



**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО
ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОГРАФИЯ**



Пламена Георгиева Райкова

**Характеристики на фор-афтершокова и роев тип активност
за територията на България и околностите**

АВТОРЕФЕРАТ

на
дисертация

за получаване на образователна и научна степен “доктор” по специалност -
01.04.06 Сеизмология и вътрешен строеж на земята

Научен ръководител:
Член кор. дфн. Димчо Солаков

Научен консултант:
Доц. д-р. Стела Симеонова

Рецензенти:
Проф. дфн Петър Ставрев
Доц. д-р. Ирена Александрова

София, 2017 г.

Данни за дисертационния труд:

Брой страници	158
Брой фигури	73
Брой таблици	13
Брой цитирани заглавия	197

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на департамент „Сеизмология“ на НИГГГ-БАН, състояло се на 16 февруари 2017 г.

Защитата на дисертацията ще се състои на 26.05.2017 г. от 14:00 часа в зала 101 на НИГГГ-БАН на открито заседание на научно жури в състав:

1. Член кор. Проф. дфн. Димчо Солаков
2. Доц. д-р. Ирена Александрова
3. Проф. дфн Петър Ставрев
4. Проф. д-р Радослав Наков
5. Проф. д-р Николай Добрев

Автор: Пламена Георгиева Райкова

Заглавие: Характеристики на фор-афтьршокова и роев тип активност за територията на България и околностите

Материалите за защитата са на разположение на интересуващите се в стая 105 на НИГГГ-БАН, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 3.

СЪДЪРЖАНИЕ

ВЪВЕДЕНИЕ	5
ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	6
СТРУКТУРА НА ДИСЕРТАЦИЯТА	7
I. ОБЗОР ВЪРХУ ПРОСТРАНСТВЕНО-ВРЕМЕВО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ФОР-АФТЪРШОКОВА АКТИВНОСТ И РОЕВ ТИП СЕИЗМИЧНОСТ	8
I.1 ПРОСТРАНСТВЕНО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ	8
I.2. ВРЕМЕВО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ	8
II. ВХОДНИ ДАННИ И ПРИЛОЖЕНА МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ ПРОСТРАНСТВЕНО – ВРЕМЕВО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ФОР-АФТЪРШОКОВА И РОЕВ ТИП СЕИЗМИЧНОСТ	10
II.1. ВХОДНИ ДАННИ	11
II. 2 ИЗПОЛЗВАНИ МЕТОДИ И СТАТИСТИЧЕСКИ АПАРАТ	13
III. РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ФОР-АФТЪРШОКОВА И РОЕВ ТИП АКТИВНОСТ В ПРОСТРАНСТВОТО И ВРЕМЕТО	15
III.1. ВРЕМЕВО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ФОР-АФТЪРШОКОВА И РОЕВ ТИП АКТИВНОСТ	15
III.2. ВРЕМЕВО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ФОР-АФТЪРШОКОВА И РОЕВ ТИП АКТИВНОСТ	20
IV. СПЕКТРАЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ВХОДНИ ДАННИ И ПРИЛОЖЕНА МЕТОДИКА	29
IV.1. ВХОДНИ ДАННИ И ПРИЛОЖЕНА МЕТОДИКА	30
V. ОЦЕНКА НА СПЕКТРАЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ФОР-АФТЪРШОКОВА И РОЕВ ТИП АКТИВНОСТ	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41
ЛИТЕРАТУРА	43
ПРИНОСИ	46
СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА	47
СПИСЪК НА ДОКЛАДИТЕ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА	47

Благодаря на научните си ръководители член кор. дфн. Димчо Солаков и доц. д-р. Стела Симеонова за проявеното търпение, конструктивната критика и полезните съвети.

Благодаря на колегите от НОТССИ, които допринесоха за осъществяването на изследванията и представянето на получените резултати. Благодаря и на колегите доц. д-р Георги Гаджев (НИГГГ), ас. Ивелина Георгиева (НИГГГ) и Дарина Бухчева (Упсалски университет).

ВЪВЕДЕНИЕ

Земетресението е уникално природно явление, определящо се от голямо брой фактори, които не могат да бъдат непосредствено наблюдавани и трудно се контролират. За сеизмично застрашените области (каквато е територията на България) земетресенията са неделима част от околната средата. Няма друго природно явление с така силно изявен дуализъм, каквото е едно силно земетресение – изключително полезно за изучаване на планетата Земя (сеизмичните вълни, породени от земетресенията са единственият източник на информация за вътрешния строеж на Земята) и катастрофално от социално икономическа и психологична гледна точка. Съвкупността от земетресения в дадена област, разглеждана във време, пространство и енергия, определя сеизмичния режим на тази област. Сеизмичният режим се контролира от вариациите на натоварване и релаксация на средата, като елементи на възможни сеизмични цикли от различен мащаб.

Земетресенията са неравномерно разпределени в пространството и времето. Изследването на пространствено-времето разпределение на земетресенията е съществено за опознаване на сеизмогенния процес.

В пространствен аспект, земетресенията са концентрирани по сеизмични пояси, които съвпадат с контактните зони между най-крупните геоструктури-тектонските плочи. Балканският полуостров, на който е разположена България, е един от сеизмично активните възли на Алпо-Хималайски или още наричан Средиземноморско-Трансзиатски пояс (един от двата основни земетръсни пояса).

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-афгършоковите поредици и сеизмичните роеве.

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.

Афгършоковите поредици са тези групи от земетресения, които се реализират непосредствено след главното събитие и постепенно затихват и отслабват по сила във времето. Една от феноменалните характеристики на афгършоковия процес е затихването му във времето по обратен степенен закон (модифицирана формула на Omori), докато повечето от физичните процеси затихват експоненциално във времето.

От трите земетръсни групи афтершоковите 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 резултатът от процесите на разрушение в огнището на главното земетресение и преразпределяне на напреженията след неговата реализация. Пространствено-времените и енергетичните особености на афтершоковите поредици са традиционен обект на изследване в сеизмологията. Особеният интерес към афтершоковия процес е продиктуван от неговата специфика и особености. От една страна афтершоковите 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, времевото и енергетичното разпределение на афтершоковите събития като съществена част от този процес.

Сеизмичният рой е земетръсен клъстер от събития с приблизително еднакъв магнитуд, групирани в пространството и времето. Роевата активност, обикновено започва и затихва много рязко във времето. Роевият тип земетръсни групи, най-често, се реализират във вулканични и геотермални области.

Настоящото изследване е в обсега на приложната сеизмология и основните му задачи са в съответствие със сеизмологичната обстановка в България и настоящия етап от развитието на науката.

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Основна цел на настоящата разработка е изследването и анализ на пространствено-времените и спектралните характеристики на трите времеви клъстера, фор-афтершокови поредици и сеизмични роеве, реализирани на територията на България и близките околности.

За постигане на основната цел са формулирани следните задачи:

- Проследяване и обобщение на изследвания, третиращи проблемите за пространствено-времените и спектралните особености на трите времеви групи;
- Анализ на методите, прилагани в световната практика за определяне на пространствено-временото разпределение на събитията в трите времеви клъстера и спектралните им характеристики;
- Формиране на сеизмологична база данни, включваща фор-афтершокови серии и роеве, реализирани на територията на България и близките околности;

- Анализ на пространствено-времевите особености, установени в разпределението на събитията от разгледаните три сеизмични групи;
- Генериране на спектри за обемни вълни (Р и S вълни) за събития от трите времеви клъстера;
- Изчисляване на параметри (снето напрежение ($\Delta\sigma$), радиус и площ на източника), характеризиращи земетръсното огнище на основата на генерираните спектри за Р и S вълни.

СТРУКТУРА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Разработката е систематизирана във въведение, 5 глави и заключение. Допълнително са формулирани основните приноси на дисертационния труд.

В **първа глава** са разгледани и обобщени разработки, свързани с пространствено-времево разпределение на фор-афтьшокова активност и роев тип сеизмичност. Направен е обзор на представите за тези разпределения при трите типа времеви поредици.

Във **втора глава** са дефинирани основните понятия за земетръсните клъстери. Представена е входната сеизмологична база данни, приложена в проведените изследвания.

Описани са методите и статистическият апарат, използван за анализ на пространствено-времево разпределение на трите сеизмични групи.

В **трета глава** на базата на формираната сеизмологична база данни, включващи 6 умерено силни земетресения с магнитуд по сеизмичен момент по-малък или равен на 5.6 ($M_w \leq 5.6$), над 961 форшокови събития, 3051 афтьршокови събития и 578 земетресения от три сеизмични роя е проследено и анализирано пространствено-времевото разпределение на събитията от трите времеви клъстера.

В **четвърта глава** са представени характеристики на спектъра за обемни сеизмични вълни и тяхното приложение за оценка на параметрите на сеизмичния източник, такива като сеизмичният момент, радиуса и площ на източника, свалено напрежение и др. Описани са входните данни и методиката, приложени за оценка на параметрите на сеизмичния източник за събитията от трите времеви групи. Входните данни включват събития, генерирани на територията на България и близките околности, реализирани през периода 2006-2015

В **пета глава** са представени част от генерираните 1160 спектъра по преместване за Р и S вълни на 35 събития от различни времеви поредици (форшоци, афтьршоци и роеве) и главни земетресения. За всяко събитие, прилагайки програма, базирана на модела на Brune, са оценени параметри на сеизмичния източник (свалено напрежение, радиус и площ).

