

ОЦЕНКА НА ПАРАМЕТРИТЕ НА АФТЪРШОКОВ СЕИЗМИЧЕН РЕЖИМ НА ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ С МАГНИТУД $M_w > 6$ В ПРОСТРАНСТВЕН ПРОЗОРЕЦ $18^\circ - 30^\circ$ E/ $34^\circ - 42^\circ$ N

М. Попова

Национален институт по Геофизика, Геодезия и География, Българска Академия на Науките,
ул. „Акад. Георги Бончев“, бл. 3, София, България, e-mail: m.popova022@gmail.com

DOI: 10.34975/bgj-2022.45.8

Абстракт. Афтершоковата активност е израз на вискозоеластична релаксация на напреженията в средата, натрупани като резултат от процесите на разрушение в огнищната зона на главното земетресение. Изследване на разпределението на вторичните събития е от съществено значение за разбиране физиката на сеизмогенезиса. В настоящото изследване е представено поведението във времето и пространството на вторични трусове след осем земетресения в периода 1995-2020 г. с магнитуд $M_w > 5.9$ в пространствен прозорец $18^\circ - 30^\circ$ E/ $34^\circ - 42^\circ$ N. Приложени са модифицираният закон на Omori и законът на Gutenberg- Richter. Определен е параметърът, характеризиращ затихването на афтершоковата активност $-p$, както и константите c и K използвайки ZMAP в среда MatLab. Тези параметри са полезни за оценка поведението на вторичните трусове във времето. Скоростта на затихване на вторичните събития дава представа за процесите на освобождаване на напреженията след основното земетресение. В резултат на анализа е показано, че параметрите на серия вторични трусове зависят, както от магнитуда, така и от сеизмотектонската обстановка и състоянието на околната среда.

Ключови думи: силни земетресения, каталог, параметри на затихване

Въведение

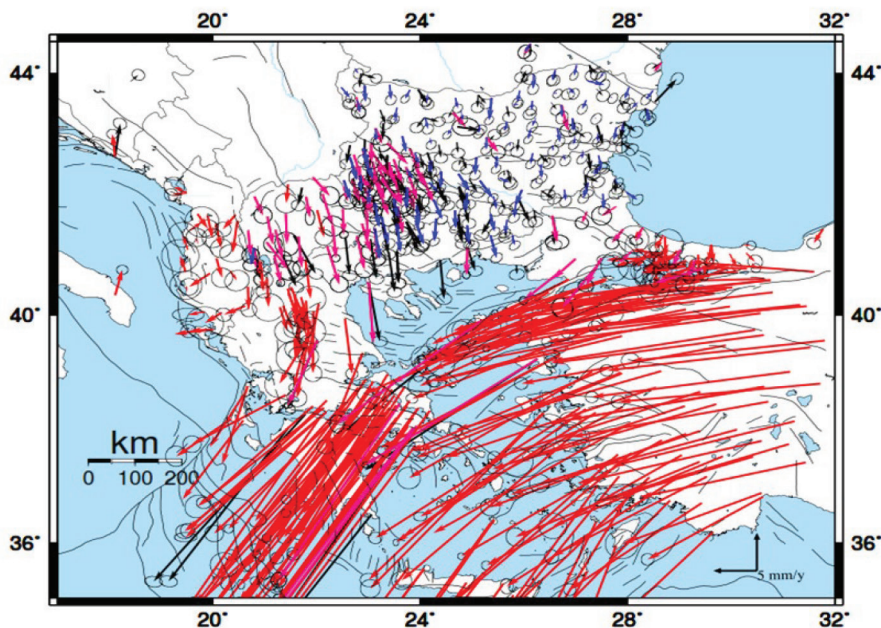
Афтершоковата активност е поредица от събития, възникването на които се наблюдава, когато от околната среда се освобождава натрупаната във времето енергия, и продължава до момента, в който броят на събитията за единица време е равен на дългосрочния сеизмичен фон. Въпреки че, понякога се наблюдава статистическа

променливост в количествените показатели на вторичния земетръсен процес, тяхното описание удовлетворява три емпирични зависимости с разумно добро приближение: закона за повторяемостта на Гутенберг-Рихтер (Gutenberg, Richter, 1944), законът на Bath (Bath M., 1965), който предполага, че разликата в магнитуда между главния трус и „най-големия“ очакван вторичен трус е постоянна. За разлика от повечето от физичните процеси в природата, които затихват експоненциално във времето, афтершоковият процес затихва по обратен степенен закон – феноменална негова характеристика, представена чрез третият закон - закона на Омори (Omori, F., 1894b), стандартната форма на модифицирания закон на Омори, направена от Utsu (Utsu T., 1962). Спадът в активността започва по-късно, колкото по-високо е нивото на напрежение в земната кора.

