

ПРОСТРАНСТВЕНО-ВРЕМЕВО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ
НА АФТЪРШОКОВА ПОРЕДИЦА
СЛЕД ЗЕМЕТРЕСЕНИЕТО ОТ 2002 Г. В РАЙОНА
НА СЕЛО КРУМОВО, ОБЛАСТ ПЛОВДИВ

*Пламена Райкова*¹

<https://doi.org/10.35101/prg-2021.1.3>

Наличието на сеизмични клъстери оказва съществено влияние при изследване на сеизмичния режим в дадена област. В настоящата разработка е анализирано пространствено-времето разпределение на събитията от афтершоковата поредица (сеизмичния клъстер) след земетресението от м. април 2002 г. с M_w 4.6, генерирано в района на с. Крумово, област Пловдив, сеизмогенна зона Марица. Афтершоковата активност, наблюдавана след земетресението, е изследвана за два различни времеви интервала. За сравнение на моделите за разпределение на афтершоковите събития във времето е приложен информационният критерий на Akaike. Затихването на афтершоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Omori и е установена мултиполна активност с две вторични серии.

Ключови думи: пространствено-времево разпределение, афтершок, сеизмогенна зона Марица

SPACE-TEMPORAL DISTRIBUTION OF THE 2002 KRUMOVO
EARTHQUAKE AFTERSHOCK SEQUENCE

Plamena Raykova

Abstract: The presence of seismic clusters has a significant impact on the study of the seismic regime in each area. In the present study the space-temporal distribution of the aftershock sequence observed after the earthquake on April 2002, with M_w 4.6. in the village of Krumovo, city of Plovdiv, Maritsa seismogenic zone is analyzed. The spatial and temporal clustering of aftershocks is a dominant non-random element of the seismicity, so when the

¹ Секция Сеизмология, Национален институт по геофизика, геодезия и география – Българска академия на науките; plamena.raikova@gmail.com

clusters are removed, the remaining activity can be modelled as a Poisson process. Space distribution of earthquakes described that the main shock and aftershock activity are clustering almost perpendicular to a defined structure. The properties of aftershock sequences allow time-dependent prediction of aftershock probabilities. On the assumption that aftershocks are distributed in time as a non-stationary Poisson process it use the maximum likelihood method for estimating the parameters (K , c and p) of the modified Omori formula. For testing the goodness of fit between the aftershock occurrence and different statistical models a transformation from the time scale t to a frequency-linearized time scale t is applied. The aftershock activity observed after the earthquake is studied for two different time intervals. There is a relatively good correlation between the theoretical and the observed distribution for both analyzed cases. Akaike's information criteria is applied to compare models for the distribution of aftershock activity in time. The attenuation of aftershock activity is well described by the modified Omori formula and multipole activity with two secondary series was established. About 378 days after the main shock the cumulative number of aftershocks increases rapidly with t , showing a significant deviation from the prior trend. No large earthquake occurred in the region at that time. Therefore, this change in slope could be treated as a transition from aftershock activity to background seismicity.

Keywords: space-time distribution, aftershocks, Maritsa seismogenic zone

ВЪВЕДЕНИЕ

Земетресенията са неравномерно разпределени в пространството и времето. Определянето на тези разпределения е една от основните задачи, третиращи в теоретичните и приложните изследвания. В сеизмологичния анализ Поасоновият процес се използва за описание разпределението на земетресенията във времето. С него добре се описват сеизмологичните данни, но основният му недостатък като модел на сеизмичния процес е, че не отчита възможността земетресенията да се генерират в групи. Пример за такива групи са форшоците, афгършоковите поредици и роевият тип сеизмичност. Трябва да се отбележи, че афгършоковите събития са значителна част от реализираните земетресения и е необходимо техният ефект да бъде отразен при моделирането на сеизмичния процес.

Афгършоковата 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 пространственото разпределение на афгършоковите събития е от съществено значение за разбиране физиката на сеизмогенезиса. Пространственото групиране на вторичните трусове е доминираща неслучайна компонента на сеизмичността.