I. ОБЗОР ВЪРХУ ПРОСТРАНСТВЕНО-ВРЕМЕВО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ФОР-АФТЪШОКОВА АКТИВНОСТ И РОЕВ ТИП СЕИЗМИЧНОСТ

I.1 Пространствено разпределение

Форшоковата пространствена картина се отличава с по-ниска степен на групиране от афтьршоковата, но в някои случаи се наблюдава постепенно увеличаване на групирането преди реализацията на главното събитие.

Форшоковата активност може да се наблюдава от няколко часа до няколко месеца, понякога до година, година и половина преди главното събитие (Jones, 1984; Jones and Molnar, 1979; Molchan et al., 1999; Papadopoulos et al., 2000; Sobolev, 2000). Разпознаването на този сеизмичен клъстер, преди реализацията на главното събитие, представлява полезен инструмент за прогнозиране на земетресения.

Пространственото разпределение на земетресенията, наблюдавани след реализацията на главно събитие, или т.нар. афтьршокова област, се характеризира с голямо разнообразие.

Различни изследванията върху сеизмичността, например: Vere-Jones, 1978; Садовски и др., 1984, 1987; Habermann et al., 1986; Eneva and Hamburger, 1989; Eneva and Pavlis, 1988, 1990 показват, че афтьршоковите събития са неравномерно разпределени в пространството. Тази неравномерност се смята за универсална характеристика на сеизмичността и е особено силно изявена при афтьршоковите събития. Неравномерността в пространственото разпределение на земетресенията се свързва с хетерогенността на напреженията, свойствата на средата и разломната геометрия. Многобройните наблюдения върху афтьршокови поредици показват, че афтьршоковите серии са различни при отделните земетресения. В работите на Симеонова (1999) и Solakov, Simeonova (2001) е установена тенденция за нарастване на площта с намаляване на магнитудния праг M_a на разглежданите афтьршокови събития. Най-силно изявено е нарастването при магнитуден праг над 4.0 ($M_a \geq 4.0$).

За роев тип сеизмичност обикновено се счита множество от плитки 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 областта, и/или с отслабени области в земната кора, неспособни да издържат на приложеното напрежение (Mogi, 1963).

I.2. Времево разпределение

Много от изследванията за разпределение на форшоковата активност във времето са концентрирани основно върху появата им преди умерени или силни земетресения (e.g., Mogi, 1969; Utsu, 1970; Kagan and Knopoff, 1978; Jones and Molnar, 1979; Bowman and Kisslinger, 1984; Jones, 1984).

В разпределението на форшоковата активност се наблюдават големи колебания. В много от случаите поредиците на тази активност са съставени от малък брой събития, които са непостоянни или даже понякога липсват. Това създава много трудности за съставяне на емпиричен закон, описващ тяхното периодично увеличаване във времето преди главното събитие.

Японският сеизмолог Omori (1894a,b) предлага формула, която описва затихването на афтершоковата активност във времето. Omori показва, че честотата на събитията за единица време $n(t)$ във момент t добре се изразява чрез релацията: $n(t) = K(t + c)^{-1}$, където K и c са константи.

По-късно, изследвайки афтершоковата активност на японски земетресения, Utsu (1957,1961) доказва, че активността затихва по-бързо във времето отколкото предполага оригиналната формула на Omori. Utsu (1961, 1969). Той нарича релацията: $n(t) = K(t + c)^{-p}$ модифицирана формула на Omori. Според модифицираната формула на Omori афтершоковите събития затихват във времето по обратен степенен закон, а не експоненциално, както затихват повечето от физичните процеси в природата. Модифицираната формула на Omori е един от малкото установени емпирични закони в сеизмологията.

Основен параметър в модифицираната формула на Omori е параметърът p , характеризиращ затихването на афтершоковата активност във времето. Параметърът зависи от физичните свойства на средата, както и от нейната хетерогенност, така и от разпределението на напреженията в нея. В работите на Utsu (1961, 1969) и Mogi(1962) е оценен параметърът p за земетресения в и около Япония. Получените стойности на p са в интервал 0.9-1.8 с най-често срещани стойности 1.1 и 1.4. За България е установено (напр. в Simeonova, Solakov, 1999), че стойността на параметъра p (оценен по ММП) варира между 0.64 и 1.18 със средно 0.96 и медиана 0.94.

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, 1988). За да се извлече тази информация, е необходимо коректно моделиране на процеса и статистически да се оцени моделът, който най-добре отразява развитието на афтершоковата активност.

Изследвания, свързани с механизма на сеизмичните роеве показват, че тяхната поява може да се свърже с освобождаване на натрупаното напрежение в разломна структура, както и с присъствието и движението на течности в разломните зони, или с образуване и движение на магна в дигите на активни вулкани (Contadakis and Asteriadis, 2001; Hainzl and Fischer, 2002; Spicak, 2000; Sykes, 1970; Yamashita, 1999).

Статистическите параметри, характеризиращи сеизмичните роеве се различават от тези на поредицата главно събитие-афтершок. Роевата сеизмичност може да продължи дни, седмици или месеци. Липсата на главно събитие, както и доминирането на слаби събития при роевете, предполага високи стойности на **b** от релацията на Гутенберг-Рихтер. Резултати в редица изследвания показват, че **b**-стойности за вулканични роеве са по – високи - $b > 1$, (Sykes, 1970), докато в континенталните области **b**-стойностите на сеизмичните роеве варират от 0.8 до 1.0 (Ibs-von Seht et al., 2008).

II. ВХОДНИ ДАННИ И ПРИЛОЖЕНА МЕТОДИКА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ ПРОСТРАНСТВЕНО – ВРЕМЕВО РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ФОР-АФТЕРШОКОВА И РОЕВ ТИП СЕИЗМИЧНОСТ

В настоящото изследване за форшокови събития се приемат предхождащи, по-ниско магнитудни земетресения, пространствено-времево свързани с главното събитие. Форшоковите събития се реализират от минути до дни, месеци и в редки случаи дори години преди главното събитие.

За афтершоково събитие се приема всяко земетресение, реализирано във времето след друго земетресение, което удовлетворява критериите за афтершок, 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 афтершок на първото ако са изпълнени следните условия:

$$\begin{aligned} M_a &< M_m \\ 0 < t_a - t_m &< T(M_m) \\ 0 \leq R_{am} &< R(M_m), \end{aligned} \tag{2.1}$$

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 and Knopoff (1974), 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 релации (съгласно Христосков, Лазаров, 1981):

$$\log R_a(M_m) = 0.9696 + 0.1243 M_m \tag{2.2}$$

$$\log T_a(M_m) = -0.62 + 0.56 M_m \quad (M_m < 6.0) \tag{2.3}$$

$$\log T_a(M_m) = -5.25 + 2.15 M_m - 0.137 M_m^2 \quad (M_m \geq 6.0), \tag{2.4}$$

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

Земетръсен рой е поредица от близки по сила (магнитуд) сеизмични събития, групирани във времето и пространството.

II.1. Входни данни

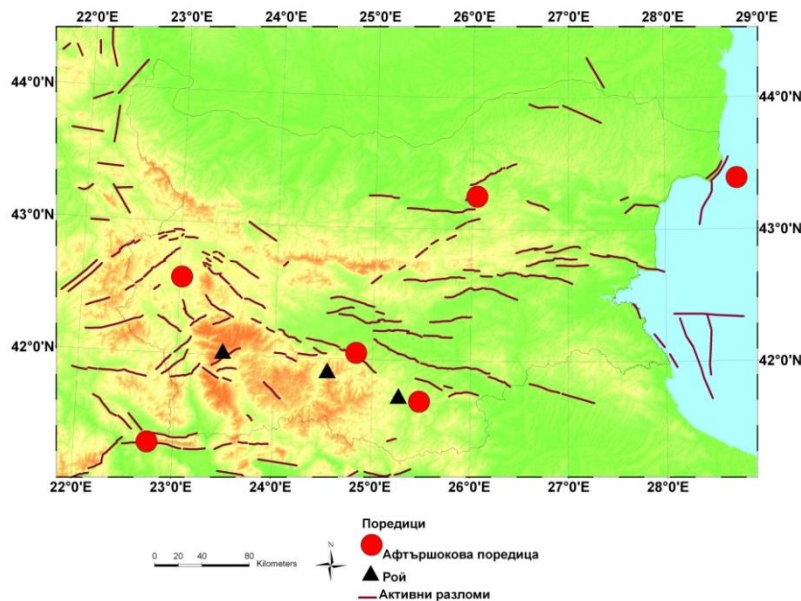
В настоящата работа е изследвана форшокова и афгършокова активност, реализирана през периода 2002 - 2015 г., както и роев тип сеизмичност за периода 1997- 2015 г. Събитията са генерирани на територията на България и близките околности. Разгледаните земетресения са представени в хронологичен ред в Табл. 2.1. В таблицата са дадени оценки на основните кинематични и динамични параметри на събитията. За шест от земетресенията с магнитуд над $M_p > 4.0$ са разгледани афгършоковите поредици, за две от земетресенията, тези от 12.05.2008 г. и от 24.05.2009 г., са разгледани и предхождащите ги форшокови поредици. В таблицата е даден броят на афгършоковите събития (брой събития) и продължителността на афгършоковите серии (продължителност в дни). Включени са броят на събитията в роевете и тяхната продължителност.