В настоящата статия е изследвано пространствено-времето разпределение на последователностите от вторични трусове на осем земетресения в периода 1995-2020 г. с магнитуд по сеизмичен момент $M_w \geq 5.9$ в пространствен прозорец 18–30 E/34–42 N. Изследване на пространствено-времето разпределение на сеизмичността на територията на Балканите и връзката с параметрите на други геофизични полета е представено в статиите на (Ounakov et al 2020; Raykova et al, 2019; Chamati, 2023).

Изследваните земетресенията попадат в една от най-динамичната част от Алпо–Хималайският сеизмичен пояс. Тектониката на Средиземно море, в конвергентния граничен регион между Африка и Евразия, е сложна и включва движенията на множество микроплочи и структури от регионален мащаб. Анализът на полето на получените съвременни движения и напрежения на земната кора се разглежда в контекста на активните тектонски процеси, протичащи в района на Източното Средиземноморие. Информацията за съвременните движения на земната кора е от важно значение за верификация на хипотезите за съвременните геодинамични процеси, протичащи в България и на Балканския полуостров (Solakov et.al, 2019). На фигурата се очертават двете ротационни движения в района на Източното Средиземноморие – обратно на часовниковата стрелка на Анадолската и Егейската микроплоча, и по посока на часовниковата стрелка на територията на Източна Албания, Македония и Западна България с увеличаващи се по абсолютна стойност скорости в посока север-юг и северозапад.

Потвърждава се наличието на транзитна зона между Евроазитската континентална плоча и Егейската микроплоча на територията на България – Южнобалкански екстензионен район с преобладаваща екстензия с посока С-Ю. Хоризонталните скорости южно от паралела 43° нарастват на юг, от ~1.5-2 mm/y в района на Софийския грабен до ~10-11 mm/y в Северноегейския регион и достигат ~30 mm/y при Коринтския залив (Solakov et. al., 2019). Полето на хоризонталните скорости показва, че Западните Балкани, включително Албанидите, са подложени на ротация по посока на часовниковата стрелка около полюс в Северна Албания (Скутари). Източна Албания, Македония и Западна България са обект на значителни деформации – от екстензия E-W в Източна Албания до екстензия N-S в Македония, Западна България и Северна Гърция (Solakov et. al., 2019). Цялата област има значително, увеличаващо се на юг движение спрямо Евразия (Solakov et. al., 2019).

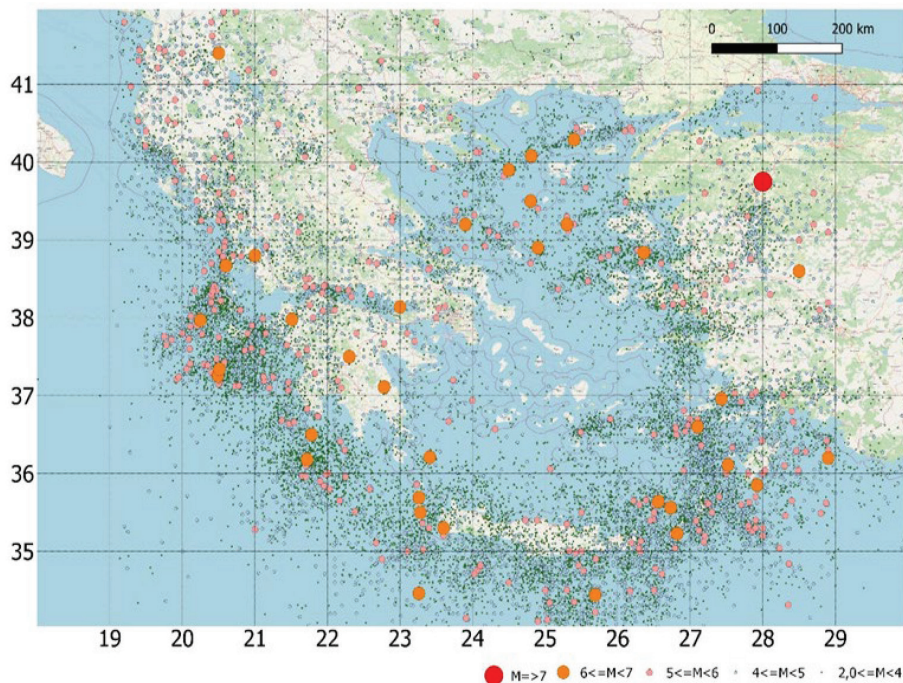


Фиг. 1. Съвременните геодинамични процеси (Solakov et al., 2019)

