

Времево разпределение на афършокова поредица след земетресението от февруари 2018 г. реализирано в района на град Асеновград, сеизмогенна зона Марица

Пл. Райкова¹, С. Симеонова¹, Д. Солаков¹

¹ Национален институт по Геофизика, Геодезия и География – Българска академия на науките, 1113, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 3, София, България, e-mail: praykova@geophys.bas.bg, stelas@geophys.bas.bg, dimos@geophys.bas.bg

DOI: 10.34975/bgj-2022.45.9

Абстракт: Статистическият анализ се прилага за изучаване времевия модел на афършоковата активност наблюдавана след земетресението от 21 февруари 2018 г. с магнитуд по сеизмичен момент $M_w 4.7$, реализирано в района на град Асеновград, сеизмогенна зона Марица. Въз основа на предположението, че вторичните трусове са разпределени във времето като нестационарен Поасонов процес се използва модифицираната формула на Омори за оценка на параметрите (K , c и p). Трансформацията на времето скала t в честота-линеализирана скала τ се прилага за определяне на най-добрата връзка между афършоковата активност и различни статистически модели. Затихването на афършоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Омори и е установена мултиполна активност с две вторични серии.

Ключови думи: земетресение, времево разпределение, афършок, сеизмогенна зона Марица

Въведение

Земетресението като природно явление се определя от голямо брой фактори, които трудно се контролират и не могат да бъдат непосредствено наблюдавани. Земетресението е явление със силно изявен дуализъм. От гледна точка на науката, сеизмичните вълни, породени от земетресенията са изключително полезни за изучаване на вътрешния строеж на Земята, а от социално - икономическа гледна точка това явление може да има катастрофален от характер. Съвкупността от

земетресения в дадена област, разглеждана във време, пространство и енергия, определя сеизмичния режим на тази област. Земетресенията са неравномерно разпределени в пространството и времето. Изследването на пространствено-времето разпределение на земетресенията е съществено за опознаване на сеизмогенния процес.

В глобален аспект, земетресенията са концентрирани по сеизмични пояси, които съвпадат с контактните зони между най-крупните геоструктури - тектонските плочи. Разпределението на земетресенията във времето, в първо приближение, 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 не случаен елемент на сеизмичността. Изявени и разпознаваеми клъстери от земетресения са фор-афършоковите поредици и сеизмичните роуе.

От земетръсните групи афършоковите събития са едни от най-достъпните за наблюдение и се приема, че тяхната реализация е израз на вискозоеластичната релаксация на напрежения 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. Пространствено-времевите и енергетичните особености на афършоковите поредици са традиционен обект на изследване в сеизмологията. Особеният интерес към афършоковия процес е продиктуван от неговата специфика и особености. От една страна афършоковите серии са източник на информация за състоянието, както на физико-механичните свойства на средата в огнищата зона, така и за процесите, протичащи в нея. От друга страна не е възможно създаване на физичен модел за сеизмичния процес без да се отчитат параметрите, характеризиращи пространственото, времево и енергетичното разпределение на афършоковите събития като съществена част от този процес (Polat et al., 2002, Bayrak и Öztürk, 2004, Ansari, 2017, Enescu and Ito, 2002; Enescu et al., 2011; Kato and Igarashi, 2012; Toda et al., 1998; Utsu et al., 1995; Wiemer and Katsumata, 1999; Wiemer and Wyss, 2000).

Повечето физични процеси затихват експоненциално във времето, а афършоковият процес, затихва по обратен степенен закон – феноменална негова характеристика, представена чрез модифицираната формула на Omori (Omori, 1894a, b; Utsu, 1957, 1961, 1969):

$$n(t) = K(t + c)^{-p}, \quad (1)$$

където p , K и c са константи.

Основният параметър p , характеризиращ затихването на афършоковата активност във времето, е високо информативен както за механизма на релаксация на напреженията, така и за физико-механичните свойства на средата в дадена сеизмогенна зона (Mikumo and Miyatake, 1979; Dieterich, 1978).