Табл. 2.1. Данни за главните земетресения и разгледаните поредици. За роев тип сеизмичност са дадени параметрите на най-силните събития (означени със звезда)

Дата Ден месец година	Координати $\varphi(^{\circ})/\lambda(^{\circ})$	Фокална дълбочина h(km)	M	Брой (събития)	Продължителност (в дни)
25.06.1997 г. *	42.03/23.47	7	3.5	240	791
05.04.2002 г.	42.05/24.83	11	4.6	121	1089
20.02.2006 г.	41.69/25.48	13	4.6	83	1023
12.05.2008 г.	43.25/26.05	11	4.1	1215	383
08.04.2009 г.*	41.73/25.27	13	3.5	291	22
24.05.2009 г.	41.32/22.74	5	5.3	1417	1088
05.08.2009 г.	43.39/28.75	12	5.0	6	365
22.05.2012 г.	42.58/23.02	14	5.6	209	1080
14.01.2014 г.*	41.91/24.54	20	3.4	47	38

В Табл. 2.1 не е представен броят и продължителността на форшоковата активност. Представените събития не са разпределени равномерно по територията на страната, както е илюстрирано на Фиг. 2.1

Афгършоковата поредица след земетресението от 05.04.2002 г., реализирана в района на село Крумово, област Пловдив, който е част от сеизмогенна зона Марица. Тази афгършокова поредица е продължила повече от две години.



Фиг. 2. 1. Пространствено разпределение на епицентрите на главните земетресения (означени с кръгове) и най-силните събития от роевата сеизмичност (означени с триъгълници)

Афършоковата серия, последвала земетресението от 20.02.2006 г., е реализирана в района на град Кърджали, който е част от сеизмогенна зона Родопи (зоната не е от основните сеизмогенни зони, разпознати на територията на България). Земетресението от 12.05.2008 г., се характеризира с форшкова и афършокова активност. Наблюдаваната активност се реализира в района на град Стражица, който е част от сеизмогенна зона Горна Оряховица. Следващата поредица от 24 май 2009 г., реализирана в сеизмогенна зона Валандово (извън територията на България, дефинирана напр. Симеонова, 1999), също включва афършокова и форшкова серия (включваща 39 събития). Форшковата поредица е наблюдавана приблизително 24 часа преди основния трус. Последвалата го афършокова серия е продължила повече от две години. В същата година е реализирано и събитие от 05.08.2009 г. с магнитуд $M_w 5.0$, в сеизмогенна зона Шабла, където не е наблюдавана афършокова поредица, което е характерно за тази сеизмогенна зона. През 2012 г., в Софийска сеизмогенна зона е реализирано събитие с $M_w 5.6$, което е последвано от изявена афършокова серия, продължила повече от две години.

Разгледана е и поредицата от роев тип сеизмичност от 1997 г., реализирана в района на Рила планина, част от сеизмогенна зона Кресна. Продължителността на тази роева активност е около три години. Друга поредица от роев тип е наблюдавана през месец април 2009 г. в района на град Кърджали, който е част от сеизмогенна зона Източни Родопи. Наблюдаваната поредица е с продължителност по-малка от месец. В изследването е разгледан и роя, който е реализирана в близост до град Пловдив, принадлежащ към сеизмогенна зона Марица. Поредицата е наблюдавана повече от месец.

Като основни източници на информация за разгледаните земетресения са използвани данни от Националната Оперативна Телеметрична Система за Сеизмологична Информация (НОТССИ), където унифицирана и хомогенна каталожна информация съществува от 1980 г. Основните кинематични параметри на земетресенията, след тази година, са определени чрез компютърна програма, разработена от Солаков (1993).

II. 2 Използвани методи и статистически апарат

Земетресенията са неравномерно разпределени в пространството и времето. Определянето на тези разпределения е една от основните задачи, третиращи в теоретичните и приложни изследвания. В сеизмологичния анализ, Поасоновият процес е използван от редица автори като първо приближение за описание разпределението на земетресенията във времето. Сеизмологичните данни добре се описват с Поасонов процес, ако от тях се изключат групите (поредиците) от земетресения. Основен недостатък на Поасоновия процес, като модел на сеизмичния процес е, че не отчита възможността земетресенията да се генерират в групи. Пример за такива групи са фор–афгършоковите поредици и роев тип сеизмичност. Като се вземе предвид, че афгършоковите събития са значителна част от реализираните земетресения, е необходимо техният ефект да бъде отразен при моделиране на сеизмичния процес.

Една от феноменалните характеристики на афгършоковия процес е затихването му във времето по обратен степенен закон -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 Ogata (1983) предполага, че развитието на афгършоковата активност във времето е нестационарен Поасонов процес с интензивностна функция $\lambda(t;\theta)$, $\theta=(K, p, c)$, определена по релацията:

$$\lambda(t;\theta) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{\Delta t}(t)}{\Delta t}, \quad (2.5)$$

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 афгършокова 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 афгършоковите събития), се дава чрез уравнението:

$$L(t_1, t_2, \dots, t_k; \theta) = \prod_{i=1}^k \lambda(t_i; \theta) e^{-\int_S^T \lambda(t; \theta) dt} \quad (2.6)$$

Оценките по максимално правдоподобие за параметрите θ (векторът на параметрите) се получават от максимизиране на функцията на максимално правдоподобие. За серия без

вторични афтершокови поредици, интензивностна функция се определя чрез модифицираната формула на Omori:

$$\lambda(t; \theta) = K(t+c)^{-p} \quad (\theta=(K, p, c)) \quad (2.7)$$

Мултиполни серии (с изявена вторична афтершокова активност) се моделират чрез интензивностна функция от вида (Ogata, 1983):

$$\lambda(t; \theta) = K(t+c)^{-p} + \sum_{i=1}^m H(t-T_i) K_i(t-T_i+c_i)^{-p_i}, \quad (2.8)$$

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 θ , афтершоковият процес се трансформира в стандартен Поасонов процес ($\lambda=1$) по честотно-линеаризираната времева ос τ . Честотно-линеаризираното време за афтершокова поредица се дефинира като:

$$\tau = \Lambda(t) = \int_s^t \lambda(s) ds = \int_s^t [K(s+c)^{-p} + \sum_{i=1}^m H(t-T_i) K_i(t-T_i+c_i)^{-p_i}] ds \quad (2.9)$$

Времева ос τ се използва за установяване на отклонения в сеизмичната активност от теоретичния тренд $N(\tau)=\tau$, 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 афтершокова активност, или като край на афтершоковата активност.

За сравняване на модели за разпределение на афтершоковата активност във времето е приложен информационния 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:

$$AIC = (-2) \max \ln(Lh) + 2n, \quad (2.10)$$

където $\ln$ е натурален логаритъм, Lh е съответната функция на правдоподобие и n -броят на оценяваните 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.

За оценка параметрите на разпределенията на афтершоковите събития във времето е разработен програмен пакет на PASKAL (представен в Солаков, 2010).

В изследването са приложени методи за оценка на параметрите на релацията на Гутенберг-Рихтер (магнитудно-честотно разпределение) за роевия тип сеизмичност за периода 1997 - 1999 г. Магнитудно-честотното разпределение е от съществено значение при прогнозирането броя на земетресенията в определен магнитуден интервал за

определен времеви период, като се предполага стационарност на сеизмичния процес във времето.

В практиката най-често се използват два метода за оценка на параметъра **b** на магнитудно-честотната зависимост: 1) оценка по метода на най-малките квадрати (МНК); 2) оценка по метода на максимално правдоподобие (ММП). При предположение, че $m_1 = \infty$ - едностранно отсечено разпределение (Utsu 1965; Aki, 1965), прилагайки ММП оценката се дава с релацията:

$$b = \frac{1}{\ln(10)(\bar{M} - M_0)}, \quad (2.11)$$

където $\bar{M}$ е средният магнитуд на извадката, M_0 – долна граница на разпределението;

3) оценка по ММП за двустранно отсечено разпределение (Page, 1968) се дава с уравнението:

$$b = \frac{1}{\ln(10) \cdot \left(\bar{M} - \frac{M_0 - M_1 e^{-\beta \Delta M}}{1 - e^{-\beta \Delta M}} \right)}, \quad (2.12)$$

където $\beta = b \ln(10)$.

III. РАЗПРЕДЕЛЕНИЕ НА ФОР-АФТЪРШОКОВА И РОЕВ ТИП АКТИВНОСТ В ПРОСТРАНСТВОТО И ВРЕМЕТО

Фор-афтршоковите и роевите групи представляват основна част от генерираните земетресенията, поради което те са често третиран проблем в сеизмологичните изследвания. В много изследвания е доказано, че ако не се отчита наличието на времеви поредици от събития, може да се достигне до погрешни резултати и изводи за сеизмичния процес. Настоящото изследване върху фор-афтршокова и роев тип активност е проведено въз основа на стандартизирани информационни файлове, включващи 961 форшокови и 3051 афтршокови събития, и 578 земетресения от 3 сеизмични роя, реализирани на територията на България и околностите.