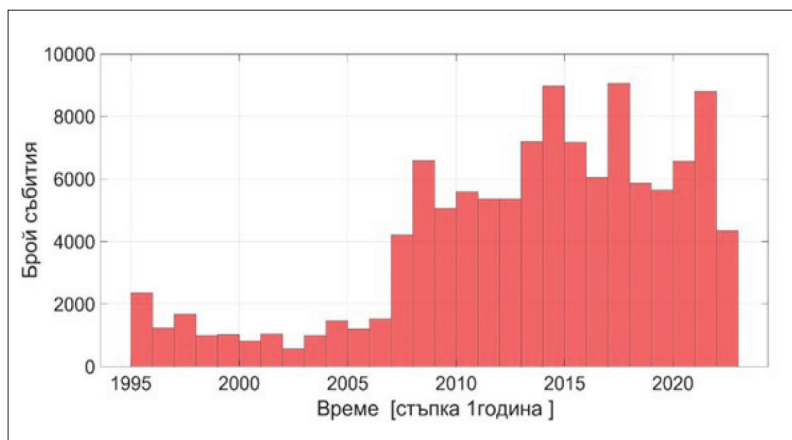
Данни

В изследването е използван регионалният каталог на земетресенията на Атинския Университет (University of Athens- <http://www.geophysics.geol.uoa.gr>) за периода 1905.01.01 - 2009.12.31 (Makropoulos, et al., 2012), добавени са събития от 2010 до 2022 г. от същия източник, както и непрекъснато обновяващ се каталог за период 1905-2022.12.31 г., на Turkish Bogazici University KOERI (<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/earthquake-catalog/>). Взривове и дублиращите се събития са разпознати и отстранени алгоритмично с използване на софтуерния пакет – ZMAP, и по-късно проверени чрез визуална оценка. Афтьршоковите последователности са идентифицирани чрез алгоритъма на Gardner, J. K. и L. Knopoff (1974). В резултат за изследвания период извадката от събития се състои от 116 739 земетресения с магнитуд в интервала $2.0 \leq M_w < 7.0$ (фиг. 2) и с дълбочини $1.0 \leq h \leq 252$ km.

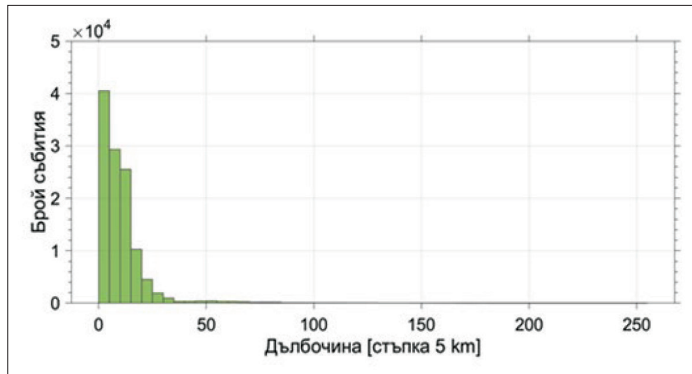
Количественото описание на сеизмичния режим включва сравнителен анализ на сеизмичността в различни райони и различни времеви интервали. На фигури (3-5) са представени някои от статистическите характеристики на каталога: събитията са неравномерно разпределени във времето (фиг. 3); хипоцентрите на близо 90% от събития са разположени на дълбочина 1–20 km (фиг. 4); основната част от каталога се състои от слаби събития с $M_w = 2.0-3.5$ (фиг. 5).