В настоящото изследване е анализирано времето разпределение на афтершоковата поредица след земетресението от 21 февруари 2018 г. с магнитуд по сеизмичен момент M_w 4.7, реализирано в района на град Асеновград, област Пловдив, сеизмогенна зона Марица ($T_0=23:41:58$, $\varphi=42.07$, $\lambda=24.91$ и $h=14$ km).

Сеизмотектоника на района

Средногорският регион обхваща Средногорската зона, голяма част от Сакар-Странджанската зона (Тектонско райониране на територията на България, от Отчет ГФИ 07-02, 2008). Активните разломи са главно със субпаралелно и северозапад-югоизточно направление, разположени по цялата територия на региона. Сеизмичността може да бъде привързана към активните разломи. В този регион, в сеизмогенна зона Марица са реализирани едни от най-силните земетресения на територията на България.

Сеизмогенна зона Марица е разположена в Централна Южна България. Сеизмичността в зоната е привързана към добре известната Маришка разломна система, простираща се в направление ЗСЗ-ИЮИ. Най-силните известни земетресения, станали в зоната, са събитията от 1928 г.: Чирпанското земетресение от 14 април 1928 г. с магнитуд $M_w=6.5$ и Пловдивското от 18 април 1928 г. с магнитуд $M_w=7.1$.

Земетресенията предизвикват значителни разрушения в градовете Пловдив, Чирпан и Първомай, както и в много други селища (илустрирано на Фиг. 1). Двете земетресения са последвани от интензивна афтершокова активност, продължила до края на 1933 г. (Simeonova, Solakov 1999).

След земетръсната серия от 1928 г., в зоната се наблюдава затишие на силните земетресения с M_w^3 6.5, което продължава и до сегашният момент. През инструменталния период в зоната са наблюдавани основно умерени земетресения с магнитуд между $M=4$ и $M=5$. Каквото е и събитието (с магнитуд $M_w=4.7$), анализирано в настоящото изследване.



Фиг. 1. Разрушения след земетресението от 14 април 1928 г., град Чирпан

Метод и входни данни

Метод

Затихването на афтершоковия процес във времето е по обратен степенен закон, който се представя чрез модифицирана формула на Omori: $n(t) = K(t + c)^{-p}$ (Utsu, 1961).

Ogata (1983) предлага използването на метода на максимално правдоподобие (ММП) за оценка на параметрите на модифицираната формула на Omori. За прилагане на ММП се допуска, че развитието на афтершоковата активност във времето е нестационарен Пуасонов процес с интензивностна функция $l(t; \theta)$, $\theta = (K, p, c)$, определена чрез връзката:

$$\lambda(t; \theta) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{\Delta t}(t)}{\Delta t}, \quad (2)$$

където $P_{\Delta t}(t)$ е вероятността да се реализира събитие в малък времеви интервал $(t, t + \Delta t)$. Тогава функцията на максимално правдоподобие за афтершокова поредица, реализирана в интервал от време $[S, T]$ в моменти $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ (t_1, t_2, \dots, t_k са времената на поява на афтершоковите събития), се дава чрез уравнението:

$$L(t_1, t_2, \dots, t_k; \theta) = \prod_{i=1}^k \lambda(t_i; \theta) e^{-\int_S^T \lambda(t; \theta) dt}. \quad (3)$$

Оценките по максимално правдоподобие за параметрите (векторът на параметрите) се получават от максимиране на функцията на максимално правдоподобие. За серия без вторични афтершокови поредици, интензивностна функция се определя чрез модифицираната формула на Omori:

$$\lambda(t; \theta) = K(t + c)^{-p} \quad (\theta = (K, p, c)). \quad (4)$$

При поредици с изявена вторична афтершокова активност интензивностната функция се представя чрез уравнението от вида (Ogata, 1983):

$$\lambda(t; \theta) = K(t + c)^{-p} + \sum_{i=1}^m H(t - T_i) K_i (t - T_i + c_i)^{-p_i}, \quad (5)$$

където m е броят на вторичните поредици, $H(t)$ е единична функция на Хевисайд и T_i е началото на i -тата вторична афтершокова поредица и $\theta = (K, p, c, K_1, p_1, c_1, \dots, K_m, p_m, c_m)$.

