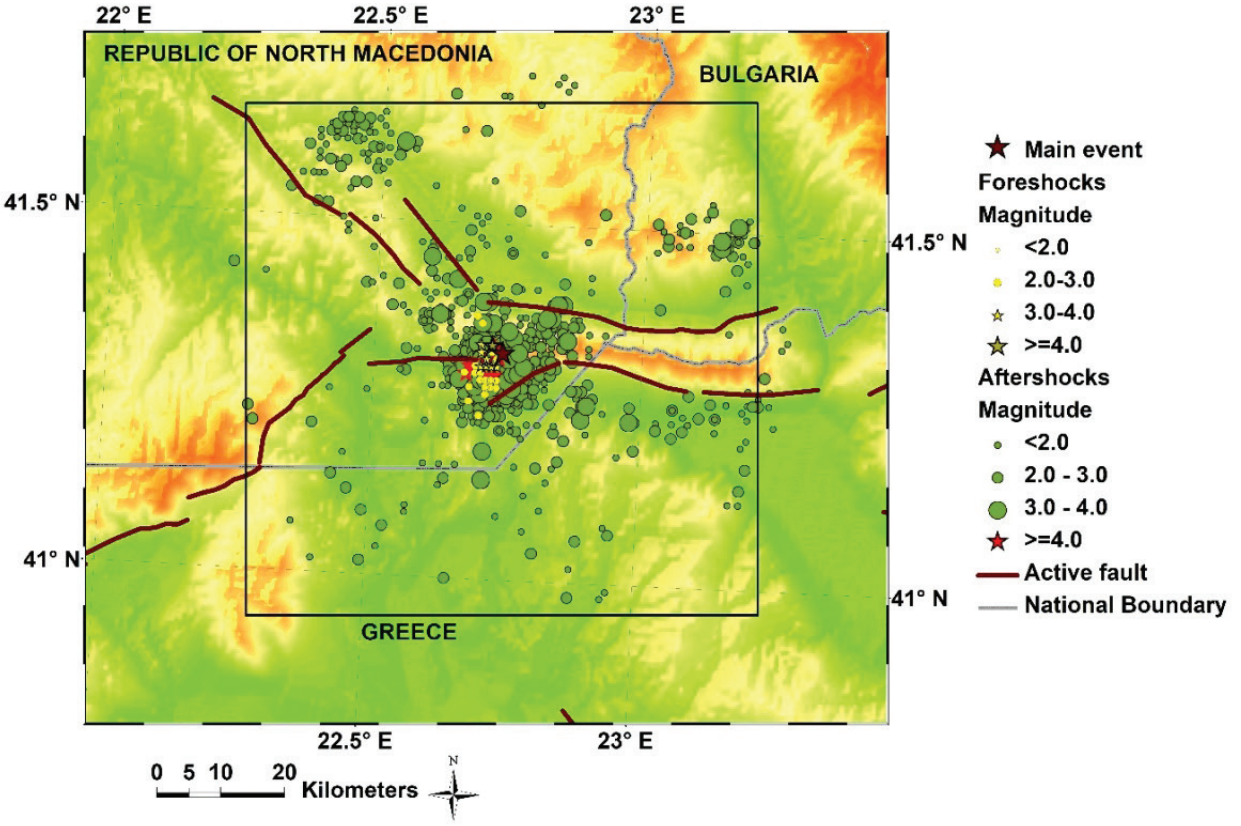
Havskov J. , L. **Ottemöller.** 2010. Routine Data Processing in Earthquake Seismology. ISBN 978-90-481-8696-9, DOI 10.1007/978-90-481-8697-6, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 245-282.

Kanamori, H., D.L. Anderson. 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seismol. Soc. Am*., 65, 1073–95.

Kanamori, H., C. Allen. 1986. Earthquake repeat time and average stress drop. *Earthquake Source Mechanics*, *Geophys. Monogr*. Ser., vol. 37, edited by S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz, pp. 227– 2352, AGU, Washington, D.C.

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

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.



Фиг. 1. Пространствено разпределение на различните клъстери в района на сеизмогенна зона Валандово (преди и след земетресението от 24.05.2009 г.) за периода 24.04.–24.05.2009 г.