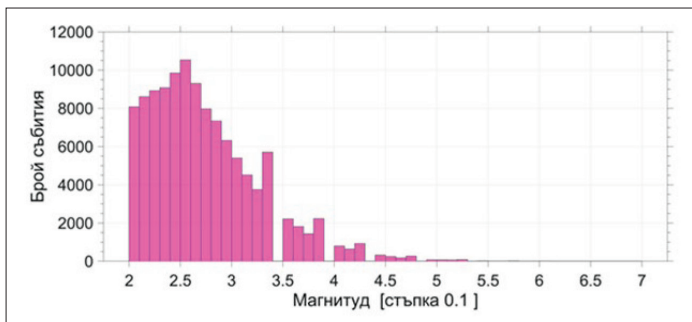
Фиг. 2. Разпределение на епицентрите на земетресенията реализирани в пространствен прозорец 18° – 30° E/ 34° – 42° N. за периода 1905-2022 г.



Фиг. 3. Времево разпределение на земетресенията реализирани за периода 1995-2022 г. в пространствен прозорец 18° – 30° E/ 34° – 42° N.



Фиг. 4. Дълбочинно-честотно разпределение на земетресенията.



Фиг. 5. Брой събития спрямо магнитудна оценка.

Метод

Разпознаване на едно земетресение като афтершок или главно събитие е възможно само след реализацията на цяла земетръсна серия. За идентифициране на вторичните трусове реализирани във времето след основно събитие в това изследване, се използват критериите дефинирани от Gardner, J. K. and L. Knopoff (1974). Съгласно тази дефиниция 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 афтершок на първото ако са изпълнени следните условия:

$$\begin{aligned} M_a &< M_m \\ 0 &< t_a - t_m < T(M_m) \\ 0 &\leq R_{am} < R(M_m), \end{aligned} \quad (1)$$

където t е време на възникване, R_{am} е разстоянието между хипоцентрите (епицентрите) на главното събитие и съответния афтершок, а $T(M_m)$ и $R(M_m)$ са емпирични

функции на магнитуда на главното земетресение. Граничните стойности на тези функции, съответно $T_a(M_m)$ и $R_a(M_m)$, са определени по модификация на функционалните зависимости на Gardner, J. K. and L. Knopoff (1974), получена за централни Балкани от Христосков, Лазаров (1981). Изследванията на Христосков и Лазаров (1981) показват, че размерите на пространствено-времевите области на афтершоковите поредици в средната част на Балкански полуостров значително превишават граничните измерения, определени от Gardner, J. K. and L. Knopoff (1974). Предложената от авторите модификация съответства на сеизмо-тектонските условия, определящи сеизмичния процес в централни Балкани. В настоящото изследване за дефиниране границите на афтершоковите серии в пространството и времето, като първо приближение, са приложени следните уравнения (съгласно Христосков, Лазаров, 1981):

$$\begin{aligned} \log R_a(M_m) &= 0.9696 + 0.1243 M_m \\ \log T_a(M_m) &= -0.62 + 0.56 M_m \quad (M_m < 6.0) \\ \log T_a(M_m) &= -5.25 + 2.15 M_m - 0.137 M_m^2 \quad (M_m^3 \geq 6.0), \end{aligned} \quad (2)$$

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

За оценка на параметрите на разпределенията на афтершоковите събития във времето е използван програмен пакет Zmap в среда MatLab. Много изследователи са анализирали различни каталози на земетресения с помощта на този софтуер (Wiemer 2001; Оунаков, et al, 2020).

За всяко събитие са изчислени параметрите p , c , K от модифицираната формула на Omori (Utsu, 1961, 1969):

$$n(t) = K(t + c)^{-p}, \quad (3)$$

където p е параметър характеризиращ затихването на афтершоковата активност във времето; $n(t)$ честота на събитията за единица време t ; K и c константи, а b стойността от релацията на Гутенберг-Рихтер.

За формална идентификация на афтершоковете също е използван закона на Bath., съгласно който, разликите в магнитудите ΔM между основното събитие M_{ms} и неговия най-силен афтершок с магнитуд M_{as-max} :