III.1. Пространствено разпределение на фор-афтршокова и роев тип активност

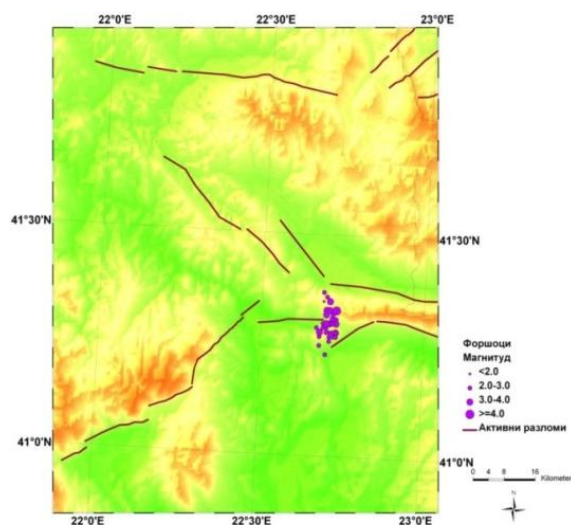
В настоящата глава е анализирано пространственото разпределение на фор-афтршоковите и роевите поредици, представени в Глава 2 (Табл. 2.1. и Фиг. 2.1). В изследването не е включено земетресението от 05.08.2009 г., с $M_w 5.0$, което не е предхождано от форшокова активност, а афтршоковата поредица, включва 6 афтршокови събития, с минимален магнитуд $M_p \geq 1.0$, генерирани за период от една година. Изключително ниското ниво на афтршоковата активност потвърждават резултати от предходни изследвания (напр. Симеонова С., 1999) където е установено, че сеизмогенна зона Шабла не се характеризира с изявена афтршокова активност.

Пространствено разпределение на форшокова активност.

Форшоковови поредици се наблюдават във времеви интервали от няколко часа, няколко месеца или година преди главното събитие. Само две от разглежданите земетресения са предхождани от форшокови поредици

Пространственото разпределение на форшоковата група, преди земетресението от 12.05.2008 г. ($m_b 4.1$), не е изследвана поради това, че голяма част от събития са регистрирани само от най-близката сеизмична станция (SZH) и не са локализирани.

Разгледано и анализирано е пространственото разпределение на изявената форшокова поредица, предхождаща земетресението от 24.05.2009 г. ($M_w 5.3$). На фигура 3.1 е представено пространственото разпределение на форшоковата поредица за период от около 24 часа преди основния трус. Извадката е съставена от 39 събития с магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 4.3$.



Фиг. 3.1. Пространствено разпределение на форшоковите събития преди земетресението от 24.05.2009 г.; 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 г.

Фигурата илюстрира, че 1) форшоковите събития се групират между три разломни структури; 2) събитията са реализирани в сравнително малка област; 3) събитията очертават областта и разломната структура, по която в последствие, се генерират главното земетресение и най-силните афтершокови събития.

Пространствено разпределение на афтершокова активност.

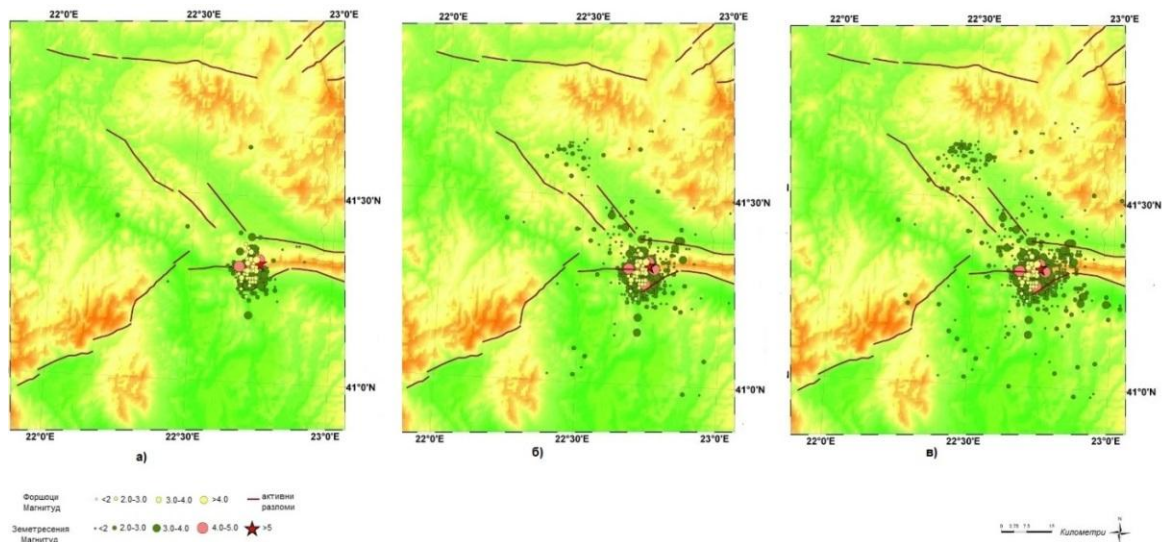
В проведеното изследване е представена пространствена картина на афтершоковата активност, за 4 от посочените в Табл. 2.1. поредици. Не е разгледано пространственото разпределение на афтершоковите събития след земетресението от 12.05.2008 г. с $m_b 4.1$, защото само 7 от афтершоковите събития са локализирани.

Пространственото разпределение на афтершоковите събития за разгледаните 4 афтершокови поредици се характеризира със следните особености: най-силните афтершокови събития се групират в сравнително малка област около главното събитие по или в близост до дефинирани разломни структури; афтершоковата област нараства с времето и намаляване на магнитуда; слабите афтершокови събития ($M_p < 3.0$) са силно диспергирани в пространството.

По долу са представени двете афтершокови поредици с най-голям брой събития, за които са проследими пространствено-времените вариации в пространственото разпределение.

Земетресението от 24.05.2009 г.

За изследване пространственото разпределение на афтершоковите събития, генерирани след земетресението от 24.05.2009 г. $M_w 5.3$, е формирана извадка, включваща 1417 афтершокови събития с магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 4.9$. На Фиг. 3.2 е представена пространствена картина на афтершоковата активност за три времеви интервала.

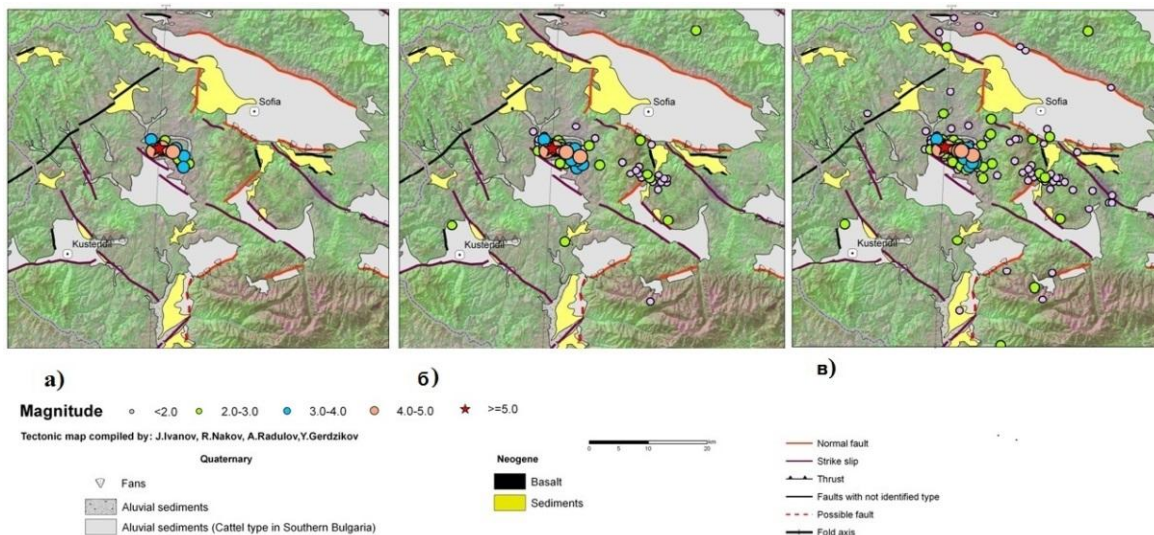


Земетресение от 22.05.2012 г.

Трябва да се отбележи, че това земетресение не се характеризира с форшокова активност, но е реализирано в област, характеризираща се с изявено пространствено сеизмично затишие за слаби до умерено силни земетресения (Solakov et. al, 2016).

За изследване пространственото разпределение на афтершоковите събития, генерирани след земетресението от 22.05.2012 г. $M_w 5.6$, е формирана извадка, включваща 209

афтершокови събития с магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 4.4$. На Фиг.3.3 е представена пространствена картина на афтершоковата активност за три времеви интервала.



Фиг. 3.3 Пространствено разпределение на афтершоковите събития, реализирани след земетресението от 22.05.2012 г.: а) 3 часа след главното събитие; б) 14 дни след главното събитие; в) 663 дни след главното събитие; 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 г.