За разлика от повечето от физичните процеси в природата, които затихват експоненциално във времето, афгършоковият процес затихва по обратен степенен закон – феноменална негова характеристика, представена чрез модифицираната формула на Omori (Utsu, 1957, 1961, 1969):

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

където: p е параметър, характеризиращ затихването на афгършоковата активност във времето, а K и c са константи.

Модифицираната формула на Omori е един от малкото емпирично установени закони в сеизмологията с основен параметър p , характеризиращ затихването на афтершоковата активност във времето. Параметърът зависи както и от физичните свойства на средата, например от нейната хетерогенност, така и от разпределението на напреженията в нея. Параметърът p 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 пространствено-времето разпределение на афтершоковата поредица след земетресението от 05 април 2002 г. с магнитуд по сеизмичен момент M_w 4.6, реализирано в района на с. Крумово, област Пловдив, сеизмогенна зона Марица ($T_0=13:13:58$, $\phi=42.05$, $\lambda=24.83$ и $h=11$ km).

През изминалия век в сеизмогенна зона Марица са реализирани няколко силни земетресения. Зоната е разположена в централната част на Южна България. Сеизмичността в нея е свързана с добре известната Маришка разломна система с дълго геоложко развитие, което продължава и през неогена, и кватернера. Най-силните известни земетресения, реализирани в сеизмогенна зона Марица, са тези през 1928 г. (Чирпанското земетресение от 14 април 1928 г. с M_w 6.8 и Пловдивското земетресение от 18 април 1928 г. с M_w 7.0, $I=9-10$ MSK). Те унищожават напълно 74 000 сгради в градовете Пловдив, Чирпан и Първомай (Киров, 1945) и в резултат от тях се образуват две повърхностни пукнатини, всяка с дължина от няколко десетки километра (Янков, 1935).

За оценка на времето разпределение на събитията от афтершоковата поредицата от 2002 г. е приложена модифицираната формула на Omori. Сравнени са различни модели за разпределение на афтершоковата активност във времето чрез информационния критерий на Akaike, AIC (Akaike, 1974, 1977).

МЕТОД И ВХОДНИ ДАННИ

МЕТОД

Японският сеизмолог Ogata (1983) предлага използването на метода на максимално правдоподобие (ММП) за оценка на параметрите на модифицираната формула на Omori. За прилагане на ММП Ogata (1983) предполага, че развитието на афтершоковата активност във времето е нестационарен Поасонов процес с интензивностна функция $l(t; q)$, $q=(K, p, c)$, определена по релацията:

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

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 $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ (като

$t_i, i=1, 2, \dots, k$ са времената на поява на афършоковите събития), се дава чрез уравнението:

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

Оценките по максимално правдоподобие за параметрите θ (векторът на параметрите) се получават от максимизиране на функцията на максимално правдоподобие. За серия без вторични афършокови поредици интензивностната функция се определя чрез модифицираната формула на Omori:

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

Мултиполни серии (с изявена вторична афършокова активност) се моделират чрез интензивностна функция 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 – броят на вторичните поредици, $H(t)$ – единична функция на Хевисайд, и T_i – началото на i -тата вторична афършокова 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 θ , афършоковият процес се трансформира в стандартен Пуасонов процес ($\lambda=1$) по честотно-линеаризираната времева ос τ , която за афършокова поредица се дефинира като:

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

Времевата ос τ се използва за установяване на отклонения в сеизмичната активност от теоретичния тренд $N(\tau)$, където $N(\tau)$ е кумулативният брой събития до момента τ . Увеличение на активността в сравнение с теоретично очакваната се разглежда или като изява на вторична афършокова серия, или като преминаване към фонова сеизмичност.

За сравняване на модели за разпределение на афършоковата активност във времето е приложен информационният критерий на Akaike (AIC) (Akaike, 1974, 1977). Това е един от най-мощните критерии за тестване на различни модели, основаващи се на едни и същи данни. AIC се дефинира с уравнението:

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

където: \ln – натурален логаритъм, Lh – съответната функция на правдоподобие, n – броят на оценяваните параметри. Този критерий отчита съответстви-

ето между данните от наблюденията и заложения теоретичен модел. Модел с по-малка стойност на АІС се счита за по-добре описващ наблюденията.