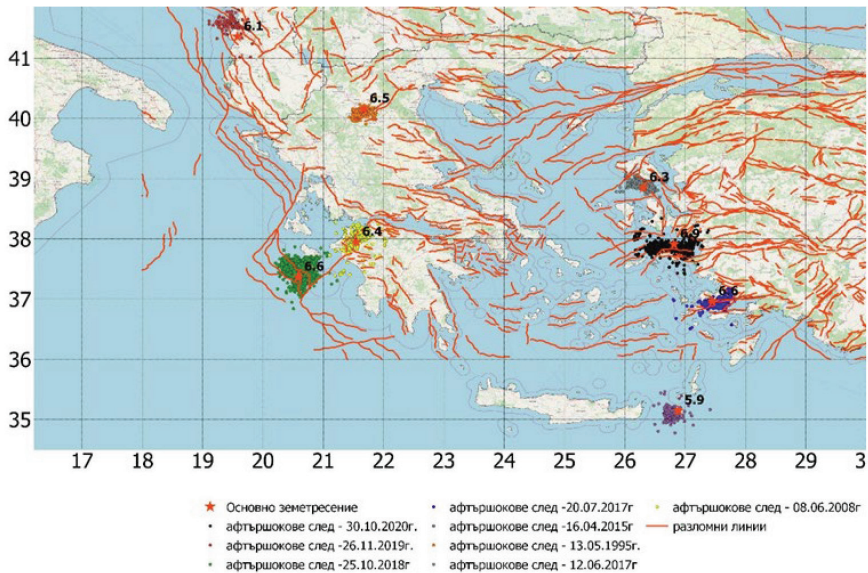
$$\Delta M = M_{ms} - M_{as-max}, \quad (4)$$

е константа $\Delta M = 1,16 \pm 0,46$ (Shcherbakov R., Turcotte D. L., 2004).

Резултати

Пространственото разпределение на епицентрите на основните земетресения и определените за тях афтершокови поредици е представено на фиг. 6. Изображенията на картата активни разломи в разглежданата територия са по данни от GEM

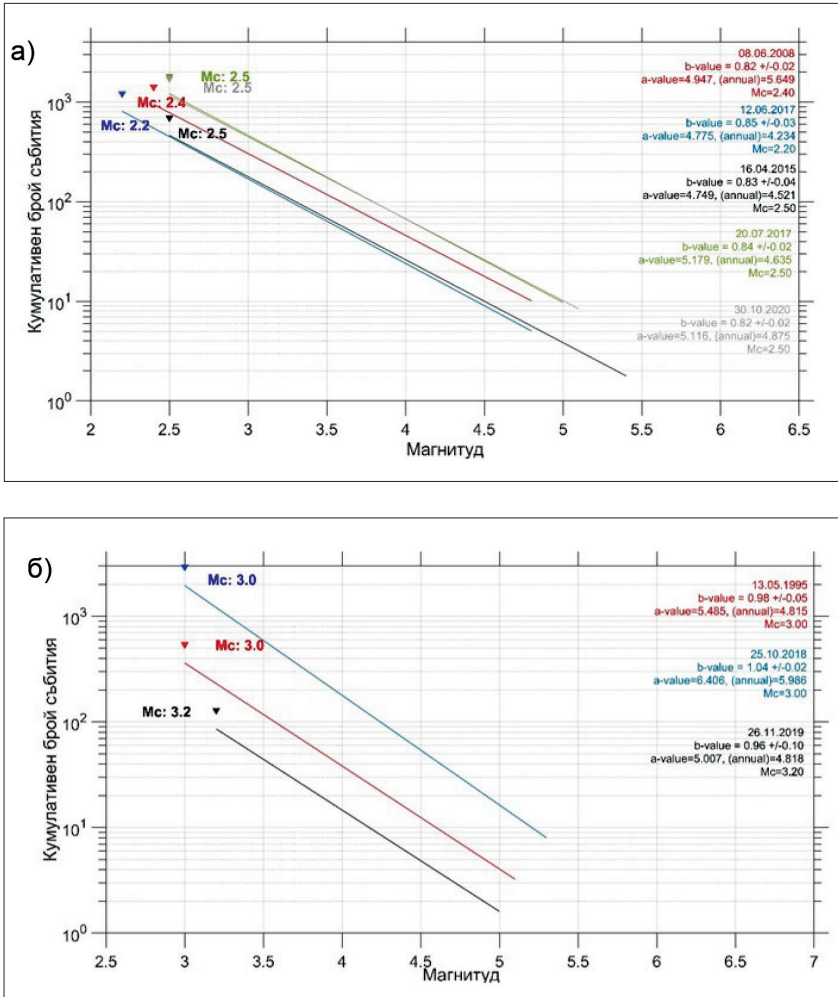
Global Active Faults (<https://github.com/GEMScienceTools/gem-global-active-faults>). Според пространственото разпределение на епицентрите на събитията може да разделим 8-те основни групи от земетресения на две групи: 1-ва група - епицентрите на афтьршоковите събития са разположени в определено направление от епицентъра на основното събитие (26.11.2019-SW; 13.05.1995-S; 16.04.2015-SW; 20.07.2017-NE) и 2-ра група с приблизително елипсовидно и концентрично пространствено разпределение.