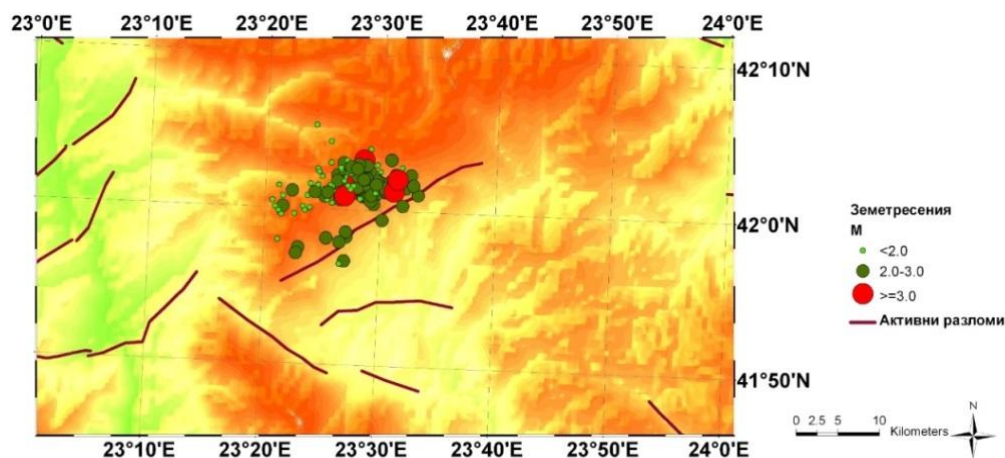
Пространствено разпределение на роев тип активност.

Роев тип сеизмичност, реализирана през периода от 1997-1999 г.

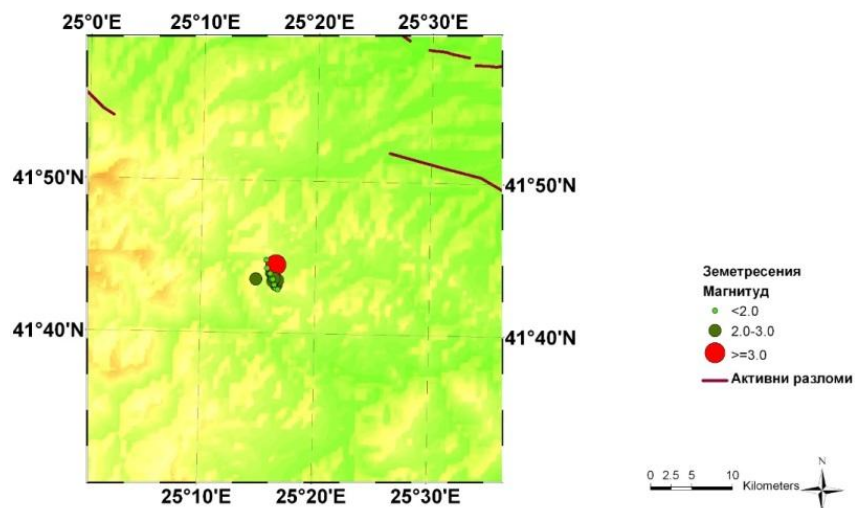
Поредицата е съставена от 240 събития с магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 3.7$, които са реализирани за 822 дни, в района на Рила. От получените резултати при разглеждане на времевото разпределение на този рой е установено, че той включва три последователни роя, ясно различни във времето. На фигура 3.4 е представена съвместната (на трите роя) пространствена картина. Поредици показва ясно групиране, в близост до дефинирана разломна структура. По разломна структура са локализирани няколко по-слаби земетресения с магнитуд в интервала (2.0;3.0). Най-общо роят се реализира в направление изток-запад, а разломната структура е отместена на североизток-югозапад.

Роев тип сеизмичност, реализирана през периода 08-30 април 2009 г.

Тази поредица 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). Пространственото разпределение на 27-те събития е представено на Фиг. 3.5.



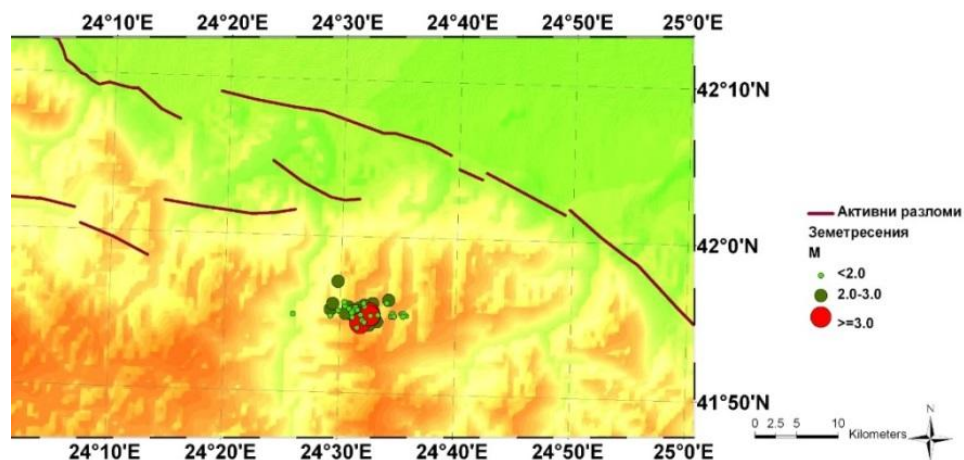
Фиг. 3.4 Пространствено разпределение на роева активност през периода юни 1997- август 1999 г.; активните разломи се основават на „Неотектонска карта на България“, съставена от Ж. Иванов, Ал. Радулов, Я. Герджиков и Р. Наков, представена в Отчет ГФИ 2008 г.



Фиг. 3.5 Пространствено разпределение на роев активност за периода 08.04.2009 г. – 30.04.2009 г.; 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 г.

Роев тип сеизмичност, реализирана през периода януари – февруари 2014 г.

Тази поредица включва 47 събития с максимален и минимален съответно, $M_p 3.4$ и $M_p 1.1$, като по-голямата част от събитията са с магнитудни оценки в интервала 1.5-3.5. Периодът на реализация на тези събития е малко повече от 30 дни. Пространствената картина на поредицата е представена на Фиг. 3.6



Фиг. 3.6 Пространствено разпределение на роев активност, реализирана през периода 12 януари – 16 февруари 2014 г.; 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 г.

Фигури (Фиг. 3.5 и Фиг. 3.6) показват, че събитията от двата роя се групира в много малка пространствена област, която не може да се привърже към дефинирана разломна структура. Най-слабите събития ($M_p < 2.0$) са концентрирани в същата област.

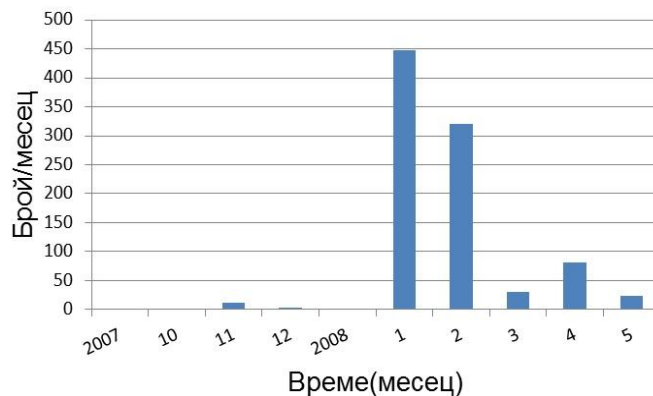
III.2. Времево разпределение на фор-афгършокова и роев тип активност

Времево разпределение на форшокова активност

В настоящото изследване са разгледани и представени времевите разпределения на две форшокови поредици. Форшоковата активност, предхождаща земетресенията: от 12.05.2008 г., в района на град Стражица – сеизмогенна зона Горна Оряховица, и от 24.05.2009 г., реализирано в сеизмогенна зона Валандово (извън територията на България).

Земетресение от 12.05.2008 г.

Земетресението от 12.05.2008 г. ($m_b 4.1$) е предхождано от изявена форшокова активност, включваща 922 събития, реализирани за период по малко от година. Само 7 от тези събития (с магнитуд в интервала $1.9 \leq M_p \leq 3.4$) са локализирани. По-голяма част от форшоците са много слаби и са регистрирани само от сеизмична станция Стражица (SZH)-най-близко разположената до епицентралната зона (на около 12 км) станция. Времето разпределение на форшоковите събития е представено на Фиг. 3.7

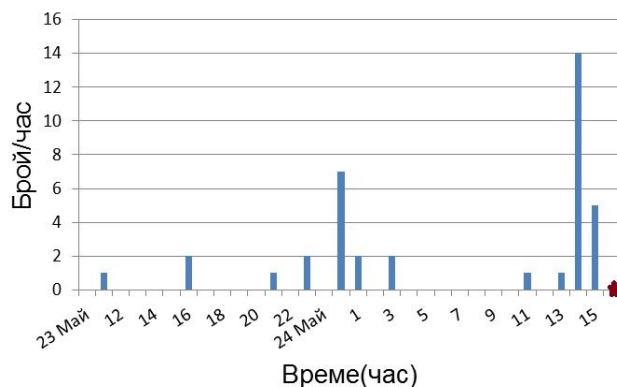


Фиг. 3.7 Времево разпределение (по месеци) на форшокова поредица преди земетресението от 12.05.2008 г.

На фигурата се открояват два месеца с много висока активност, след което активността намалява, но не се наблюдават асейзмични месеци (сейзмично затишие) преди реализацията на главното земетресение от 12.05.2008 г., с $m_b 4.1$.

Земетресение от 24.05.2009 г.

Земетресението от 24.05.2009 г. ($M_w 5.3$) е предхождано от изявена форшокова активност, включваща 39 събития (магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 4.3$), реализирани приблизително 24 часа преди основното събитие. Времето разпределение (по часове) на форшоковите събития е представено на Фиг. 3.8



Фиг. 3.8 Времево разпределение (по часове) на форшокова поредица преди земетресението от 24.05.2009 г. (със звезда е обозначено главното събитие)

От фигурата се вижда, че форшоковата активност е разделена на две групи, като между тях се наблюдава затишие от 7 часа. Минуты след втората форшокова група е реализирано главното земетресение без предхождащ асейзмичен интервал от време (затишие).