ВХОДНИ ДАННИ

В настоящата работа е анализирано пространствено-времето разпределение на 121 афършокови събития с магнитуд по продължителност M_d (M_d , дефиниран в Христосков и Самарджиева, 1983) в интервала $1.0 \leq M_d \leq 4.0$, генерирани след земетресението от 05.04.2002 г. с M_w 4.6. От тези събития с магнитуд $M_d \geq 2.0$ са 69 земетресения.

За афършоково събитие се приема всяко земетресение, реализирано във времето след друго земетресение, което удовлетворява критериите за афършок, дефинирани от Gardner and 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 афършок 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 – време на възникване, R_{am} – разстоянието между хипоцентрите (епицентрите) на главното събитие и съответния афършок, $T(M_m)$ и $R(M_m)$ – 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 and Knopoff (1974), получена за Централни Балкани от Христосков и Лазаров (1981). В настоящото изследване за дефиниране границите на афършоковите серии в пространството и времето, като първо приближение, са приложени следните релации (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 – максималният размер на афършоковата област, T_a – предполагаемата продължителност на поредицата във времето.

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

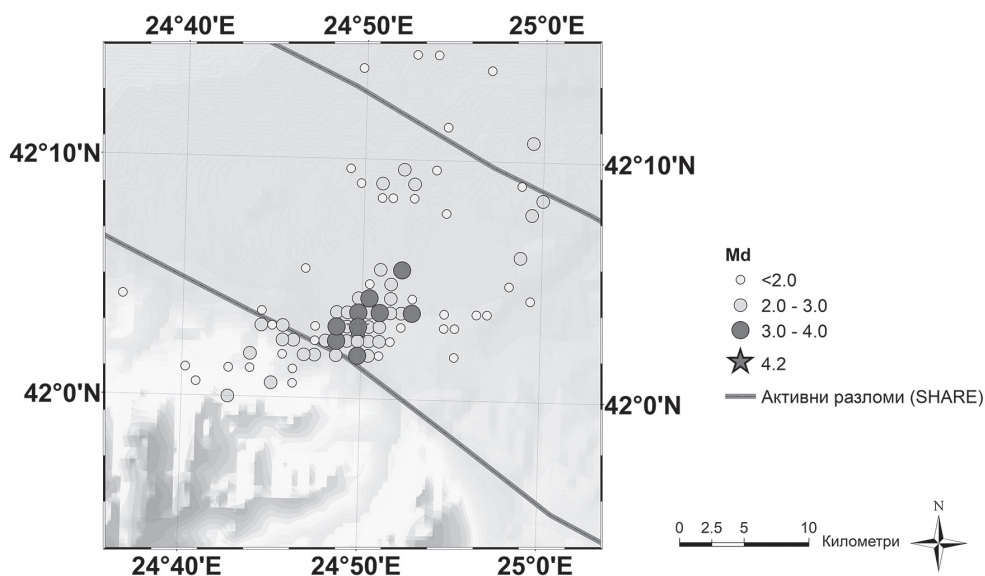
РЕЗУЛТАТИ

Резултатите от изследването са представени на фиг. 1, 2, 3 и 4 и в табл. 1. Пространственото разпределение на поредицата е илюстрирано на фиг. 1. На фиг. 2, 3 и 4 и в табл. 1 са представени резултатите от времето разпределение на афършоковите събития.

ПРОСТРАНСТВЕНО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ

Фигура 1 илюстрира пространственото разпределение на събитията (121 събития с магнитуд M_d в интервала $1.0 \leq M_d \leq 4.0$), генерирани след земетресението от 05.04.2002 г. с M_w 4.6. Разгледани са земетресенията в област с радиус от 30 km, определена съгласно релацията за дефиниране границите на афършоковите серии в пространството (уравнение 9, Gardner and Knopoff, 1974; Христосков и Лазаров, 1981). Използваните магнитудно зависими символи са посочени в дясната част на фигурата. Със звезда е отбелязано главното земетресение. Представените активни разломи са дефинирани в проекта SHARE.

Фигурата илюстрира някои особености в пространственото разпределение на афършоковата активност: 1) главното земетресение и последвалите го най-силни афършокови събития се групират почти перпендикулярно на разпознатата разломна структура; 2) най-силните афършокови събития са реализирани в сравнително малка област; 3) слабите афършокови събития ($M_d < 3.0$) са силно дисперсирани в пространството.