Фиг. 6. Пространствено разпределение на епицентрите на основните и афтьршокови събития.

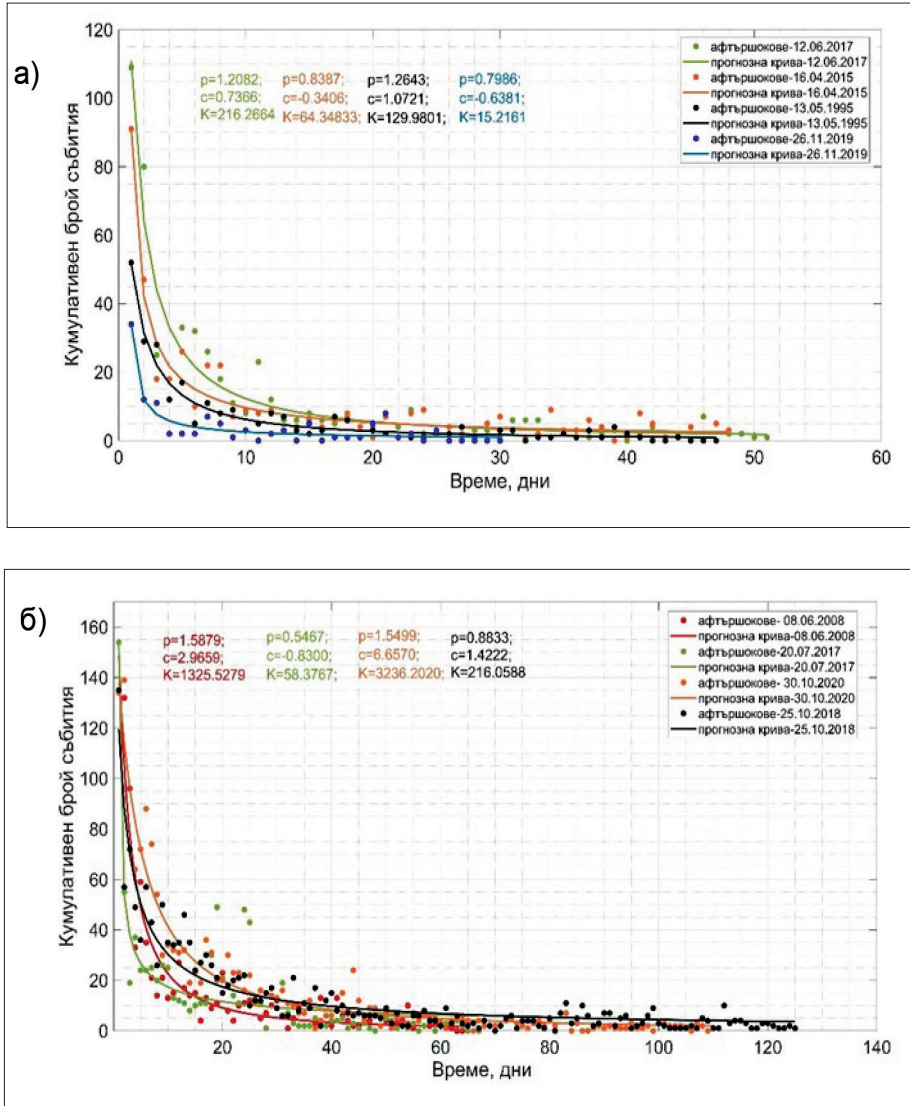
За всяко земетресение са оценени отделно параметрите характеризиращи афтьршоковия процес, продължителността на афтьршоковата поредица, разликата в магнитудите на основния трус и най-силния вторичен трус, както и общия брой идентифицирани вторични трусове. Анализът на получените данни показва, че различните основни земетресения се проявяват по напълно различни начини в своята вторична (афтьршокова) активност.

Фигура 7 представя магнитудно - честотно разпределение, за определяне пълнотата на събитията, разположени в избраната област на различните поредици. Разпределението показва, че компилираният набор от данни за 5 от поредиците е непълен под $M_c=2.2$ (фиг. 7а), за останалите 3 земетресения праговият магнитуд е $M_c=3.0$ (фиг. 7б). Стойностите на параметрите a и b от закона на Гутенберг-Рихтер за различните серии варират от $4.749 \leq a \leq 6.406$ и съответно за параметъра b стойностите варират в интервала $0.82 \leq b \leq 0.85$ за 5 от събитията (фиг. 7а) и в диапазона $0.96 \leq b \leq 1.04$ за три от земетресенията с по -висок магнитуден праг (фиг. 7 б).