Времево разпределение на афтершокова активност.

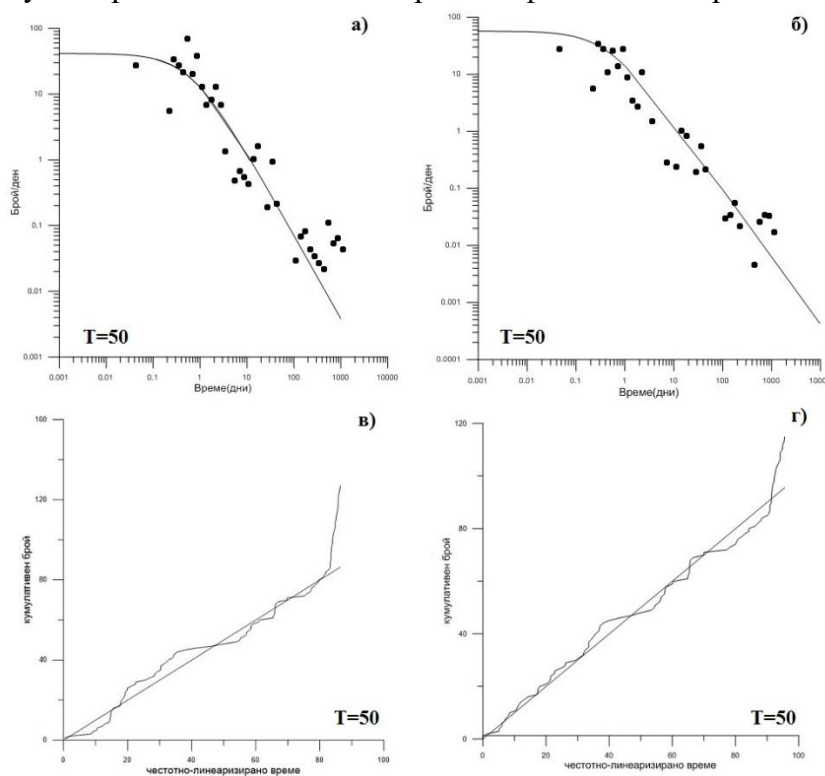
Изследвани са афтершоковите серии на 5 умерено силни земетресения с магнитуд $M_w \leq 5.6$, станали през настоящия (21ви) век в и около България. За четири афтершокови поредици, реализирани в Южна България и в трансграничния регион FYROM-България е

установено, че в първо приближение затихването на афтершоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Omori. Времето разпределение на афтершоковата активност след земетресението от 12.05.2008 г. ($m_b 4.1$), генерирано в района на град Стражица – сеизмогенна зона Горна Оряховица не е апроксимирано с модифицираната формула на Omori поради изключително малкия брой на уверено определените афтершокови събития.

В настоящата разработка са представени трите афтершоковите поредици с най-голям брой събития, генерирани в Южна България и околностите. За тези поредици е установена мултиполна активност с вторични серии.

Земетресение от 05.04.2002 г.

Земетресението от 05.04.2002 г. ($M_w 4.6$) е последвано от афтершокова активност, включваща 121 събития с магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 4.0$. Изследвани са два различни времеви интервала: (очаквана и наблюдавана продължителност, съответно $T=50$ дни и $T=1089$ дни) с и без магнитуден праг $M_a=2.0$. На Фиг. 3.9 е представено честотно-времето и честотно-линеаризираното разпределение за период от 50 дни с магнитуден праг, без магнитуден праг и с наличие на вторични афтершокови серии.



Фиг. 3.9 Честотно-разпределение на афтершоковите събития във времето: а) за период $T=50$ дни без магнитуден праг; б) за период $T=50$ дни с магнитуден праг; честотно-линеаризирано разпределение на афтершоковите събития: в) за период $T=50$ дни без магнитуден праг; г) за период $T=50$ дни без магнитуден праг, с две вторични серии (моделът в най-добро съответствие с наблюденията)

В таблица 3.1 са представени стойностите на параметрите **K**, **p**, **c** и на AIC за различните модели.

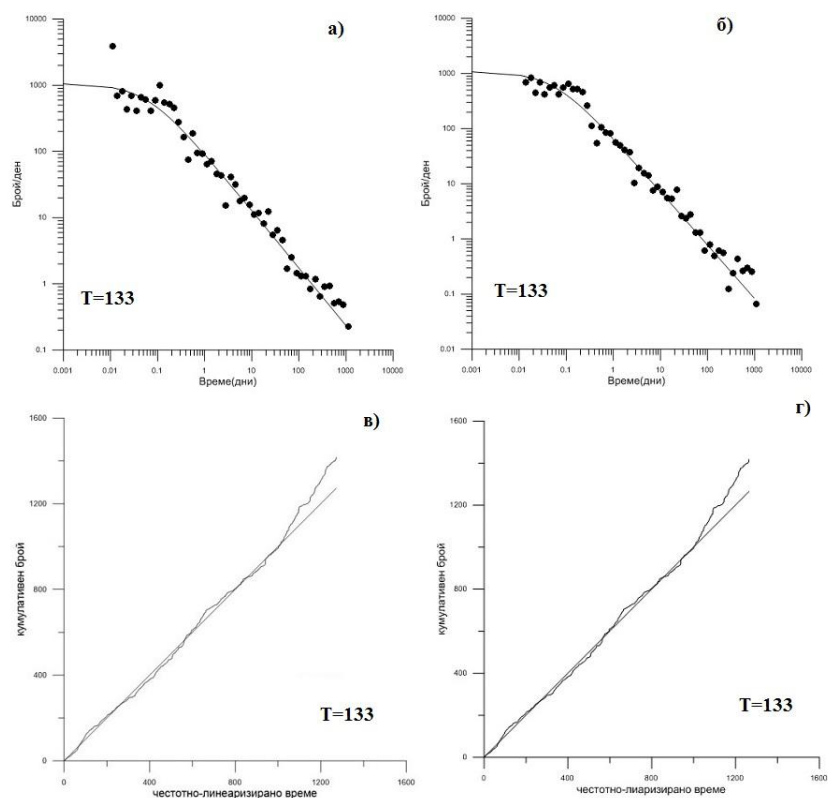
Табл. 3.1 Оценки на параметрите K, p, c и AIC-критерий за различни модели на поредици след земетресението от 05.04.2002 г.

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	1089	9.58	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 две вторични серии, без магнитуден праг	1089	3.35	0.81	0.03	2.87	0.81	0.01	0.99	0.81	0.01	406.97
С две вторични серии, с магнитуден праг M _a =2	1089	3.46	0.92	0.07	0.86	0.92	0.01	1.30	0.92	0.03	253.47
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

От получените резултати могат 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 афтершоковия процес затихва относително по-бързо; 3) от честотно разпределение следва, че в първо приближение затихването на афтершоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Omori; 4) наблюдава се преминаване към фонова сеизмичност около 378 дни след главното събитие. Установената продължителност на процеса значително превишава очакваната; 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.

Земетресение от 24.05.2009 г.

Земетресението от 24.05.2009 г. (M_w5.3) е последвано от изявена афтершокова активност, включваща 1417 събития с магнитуд в интервала 1.0≤M_p≤4.9. Афтершоковата активност е изследвана за два различни времеви интервала: (очаквана и наблюдавана продължителност, съответно T=133 дни и T=1088 дни) с и без магнитуден праг M_a=2.0. На Фиг. 3.10 е представено честотно-времето и честотно-линеаризираното разпределение за период от 133 дни с магнитуден праг, без магнитуден праг и с наличие на вторични афтершокови серии В таблица 3.2 са представени стойностите на параметрите **K**, **p**, **c** и стойности на AIC за различните модели.



Фиг. 3.10. Честотно-разпределение на афтершоковите събития във времето: а) за период $T=133$ дни без магнитуден праг; б) за период $T=133$ дни с магнитуден праг; честотно-линеаризирано разпределение на афтершоковите събития: в) за период $T=133$ дни без магнитуден праг; г) за период от $T=133$ дни с една вторична серия, без магнитуден праг $M_a=2$ (моделът в най-добро съответствие с наблюденията)

Табл. 3.2. Оценки на параметрите K , p , c и AIC - критерий за различни модели на поредици след земетресението от 24.05.2009 г.