При коректен избор на интензивностната функция, т.е. на параметрите, афтершоковият процес се трансформира в стандартен Пуасонов процес ($\lambda=1$) по чис-

точно - линеаризираната времева ос τ . Честотно - линеаризираното време за афгършокова поредица се дефинира като:

$$\tau = \Lambda(t) = \int_s^t \lambda(s) ds = \int_s^t \left[K(s+c)^{-p} + \sum_{i=1}^m H(t-T_i) K_i(t-T_i+c_i)^{-p} \right] ds. \quad (6)$$

Времевата ос t се използва за установяване на отклонения в сеизмичната активност от теоретичния тренд $N(\tau)=\tau$, където $N(\tau)$ е кумулативният брой събития до момента. Увеличение на активността, в сравнение с теоретично очакваната се разглежда или като изява на вторична афгършокова активност, или като край на афгършоковата активност.

За сравняване на модели за разпределение на афгършоковата активност във времето е приложен информационния критерий на Akaike, AIC (Akaike, 1974). Това е един от най-приложимите критерии за сравнение на различни модели, основаващи се на едни и същи данни. AIC се определя с уравнението:

$$AIC = (-2) \max \ln(L_h) + 2n, \quad (7)$$

където \ln е натурален логаритъм, L_h е съответната функция на правдоподобие и n -броят на оценените параметри. Този критерий отчита съответствието между данните от наблюденията и заложения теоретичен модел. Модел с по-малка стойност на AIC се счита за по-добре описващ наблюденията.

Данни

В настоящото изследване за афгършок се приема всяко събитие, реализирано във времето след друго земетресение, което изпълнява критериите за афгършок, дефинирани от Gardner and Knopoff (1974). Съгласно това определение ако се разгледат две събития от подредена във времето серия земетресения с индекси „ m ” и „ a ” и магнитуди, съответно M_m и M_a , то второто ще бъде афгършок на първото ако са изпълнени следните условия:

$$\begin{aligned} M_a &< M_m \\ 0 &< t_a - t_m < T(M_m) \\ 0 &\leq R_{am} < R(M_m), \end{aligned} \quad (8)$$

където t е време на възникване, R_{am} е разстоянието между хипоцентрите (епицентрите) на главното събитие и съответния афгършок, а $T(M_m)$ и $R(M_m)$ са емпирични функции на магнитуда на основното земетресение. Граничните стойности на тези функции, съответно $T_a(M_m)$ и $R_a(M_m)$, са определени по модификация на функцио-

налните зависимости (8), получена за централни Балкани от Христосков, Лазаров (1981). В настоящото изследване за дефиниране границите на афтершоковите серии в пространството и времето, като първо приближение, са приложени следните уравнения (съгласно Христосков, Лазаров, 1981):

$$\log R_a(M_m) = 0.9696 + 0.1243 M_m \quad (9)$$

$$\log T_a(M_m) = -0.62 + 0.56 M_m \quad (M_m < 6.0) \quad (10)$$

$$\log T_a(M_m) = -5.25 + 2.15 M_m - 0.137 M_m^2 \quad (M_m \geq 6.0), \quad (11)$$

където R_a е максималният размер на афтершоковата област, а T_a е предполагаемата продължителност на поредицата във времето.

Основен източник на данни за разглеждания сеизмичен клъстер са от Националната оперативна телеметрична система за сеизмологична информация (НОТССИ). За оценка параметрите на разпределенията на афтершоковите събития във времето е разработен програмен пакет на PASKAL (представен в Солаков, 2010).