Фиг. 7. Магнитудно-честотно разпределение на изследваните афтершокови серии след земетресенията на: а) 08.06.2008, 12.06.2017, 16.04.2015, 20.07.2017, 30.10.2020 б) на 13.05.1995, 25.10.2018, 26.11.2019.

Стойностите на параметрите на модифицираната формула на Омори p , c и K са предствени в таблица 1 и на фигура 8. Стойностите на параметрите се променят в интервалите: $0.55 \leq p \leq 1.59$, $0.83 \leq c \leq 6.66$, за $58,38 \leq K \leq 3236,2$ за земетресенията от фиг. 8 а) и $0.8 \leq p \leq 1.26$, $0.34 \leq c \leq 1.07$, $15.2 \leq K \leq 216.3$, за земетресенията от фиг. 8 б). Може да се направи заключение, че за поредиците предствени на фиг. 8 б), стойности на параметрите от модифицираната формула на Омори съответстват на получените от други автори (Utsu et al., 1995; Kagan, 1987, 2004).



Фиг. 8. Зависимост на кумулативния брой вторични събития и изчислените p , c , и K - стойности след земетресенията: а) на 08.06.2008, 20.07.2017, 30.10.2020, 25.10.2018 б) на 12.06.2017, 16.04.2015, 13.05.1995, 26.11.2019.

Получените стойности за константата ΔM от закона на Bath (табл. 1) варират в диапазона $0.8 \leq \Delta M \leq 1,6$ което съответства на получената от (Shcherbakov R., Turcotte D. L., 2004) стойност $\Delta M = 1,16 \pm 0,46$.

Табл. 1. Оценки на параметрите K , p , c , b -стойностите и ΔM (закона на Bath) за различните поредици.

Data, time	Mw	Lat./Long. degree	Depth, km	b	Number of events	p	c	k	ΔM , Bath law
13.05.1995 08:47	6.5	21.70/40.15	12	0.98	257	1.26	1.07	129.9	1.1
08.06.2008 12:25	6.4	21.52/37.97	20	0.82	944	1.59	2.97	1325.5	1.5
16.04.2015 18:07	5.9	26.80/35.23	20	0.83	427	0.84	0.34	64.35	0.8
12.06.2017 12:28	6.3	26.37/38.86	13	0.85	530	1.21	0.74	216.27	1.5
20.07.2017 22:31	6.6	27.44/36.99	11	0.84	878	0.6	0.83	58.38	1.2
25.10.2018 22:54	6.6	20.50/37.36	20	1.04	1459	0.88	1.42	216.1	1.2
26.11.2019 02:54	6.1	19.58/41.36	7	0.96	111	0.80	0.64	15.21	1.2
30.10.2020 11:51	6.9	26.80/37.92	13	0.82	1543	1.55	6.66	3236	1.6

Заклучение

В заключение от анализ на получените резултати за осемте земетресения в рамките на избрания пространствен прозорец обхващащ времеви период от 1995 г. до 2022 г., може да се отбележи че:

- пространствената картина на афгършоковата активност показва, че главно-то земетресение и последвалите го афгършокови събития се групират по разломни структури и при разгледаните 8 поредици се обособяват две групи: 1-ва група - епицентрите на афгършоковите събития са разположени в определено направление от епицентъра на основното събитие (26.11.2019-SW; 13.05.1995-S; 16.04.2015-SW; 20.07.2017-NE) и 2-ра група с приблизително елипсовидно и концентрично пространствено разпределение
- чрез моделиране на афгършоковия процес във времето се оформя следната картина включваща информация за промяната на параметрите от закона на Omori, които са в интервалите: $0.6 \leq p \leq 1.59$ и $0.34 \leq c \leq 6.66$. Като за поредиците след земетресенията - на 12.06.2017, 16.04.2015, 13.05.1995, 26.11.2019 стойности на параметрите от модифицираната формула на Omori съответстват на получените от други автори (Utsu et al., 1995; Kagan, 1987, 2004).