Модел	Период (T)	K	P	c	K_1	p_1	c_1	AIC
Без вторична серия, без магнитуден праг	1088	84.23	0.81	0.04				-1885.05
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	1088	61.82	0.90	0.04				-1104.22
Без вторична серия, без магнитуден праг	133	93.69	0.87	0.06				-3559.64
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	133	68.00	0.97	0.06				-2254.27
С една вторична серия, без магнитуден праг	1088	83.25	0.82	0.04	1.13	0.82	0.0001	-1893.38
С една вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	1088	68.84	1.02	0.07	136.74	1.02	404.88	-1113.52
С една вторична серия, без магнитуден праг	133	92.71	0.88	0.06	1.02	0.88	0.0002	-3569.59
С една вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	133	67.61	0.97	0.06	0.47	0.97	0.0034	-2253.21

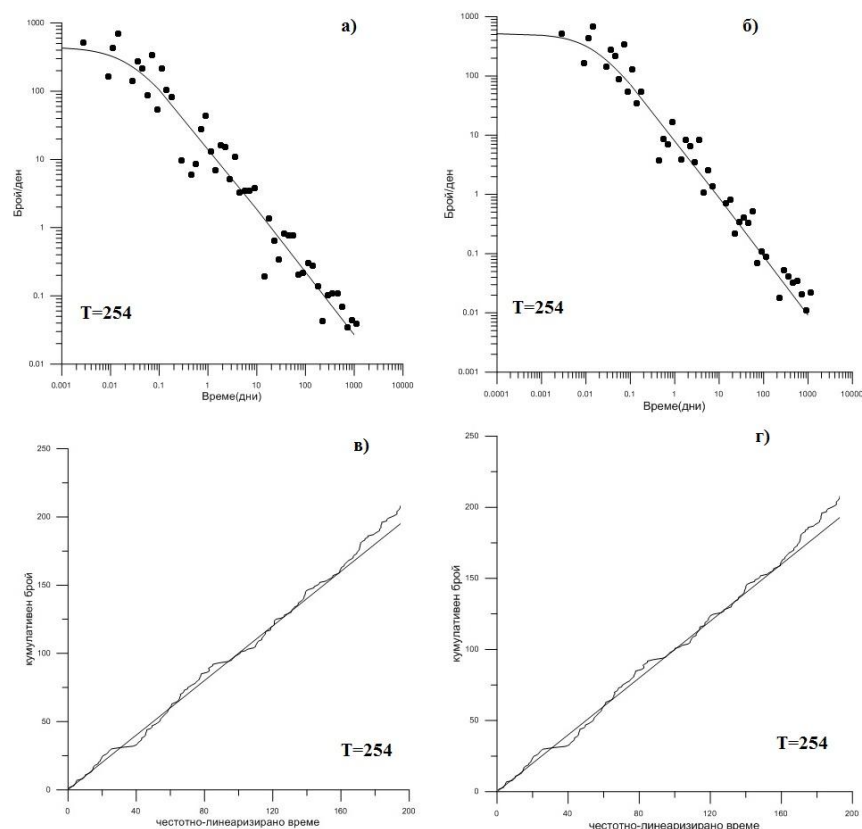
Получените резултати могат да се обобщят в следните заключения: 1) оценките и на трите параметъра се влияят от долния магнитуден праг M_a ; 2) оценките на параметъра p са в

средата на интервала от стойности на p ($p \in [0.71;1.17]$), получени за афтершокови поредици, реализирани на територията на България и околностите (Simeonova, Solakov, 1999); 3) от честотно разпределение следва, че в първо приближение затихването на афтершоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Omori; 4) моделът в най-добро съответствие с наблюденията (най-ниска стойност на AIC) е с една вторична серия за период $T=133$ дни, без магнитуден праг; 5) преминаване на афтершоковата активността към фонова сеизмичност се наблюдава около 341 дни след главното събитие. Трябва да се отбележи, че очакваната продължителност на афтершоковата поредица, е 133 дни и е приблизително 2.6 пъти по-малка от наблюдаваната.

Земетресение от 22.05.2012 г.

Земетресението от 22.05.2012 г. ($M_w 5.6$) е последвано от изявена афтершокова активност, включваща 209 събития с магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 4.4$. Афтершоковата активност е изследвана за два различни времеви интервала: (очаквана и наблюдавана продължителност, съответно $T=254$ дни и $T=1080$ дни) с и без магнитуден праг $M_a=2.0$. На Фиг. 3.11 е представено честотно-времовото и честотно-линеаризираното разпределение за период от 254 дни с магнитуден праг, без магнитуден праг и с наличие на вторични афтершокови серии. В таблица 3.3 са представени стойностите на параметрите K , p , c и стойности на AIC за различните случаи

Получените резултати, представени на Фиг. 3.11 и в Табл. 3.3, могат да се обобщят в следните заключения: 1) оценките и на трите параметъра се влияят от долния магнитуден праг M_a , параметрите K и c намаляват, докато параметърът p се увеличава с промяната на магнитудния праг; 2) оценките на параметъра p са в средата на интервала от стойности на p ($p \in [0.71;1.17]$), получени за афтершокови поредици, реализирани на територията на България и околностите (Simeonova, Solakov, 1999); 3) от честотно разпределение следва, че в първо приближение затихването на афтершоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Omori; 4) моделът в най-добро съответствие с наблюденията (най-ниска стойност на AIC) е с една вторична серия за период $T=254$ дни, без магнитуден праг. Този модел е представен на Фиг. 3.11. г); 5) преминаването на активността към фонова сеизмичност се наблюдава около 360 дни след главното събитие. Трябва да се отбележи, че очакваната продължителност на афтершоковата поредица е 254 дни и е превишена от наблюдаваната с около 100 дни.



Фиг. 3.11 Честотно-разпределение на афтершоковите събития във времето: а) за период $T=254$ дни без магнитуден праг; б) за период $T=254$ дни с магнитуден праг; честотно-линеаризирано разпределение на афтершоковите събития: в) за период $T=254$ дни без магнитуден праг; г) за период от $T=254$ дни с една вторична серия, без магнитуден праг $M_a=2$ (моделът в най-добро съответствие с наблюденията)

Табл. 3.3 Оценки на параметрите K , p , c и AIC - критерий за различни модели на поредици след земетресението от 22.05.2012 г.

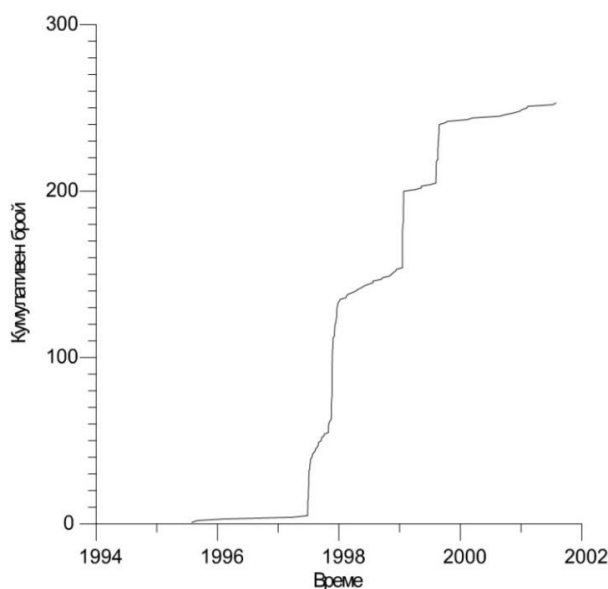
Модел	Период (T)	K	p	c	K_1	p_1	c_1	AIC
Без вторична серия, без магнитуден праг	1080	14.86	0.88	0.02				279.96
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	1080	8.30	0.94	0.01				143.95
Без вторична серия, без магнитуден праг	254	15.46	0.92	0.03				-93.51
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	254	8.57	0.99	0.02				-59.59
С една вторична серия, без магнитуден праг	1080	14.87	0.89	0.022	0.47	0.89	0.020	274.484
С една вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	1080	8.22	0.95	0.01	0.34	0.95	0.03	142.40
С една вторична без магнитуден праг серия	254	15.46	0.93	0.030	0.50	0.93	0.027	-99.694
С една вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	254	8.49	1.02	0.02	0.38	1.02	0.04	-62.44

Времево разпределение на роев тип активност

Роевият тип сеизмичност не се характеризира с главно земетресение и честотно-времево разпределение на поредицата не може да се моделира с модифицирана формула на Omori: $n(t)=K (c+t)^{-p}$.

Роев тип сеизмичност, реализирана през периода 1997-1999 г.

Тази поредица съдържа 240 земетресения с $M_p \geq 1.0$, реализирани в района на Рила, за период $T=822$ дни. От получените резултати при разглеждане времевото разпределение на събитията се установява, че той може да се раздели на три последователни роя, различни във времето. На фигура 3.12 е показано времевото разпределение на роевата активност за година и половина.



Фиг. 3.12. Времево разпределение на сеизмичността (по години), реализирана през периода 1996 – 2002 г (роевата активност е реализирана през период от 1997-1999 г.)

На фигурата ясно се различават трите поредици в роя. Поредицата демонстрира неравномерно разпределение във времето-бърза активизация (взрив на събития) и рязко затихване. След всеки един от роевете се преминава към сеизмичност със много по-малка скорост (брой за единица време) на реализация на земетресенията (т.н. фонов сеизмичност).

За трите поредици от роя е оценена стойността на b от релацията на Гутенберг-Рихтер (Gutenberg, Richter, 1942): $\log N = a - bM$. Стойността е оценена по метода на максимално правдоподобие (ММП), прилагайки формулите на Page (1968) и Utsu (1965). В Табл. 3.4 са представени оценките на параметъра, получени по двете релации, за всяка от трите серия, и за цялата поредица.