Фиг. 1. Пространствено разпределение на афършоковите събития, реализирани след земетресението от 05.04.2002 г.

ВРЕМЕВО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ

Стойностите на параметрите на модифицираната формула на Omori се оценяват по ММП, предложен от Ogata (1983).

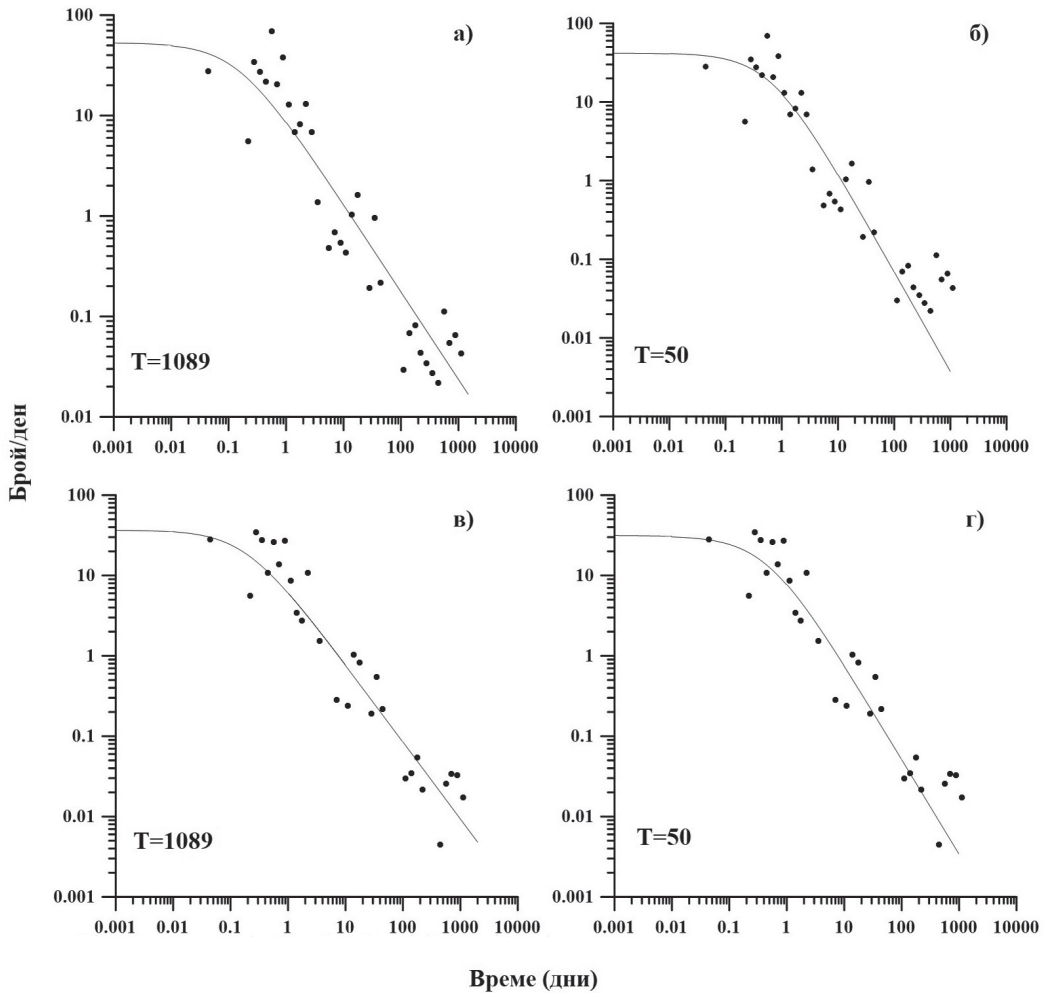
Афтършоковата активност е изследвана за два различни времеви интервала: (очаквана и наблюдавана продължителност, съответно $T=50$ дни и $T=1089$ дни) без магнитуден праг и с магнитуден праг $M_a=2.0$. На фиг. 2 е представено честотно-времето разпределение на афтършоковите събития за четирите разглеждани случая.