Литература

- Båth, M. (1965). Lateral inhomogeneities of the upper mantle. *Tectonophysics*, 2(6), 483-514.
- Chamati M. Disturbances in the geomagnetic field recorded on February 6, 2023. Proceedings of XI Conference of the Society of Geophysicists in Bulgaria, (2023)0.
- Christoskov, L., and R. Lazarov, 1981. General considerations on the representativeness of the seismological catalogues with a view to the seismostatistic investigations, *Bulg. Geoph. J.*, 3, 58-72 (in Bulgarian).
- Gardner, J. K. and L. Knopoff (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, 1363-1367.
- Gutenberg, Beno, and Charles F. Richter. "Frequency of earthquakes in California." *Bulletin of the Seismological society of America* 34.4 (1944): 185-188.
- Kassaras, Ioannis, et al. "The new seismotectonic atlas of Greece (v1. 0) and its implementation." *Geosciences* 10.11 (2020): 447.
- Kagan, Y. Y., & Knopoff, L. (1987). Random stress and earthquake statistics: time dependence. *Geophysical Journal International*, 88(3), 723-731.
- Kagan, Y. Y. (2004). Short-term properties of earthquake catalogs and models of earthquake source. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94(4), 1207-1228.
- Makropoulos, K., Kaviris, G. and Kouskouna, V., 2012. An updated and extended earthquake catalogue for Greece and adjacent areas since 1900. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 1425-1430.
- Omori, F. (1894b). On after-shocks earthquakes. *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 7, 111-200.
- Oynakov, Emil, et al. "Spatial Variation of Precursory Seismic Quiescence Observed Before Earthquake from 01.04. 2010 in the Region of Crete." *International conference on Environmental protection and disaster RISks*. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- Raykova, P., D. Solakov, and S. Simeonova. "A statistical study of the M W 5.3 Valandovo (northern Macedonia) earthquake seismic sequence." *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 60.3 (2019).
- Reasenberg, P. (1985). Second order moment of central California seismicity, 1969–1982. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B7), 5479-5495.
- Shcherbakov, R., Turcotte, D. L., & Rundle, J. B. (2004). A generalized Omori's law for earthquake aftershock decay. *Geophysical research letters*, 31(11).
- Solakov, D.; Simeonova, S.; Trifonova, P.; Georgiev, I.; Raykova, P.; Metodiev, M.; Aleksandrova, I. Building Seismic Risk Management. Part 2: Regional seismotectonic model and model of seismic sources. Publisher: Prof Marin Drinov Publishing House of BAS, Sofia, Bulgaria, 2019, 21-45 (in Bulgarian)
- Utsu, T. (1962). *On the time interval between two consecutive earthquakes* (Vol. 4). US Government Printing Office.
- Utsu, T. (1961). A statistical study on occurrence of aftershocks. *Geoph. Mag.*, 30, 521-605
- Utsu, T., & Okada, H. (1969). Anomalies in seismic wave velocity and attenuation associated with a deep earthquake zone (2). *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University. Series 7, Geophysics*, 3(2), 65-84.
- Utsu T., Ogata Y. and Matsu'ura R.; (1995): The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *J. Phys. Earth*, 43, 1-33.
- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373-382.

Assessment of Aftershock Seismic Regime Parameters for Earthquakes with Magnitude $M_w > 6$ in the Spatial Window $18^\circ\text{--}30^\circ\text{ E} / 34^\circ\text{--}42^\circ\text{ N}$

M. Popova

Abstract. Aftershock activity reflects the viscoelastic relaxation of stress in the Earth's crust, which accumulates as a result of the rupture processes within the focal zone of the main earthquake. The study of the distribution of secondary events is crucial for understanding the physics of seismogenesis. This research presents the temporal and spatial behavior of aftershocks following eight earthquakes between 1995 and 2020 with magnitudes $M_w > 5.9$ in the spatial window $18^\circ\text{--}30^\circ\text{ E} / 34^\circ\text{--}42^\circ\text{ N}$. The modified Omori law and the Gutenberg-Richter law are applied. Parameters characterizing the decay of aftershock activity, such as the parameter p and constants c and K , are determined using ZMAP in the MATLAB environment. These parameters are valuable for assessing the temporal behavior of aftershocks. The decay rate of aftershock events provides insights into the stress release processes following the main earthquake. The analysis demonstrates that the parameters of aftershock sequences depend on both the magnitude of the main event and the seismotectonic environment, as well as the conditions of the surrounding medium.

Keywords: strong earthquakes, catalog, decay parameters