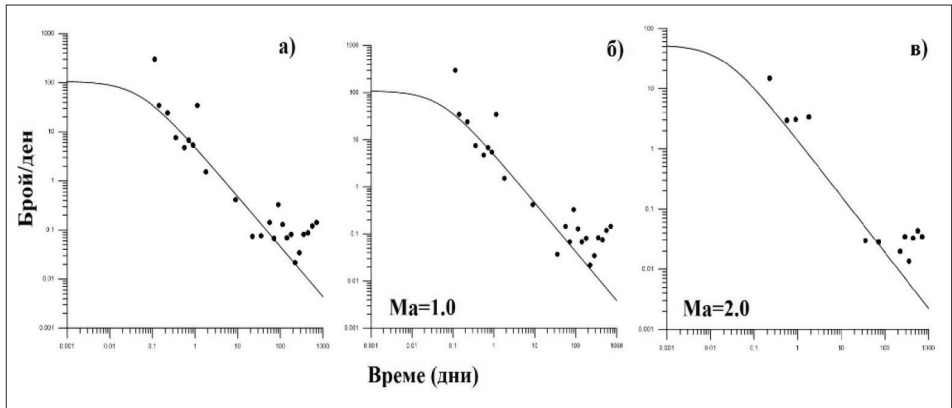
Земетресението от 21.02.2018 г. (M_w 4.7) е последвано от изявена афтершокова активност, включваща 99 събития с магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 3.7$, реализирани за 665 дни. От тези събития с магнитуд $M_p \geq 2.0$ са само 28 събития.

Резултати

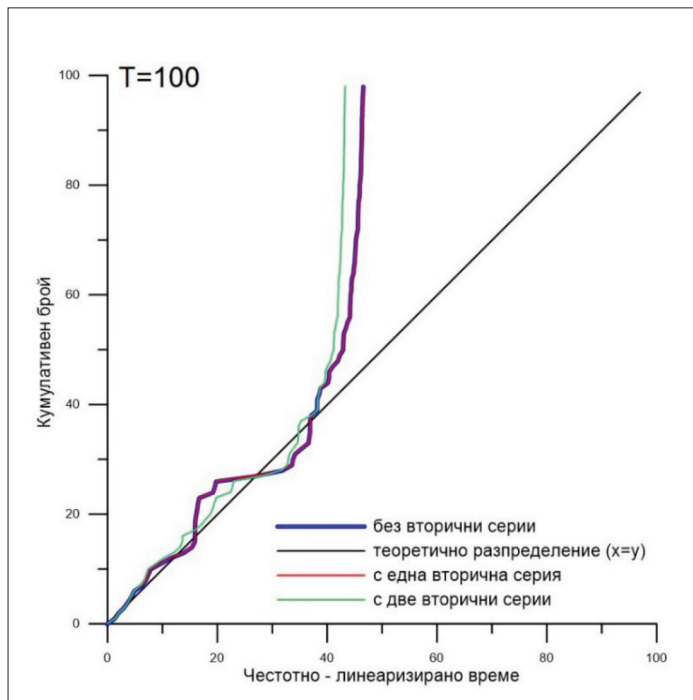
Афтершоковата поредица се представя като единична серия (без вторични поредици) чрез модифицираната формула на Omori за различни времеви интервали: очаквана продължителност, съответно $T=100$ дни съгласно уравнение (10). Разгледани са три случая - 1^{ва}, (а) без магнитуден праг на афтершоковите събития; втори (б) и трети (в) съответно с $M_a=1.0$ и $M_a=2.0$. На Фиг. 2 е представено честотно-времето разпределение на афтершоковите събития за трите разглеждани случаи. Наблюдаваното честотно разпределение се сравнява с т. нар. „теоретично“ разпределение, което в настоящия случай е в съответствие с модифицираната формула на Omori (1).