В табл. 1 са представени стойностите на параметрите K , p , c и стойности на AIC за различните модели. Разгледани са модели без наличие на вторични серии, с наличие на една вторична серия (06.04.2002 г., $T_0=01:10:57$, $M_p3.7$) и с наличие на две вторични серии (06.04.2002 г., $T_0=01:10:57$, $M_p3.7$ и 06.04.2002 г., $T_0=05:47:07$, $M_p3.8$).

Таблица 1

Оценки на параметрите K , p , c и AIC – критерий за различни модели на поредици след земетресението от 05.04.2002 г.

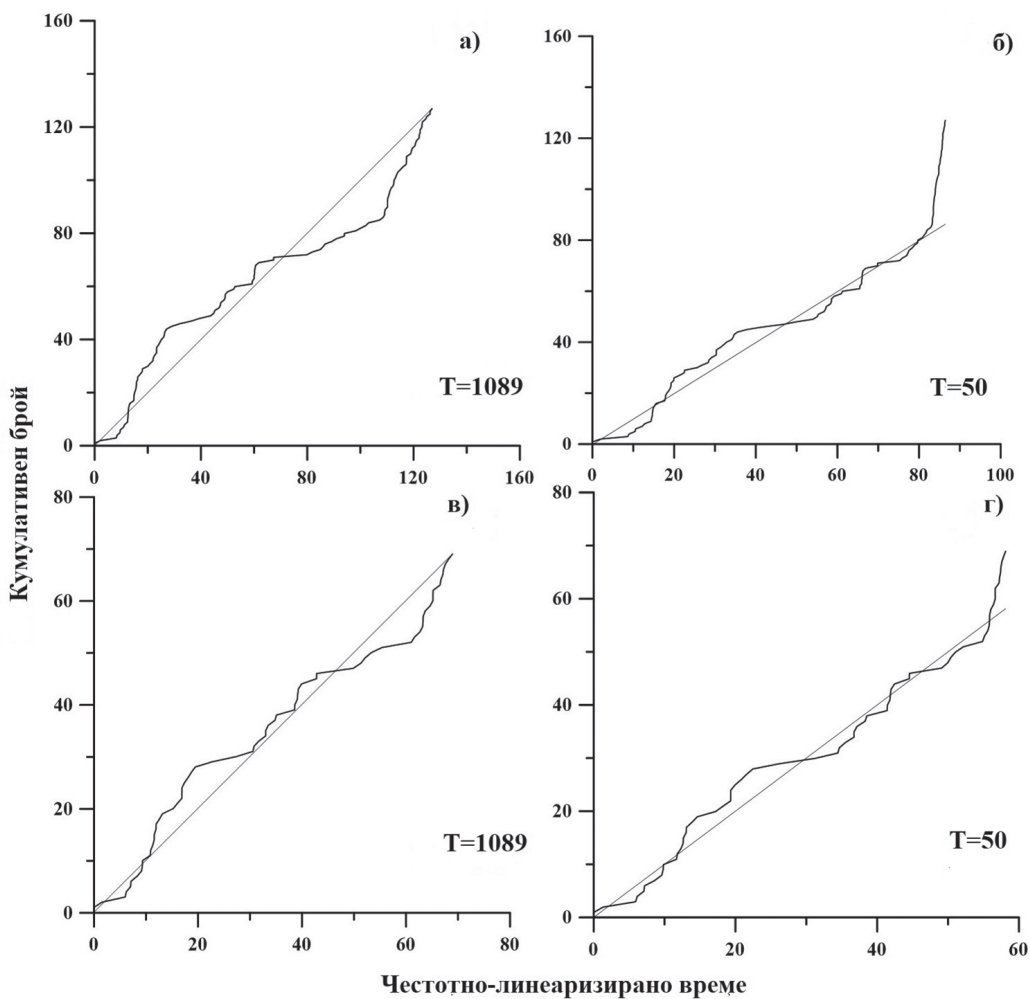
Модел	Период (Т)	К	р	с	K_1	p_1	c_1	K_2	p_2	c_2	AIC
Без вторична серия, без магнитуден праг	1089	9.52	0.87	0.14							430.18
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	1089	7.12	0.96	0.18							253.56
Без вторична серия, без магнитуден праг	50	23.79	1.27	0.64							-62.05
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	50	11.88	1.18	0.44							3.58
С една вторична серия, без магнитуден праг	50	9.73	1.06	0.38	3.07	1.06	0.02				-77.20
С една вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	50	6.22	1.06	0.24	1.94	1.06	0.05				3.75
С две вторични серии, без магнитуден праг	50	9.02	1.05	0.35	1.75	1.05	0.01	1.24	1.05	0.01	-77.33
С две вторични серии, с магнитуден праг $M_a=2$	50	5.57	1.37	0.21	0.63	1.37	0.01	1.31	1.37	0.04	5.32



Фиг. 2. Честотно-времево разпределение на афтершоковите събития: а) за период $T=1089$ дни без магнитуден праг; б) за период $T=50$ дни без магнитуден праг; в) за период $T=1089$ дни, с магнитуден праг $M_a=2$; г) за период $T=50$ дни, с магнитуден праг $M_a=2$

За четирите модела наблюдаваното честотно разпределение е сравнено с т.нар. „теоретично“ разпределение, което се очаква за избрания модел на процеса (в настоящия случай това е модифицирана формула на Omori). От фиг. 2 се вижда, че наблюдаваното разпределение е по-близко до „теоретичното“ за моделите с очакваната продължителност – 50 дни (фиг. 2б и 2г).

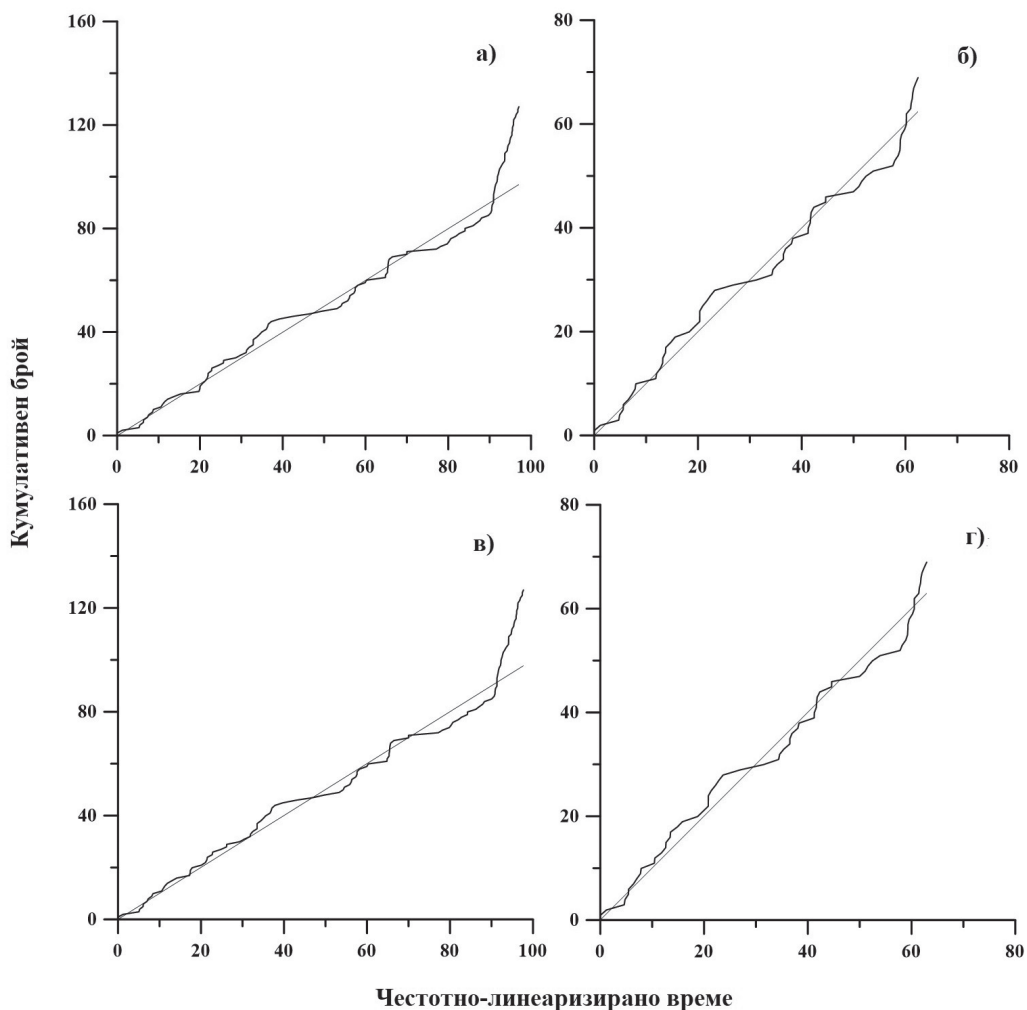
На фиг. 3 е представено честотно-линеаризираното разпределение на афтершоковите събития: за наблюдаваната ($T=1089$ дни) и очакваната ($T=50$ дни) продължителност без магнитуден праг и с магнитуден праг $M_a=2.0$.