При коректен избор на параметрите K , p , c , афтершоковият процес се трансформира в стандартен Пуасонов процес по честотно линеаризирана времева ос - t . При отклонение на честотно - линеаризирано разпределение от теоретичното, се търси модел с вторична активност. На фигури 3 до 5 е представено честотно-линеаризираното разпределение на афтершоковите събития: за очакваната продължителност ($T=100$ дни) c и без магнитуден праг - $M_a=1.0$ и $M_a=2.0$, c и без вторични серии (разглежда се индикация за реализиране на вторични афтершокови поредици след най-силните афтершоци, събитията от 22 февруари 2018 г., с $M=3.7$ и от 12 май 2018 г., с $M=3.4$)

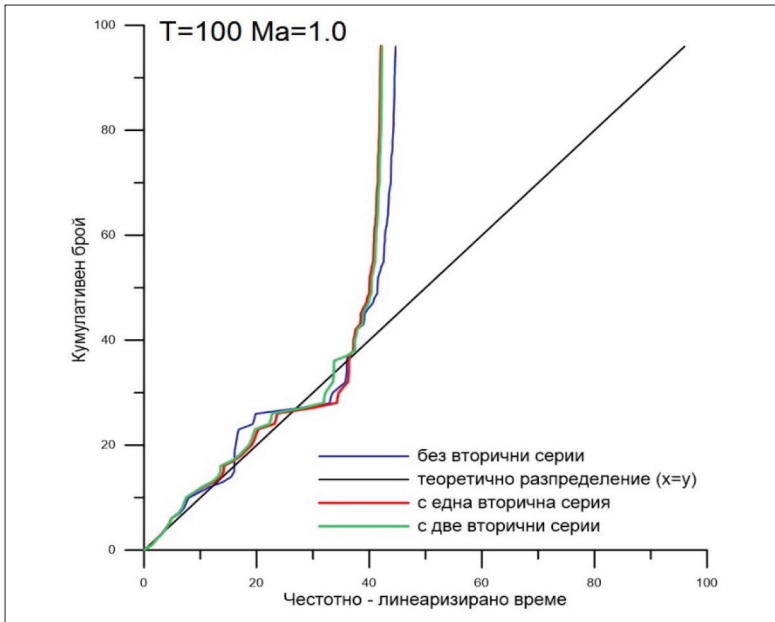
В Таблица 1 са представени стойностите на параметрите K , p , c и стойности на AIC за различните случаи.



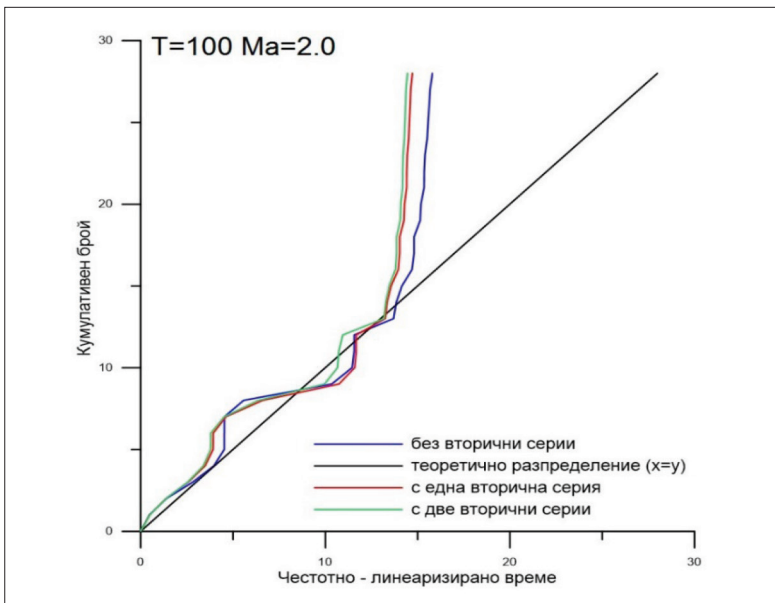
Фиг. 2. Честотно - разпределение на афтершоковите събития във времето: а) без магнитуден праг; б) $M_a=1.0$; в) $M_a=2.0$



Фиг. 3. Честотно-линеаризирано разпределение на афтершоковите събития за период $T=100$ дни без магнитуден праг, без и с вторични серии.