Фиг. 3. Честотно-линеаризирано разпределение на афтершоковите събития: а) за период $T=1089$ дни без магнитуден праг; б) за период $T=50$ дни без магнитуден праг; в) за период $T=1089$ дни, с магнитуден праг $M_a=2$; г) за период $T=50$ дни, с магнитуден праг $M_a=2$

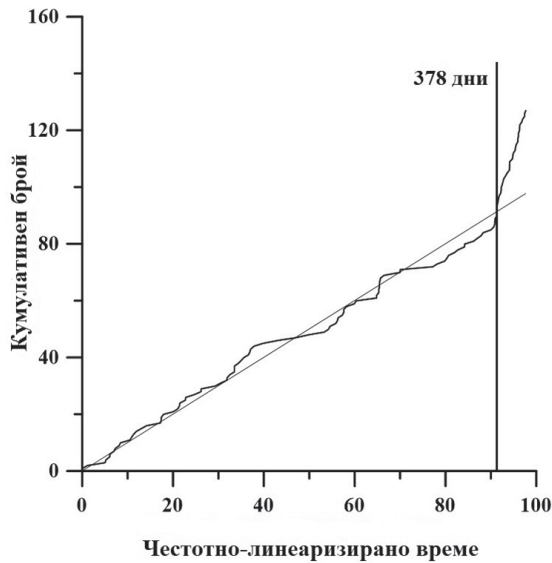
При четирите модела афтершоковата активност се понижава малко след втория ден и нараства след четвъртия, когато са реализирани две от най-силните афтершокови събития (с $M_p 3.7$ и $M_p 3.8$). Това дава основание в този интервал да се потърсят вторични афтершокови серии.

На фиг. 4 е представено честотно-линеаризираното разпределение на афтершоковите събития за очаквана продължителност $T=50$ дни за четирите модела. На различните фигури са илюстрирани модели с една вторична серия и с две вторични серии, без и с магнитуден праг. В табл. 1 са представени стойностите на параметрите K , p , c и стойности на AIC за разгледаните модели.



Фиг. 4. Честотно-линеаризирано разпределение на афтершоковите събития за период $T=50$ дни: а) с една вторична серия и без магнитуден праг; б) с една вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$; в) с две вторични серии и без магнитуден праг; г) с две вторични серии, с магнитуден праг $M_a=2$

От получените оценки за параметрите K , p , c и стойности на AIC, представени в табл. 1, както и от представените резултати 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, което е характерно за районите на Южна България, където афтершоковият 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;



Фиг. 5. Честотно-линеаризирано разпределение на афтершоковите събития за период $T=50$ дни без магнитуден праг, с две вторични серии (моделът в най-добро съответствие с наблюденията)

4) при честотно-линеаризирано разпределение на афтершоковите събития се наблюдава преминаване от афтершокова активност към фонова сеизмичност около 378 дни след главното събитие. Установената продължителност на процеса значително превишава очакваната ($T = 50$ дни, според релация 10, Gardner and Knopoff, 1974; Христосков и Лазаров, 1981); 5) моделът в най-добро съответствие с наблюденията (най-ниска стойност на AIC) е моделът с две вторични серии, без магнитуден праг, за период $T=50$ дни, този модел е представен на фиг. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чрез анализ на получените резултати се достига до следните заключения за пространствено-времето разпределение на афтершокови събития, генерирани след земетресението от 05.04.2002 г. с $M_w 4.6$