Фиг. 4. Честотно-линеаризирано разпределение на афгършоковите събития за период $T=100$ дни с магнитуден праг $M_a=1.0$, без и с вторични серии.



Фиг. 5. Честотно-линеаризирано разпределение на афгършоковите събития за период $T=100$ дни с магнитуден праг $M_a=2.0$, без и с вторични серии.

Таблица 1. Оценки на параметрите K , p , c и AIC - критерий за различни модели на поредици след земетресението от 21.02.2018 г.

Модел	Период (T)	K	p	c	K_1	p_1	c_1	K_2	p_2	c_2	AIC
Без вторична серия, без магнитуден праг	100	5.01	1.02	0.05							12.15
С една вторична серия, без магнитуден праг	100	3.98	1.08	0.04	0.49	1.08	0.001				-14.16
С две вторични серии, без магнитуден праг	100	3.57	1.09	0.04	0.48	1.09	0.001	0.21	1.09	0.001	-41.58
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=1$	100	4.98	1.04	0.05							8.60
С една вторична серия, с магнитуден праг $M_a=1$	100	3.82	1.09	0.04	0.53	1.09	0.001				-17.72
С две вторични серии, с магнитуден праг $M_a=1$	100	3.44	1.11	0.04	0.47	1.11	0.001	0.46	1.11	0.04	-35.51
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2.0$	100	1.38	0.93	0.02							41.11

С една вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	100	1.05	0.98	0.02	0.24	0.98	0.001				29.05
С две вторични серии, с магнитуден праг $M_a=2$	100	0.96	1.00	0.02	0.22	1.00	0.001	0.09	1.00	0.001	19.30

От получените оценки за параметрите K , p , c и стойности на AIC представени в Табл. 1, както и от разпределенията, на фигурите може да се направят следните заключения: 1) оценките и на трите параметъра се влияят от долния магнитуден праг M_a ; 2) получените оценки на параметъра p са над 0.9 (за период от $T=100$ дни), което е характерно за районите на Южна България, където се предполага, че афтершоковия процес затихва значително по-бързо; 3) от честотно разпределение на афтершоковите събития може да се каже, че в първо приближение затихването на афтершоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Omori; 4) наблюдава се преминаване от афтершокова активност към фонова сеизмичност около 84 дни след главното събитие кумулативният брой на събитията бързо се увеличава и показва значително отклонение от началния тренд; 5) най-добрият модел за времето разпределение на афтершоковата поредица е моделът с две вторични серии и за трите разгледани случая.

Заклучение

- В първо приближение затихването на афтершоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Omori;
- Оценките на параметъра p ($0.93 \leq p \leq 1.11$), характеризиращ затихването на афтершоковата активност във времето, са около средата на интервала от стойности ($p \in [0.71; 1.17]$), получени за афтершокови поредици след силни земетресения, реализирани на територията на България (Simeonova, Solakov, 1999);
- За разгледаната афтершокова поредица е установена мултиполна активност с две вторични серии (това потвърждава резултати от изследвания върху афтершоковата активност в Южна България, представени напр. в Simeonova, Solakov, 1999);
- Най-добрият модел за времето разпределение на афтершоковата поредица е моделът с две вторични серии (най-ниски стойности на AIC) за трите разгледани случая – без магнитуден праг, с $M_a=1.0$ и $M_a=2.0$