- Пространствената картина на афтершоковата активност показва, че най-силните афтершокови събития се групират в близост до дефинирана разломна структура;
- Площта на афтершоковата област нараства с времето и намаляване на магнитуда. По-слабите афтершокови събития ($M_d < 3.0$) са силно диспергирани в пространството;
- В първо приближение затихването на афтершоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Omori;

- Оценките на параметъра p , характеризиращ затихването на афтершоковата активност във времето, са в 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);
- Установената продължителност на афтершоковата активност (преминаване от афтершокова активността към фонова сеизмичност) значително превишава очакваната (определена по релацията, представена в Христосков, Лазаров, 1981).

ЛИТЕРАТУРА

- Янков, Я.** 1935. Регионални деформации, причинени от земетресенията на 14 и 18 април 1928 г. Земетресенията в България No.20-21, Центр. Мет. Ст., С., стр. 93. / Yankov, Y. 1935. Regional deformations caused by the 14 and 18 April 1928 earthquakes. Earthquakes in Bulgaria No.20-21, Centr. Meteorol. Stat., Imprimerie de l'Etat, Sofia, pp 93. (Bg)
- Христосков, Л., Р. Лазаров.** 1981. Основни съображения върху представителността на сеизмичните каталози с оглед на сеизмостатистическите оценки. БГС, VII, 3, 58-72./Christoskov L., R. Lazarov. 1981. Main considerations on the representativeness of seismic catalogs in view of the seismic assessments. BGJ, VII, 3, 58-72. (Bg)
- Христосков, Л., Е. Самарджиева.** 1983. Изследване върху продължителността на сеизмичните колебания като енергетична характеристика на земетресенията. БАН, БГС, IX, 1, 79-87/ Christoskov L., E. Samardjjeva. 1983. Study on the duration of seismic oscillations as an energy characteristic of earthquakes. BAS, BGJ, IX, 1, 79-87. (Bg)
- Солаков, Д.** 2010. Математико статистически методи и изследвания в сеизмологичната практика, автореферат, 55 стр./ Solakov, D. 2010. Mathematical and statistical methods and research in seismological practice. 55 p. (Bg)
- Киров, К.** 1945. Земетресения в България 29-32. Списък на земетресенията, усетени през годините 1928-1930. Инст. Метеорол. Център, България, 140 стр. / Kirov, K. 1945. Tremblements de terre en Bulgarie 29-32. Liste des tremblements de terre ressentis pendant les annees 1928-1930. Inst. Meteorol. Sentr. De Bulgarie, 140. pp. (Bg).
- Utsu, T.** 1969. Aftershocks and earthquakes statistics (I)- Some parameters which characterize an aftershock sequence and their interaction. J. Fac. Sc. Hokaido Univ., Ser. VI. (Gephys), 3, 129-195.
- Utsu, T.** 1961. A statistical study on occurrence of aftershocks. Geoph. Mag., 30, 521-605.
- Utsu, T.** 1957. Magnitude of earthquakes and occurrence of their aftershocks. Zisin (J. Seism. Soc. Jap.) ii, 10, 35-45, (in Japanese).
- Simeonova S., Solakov D.** 1999. Temporal characteristics of some aftershock sequences in Bulgaria, Annali di Geofisica, 42,5, 821-832.
- Ogata, Y.** 1983. Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock sequences by the maximum likelihood procedure. J. Phys. Earth 31, 115-124.
- Mikumoto, T. and T. Miyatake.** 1979. Earthquake sequences on a frictional fault model with non-uniform strengths and relaxation times. Geophys. J. R. Astr. Soc. 59, 497-522.

- 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.
- Dieterich, J.** 1978. Time dependent friction and the mechanics of strike-slip. *Pure Appl Geophys.*, 116, 790-806.
- Akaike, H.** 1977. A new look at the statistical model identification. P.R. Krishnaiah ed., 27-41, Amsterdam and New York; North Holland Pub.Co.
- Akaike, H.** 1974. On entropy maximization principle. *IEEE Trans.Autom.Control AC-19*, 716-723.
- *** **SHARE**, project for Seismic Hazard Harmonization in Europe, (<http://www.efehr.org/en/home/>).