Литература

- Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification, *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-19, 716-723.
- Ansari, S., 2017. Aftershocks properties of the 2013 Shonbe Mw 6.3 earthquake, central Zagros, Iran, *J. Asian Earth Sci.*, 147, pp. 17-27, 10.1016/j.jseaes.2017.07.042
- Bayrak, Y., S. Öztürk, 2004. Spatial and temporal variations of the aftershock sequences of the 1999 Izmit and Düzce earthquakes, *Earth Planets Space*, 56, pp. 933-944, 10.1186/BF03351791
- Dieterich, J., 1978. Time dependent friction and the mechanics of strike-slip. *Pure Apply Geophys.*, 116, 790-806.
- Enescu, B., D. Enescu, K. Ito, 2011. Values of b and p: their variations and relation to physical processes for Earthquakes in Japan and Romania, *Rom. J. Phys.*, 56 (3-4), pp. 590-608.
- Enescu, B., K. Ito, 2002. Spatial analysis of the frequency-magnitude distribution and decay rate of aftershock activity of the 2000 Western Tottori earthquake *Earth Planets Space*, 54, pp. 847-859, 10.1186/BF03352077
- Gardner, J. K., L. Knopoff, 1974. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, 1363-1367.
- Kato, A., and T. Igarashi, 2012. Regional extent of the large coseismic slip zone of the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake delineated by on-fault aftershocks, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L15301, doi:10.1029/2012GL052220
- Mikumo, T. and T. Miyatake, 1979. Earthquake sequences on a frictional fault model with non-uniform strengths and relaxation times, *Geophys. J.*, 59, 497-522.
- Ogata, Y., 1983. Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure, *J. Phys. Earth*, 31, 115-124.
- Omori, F., 1894a. On after-shocks, *Rep. Imp. Earthq. Inv. Corn.*, 2, 103-138, (in Japanese).
- Omori, F., 1894b. On after-shocks of earthquakes, *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 7, 111-200.
- Polat, O., H. Eyidogan, H. Haessler, A. Cisternas, H. Philip, 2002. Analysis and interpretation of the aftershock sequence of the August 17, 1999, Izmit (Turkey) earthquake *J. Seismolog.*, 6, pp. 287-306.
- Simeonova S., D. Solakov, 1999. Temporal characteristics of some aftershock sequences in Bulgaria. *Annali di Geofisica*, 42, 5, 821-832.
- Toda, S., Stein, R. S., Reasenber, P. A., Dieterich, J. H., Yoshida, A., 1998. Stress transferred by the 1995 Mw =6.9 Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 103, 24543-24565.
- Utsu, T., 1957. Magnitudes of earthquakes and occurrence of their aftershocks, *Zisin, Ser. 2*, 10, 35-45, (in Japanese).
- Utsu, T., 1961. A statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophys. Mag.*, 30, 521-605.
- Utsu, T., 1969. Aftershocks and earthquake statistics (I)-Some parameters which characterize an aftershock sequence and their interrelation, *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ.*, Ser. VII, 2, 129-195.
- Utsu, T., Y. Ogata, R.S. Matsuura, 1995. The centenary of the Omori formula for the decay law of aftershock activity *J. Phys. Earth*, 43, pp. 1-33.
- Wiemer, S., K. Katsumata, 1999. Spatial variability of seismicity parameters in aftershocks zones. *J. Geophys Res.*, 104 (13), pp. 13, 135-13, 151.
- Wiemer, S., Wyss, M., 2000. Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 859-869.
- Отчет ГФИ, 2008. 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 hazard върху територията на страната, Част II, стр. 150.

Солаков Д., 2010. Математико статистически методи и изследвания в сеизмологичната практика, автореферат, С. стр. 55.

Христосков, Л., Р. Лазаров, 1981. Основни съображения върху представителността на сеизмичните каталози с оглед на сеизмостатистическите оценки. БГС, VII, 3, 58-72.

Temporal distribution of aftershock activity after the February 2018 earthquake occurred in the area of the city of Asenovgrad, Maritsa seismogenic zone

P. Raykova, S. Simeonova, D. Solakov

Abstract: The statistical analysis is applied to study the temporal distribution of the aftershock activity observed after the earthquake of February 21, 2018 with moment magnitude $M_w 4.7$, realized in the area of the city of Asenovgrad, Maritsa seismogenic zone. Based on the assumption that the aftershocks are distributed in time as a non-stationary Poisson process, the modified Omori formula is used to estimate the parameters (K , c and p). The transformation of the time scale t to a frequency-linearized scale τ is applied to determine the best relationship between the aftershock activity and various statistical models. The decay of the aftershock activity is well described by the modified Omori formula, and a multipole activity with two secondary series is observed.