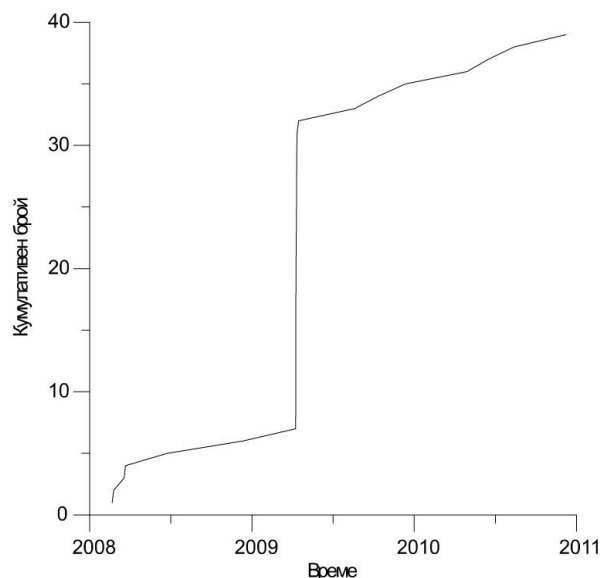
Табл. 3.4. Стойности на **b**, определени чрез релациите на Utsu (1965) и Page (1968) и изчислените грешки, за роев тип активност от 1997 г. – 1999 г. (в района на Рила планина)

Поредица (период)	Utsu	σ (Utsu)	Page	σ (Page)
I (06 ÷ 12 1997 г.)	0.74	0.09	0.56	0.07
II (16 ÷ 23.01.1999 г.)	0.92	0.17	0.76	0.14
III (07 ÷ 27.08.1999 г.)	0.94	0.23	0.71	0.17
Всички (1997 г. – 1999 г.)	0.82	0.07	0.69	0.06

Резултатите показват вариации на стойността на **b** с изявена тенденция за нарастване във времето. За целия рой стойността на **b** е близка до средното на оценките за отделните поредици. Установено е, че **b**-стойностите на сеизмични роеве, генерирани в континенталните области, варират от 0.8 до 1.0 (напр. Ibs-von Seht et al., 2008). Тук получените стойности на **b** за роев тип активност, реализирана през периода 1997 г. – 1999 г., също са под единица, т.е **b** < 1.

Роев тип сеизмичност, реализирана през 2009 г.

Тази поредица съдържа 291 събития, от които 27 земетресения са с $M_p \geq 1.0$, и са локализирани. По-голяма част от останалите събития (264 събития) са много слаби и са регистрирани само от сеизмична станция Кърджали (KDZ)-най-близко разположената до епицентралната зона (на около 18 км) станция. На фигура 3.13 е представено времевото разпределение по години на сеизмичността в региона, реализирана през периода 2008-2011 г., включващо роевата активност през 2009 г.



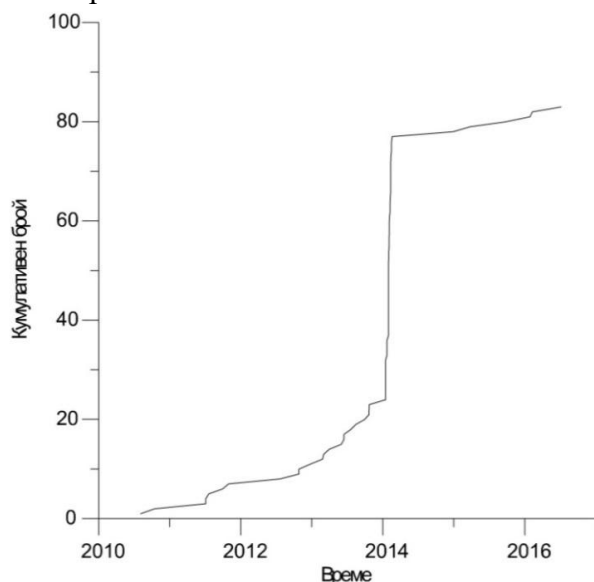
Фиг. 3.13. Времево разпределение на сеизмичността (по години), реализирана през периода 2008 – 2011 г. (роевата активност е реализирана през 2009 г.)

Роевата активност през 2009 г. се откроява много ясно на фигурата – рязко нарастване на броя реализирани земетресения за кратък период от време (няколко дни). Времето разпределение на реализираните събития (наклонът на кривата) преди реализацията на роя

(след началото на 2009 г.) е много близко до това, което се наблюдава след роевата активност (след април 2009 г.).

Роев тип сеизмичност, реализирана през 2014 г.

Тази поредица съдържа 47 събития с $M_p \geq 1.0$, като най-високият магнитуд от поредицата е $M_p 3.4$. На фигура 3.14 е представено времевото разпределение по години на сеизмичността в района на град Пловдив, реализирана през периода 2010-2016 г., включващо роевата активност през 2014 г. (за период от 38 дни). Роевата активност през 2014 г. се откроява много ясно на фигурата – рязко нарастване на броя реализирани земетресения за кратък период от време (няколко дни). Времевото разпределение на реализираните събития (наклонът на кривата) преди реализацията на роя (в началото на 2014 г.) е много близко до това, което се наблюдава след роевата активност (след февруари 2014 г.). След реализацията на роя е установено преминаване към фонова сеизмичност. Добре изразеният наклон (тренд) в началото на поредицата е почти еднакъв с този в след реализацията на роя.



Фиг. 3.14. Времево разпределение (по години) на сеизмичността, реализирана през период от 2010 – 2016 г. (роевата активност е реализирана през 2014 г.)

IV. СПЕКТРАЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ВХОДНИ ДАННИ И ПРИЛОЖЕНА МЕТОДИКА

Спектралният анализ на сеизмичните вълни, представлява един от най-важните източници на информация за земетръсното огнище и средата на разпространение. Спектърът на сеизмичните вълни може да се използва за оценки на огнищните параметри и средата в която се разпространяват вълните, такива като например: сеизмичният момент, радиуса на източника, свалено напрежение (stress drop); магнитуд по сеизмичен момент M_w ; сеизмичното затихване Q и др. Спектралните характеристики могат да се използват и за определяне ниво на фонов шум, както и за определяне характеристики на почвата.

Спектралните характеристики представляват важни, характерни особености на излъчените от източника сеизмични вълни. Съществуващите различни модели за сеизмичните източници се основават на теориите и хипотези за сеизмогенния процес, разработени от автори като Knopoff (1959), Haskell (1964), Aki (1966,1967), Brune (1970) и др.

В много от съвременните изследвания се прилага моделът на Brune (1970). Използвайки този модел се изчисляват някои характеристики, свързани с източника на земетресението, такива като сеизмичен момент (M_0), свалено напрежение ($\Delta\sigma$), радиус и площ на източника и др. Моделът е широко използван и е доказано, че е в добро съответствие с наблюдения от региони с различни тектонски условия.

IV.1. Входни данни и приложена методика

За изследване спектралните характеристики за фор-афтьршокова и роев тип сеизмичност, реализирана на територията на България и околностите е приложена методика, която следва модела на Brune (1970). Използвана е програма, базирана на модела на Brune за изчисляване някои параметри, които са оценени по спектрите за Р и S вълни. Определени са параметрите на огнището като: свалено напрежение $\Delta\sigma$ и радиуса на източника. Разгледана е представителна извадка от събития за сериите представени в Глава 2 на настоящата работа. Разгледани са спектрите на преместване на 35 събития от различни поредици (форшоци, афтьршоци и роеве). Разгледаните събития са реализирани през периода 2006 - 2015 г. Земетресенията са генерирани на територията на България и близките околности. Като основни източници на информация за разгледаните земетресения са използвани данни от Националната Оперативна Телеметрична Система за Сеизмологична Информация (НОТССИ) след 2005 г.

В изследването са генерирани спектри за Р-вълни и S- вълни. За всяко събитие са използвани входни данни от минимум пет станции. Като за всяка станция са направени спектри по Z, N, E компоненти. Стойностите на параметрите на сеизмичните източници са оценени по методиката представена по долу.

За определянето на средния радиус на източника и сваленото напрежение (**stress drop**) са приложени следните формули:

За Р-вълна средният радиус, R_P , се определя чрез:

$$R_P = \frac{v_p \cdot 3.36}{2\pi \cdot f_0}, \quad (4.1)$$

където f_0 е ъгловата честота в Hz, v_p е скоростта на Р-вълна.

За S- вълната средният радиус на източника R се определя по идентична релация:

$$R_s = \frac{v_s \cdot 2.34}{2\pi \cdot f_0} \quad (4.2)$$

За сметото напрежение за Р- и S- вълните са в сила следните формули:

$$\Delta\sigma_p = \frac{7}{16} \frac{M_{0p}}{R_p^3} \quad (4.3)$$

$$\Delta\sigma_s = \frac{7}{16} \frac{M_{0s}}{R_s^3} \quad (4.4)$$

където R_p и R_s са средният радиус за Р- и S- вълните.

V. ОЦЕНКА НА СПЕКТРАЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ФОР-АФТЪРШОКОВА И РОЕВ ТИП АКТИВНОСТ

Спектралният анализ на обемните сеизмични вълни съдържа информация за параметрите на сеизмичния източник, физичните свойства на средата и сеизмогенните процеси, протичащи в нея.

В проведеното изследване са определени спектралните характеристики на 35 събития от различни поредици (форшоци, афтършоци и роеве). За всяко земетресение са генерирани спектри по преместване за Р и S -вълни, като са използвани записите от трите компоненти (Z - спектри за Р-вълна; Z, N и E- спектри за S - вълна) на различен брой станции. Общо са генерирани 1160 спектъра. За трите компоненти на всяка станция спектралното плато е определено по различен брой точки. В десния ъгъл на всеки спектър са посочени броят точки, по които е определено платото, стойността на спектралното плато и ъгловата честота.

Чрез програма, базирана на модела на Вгупе са оценени параметри на земетръсното огнище-свалено напрежение, радиус и площ на сеизмичния източник.

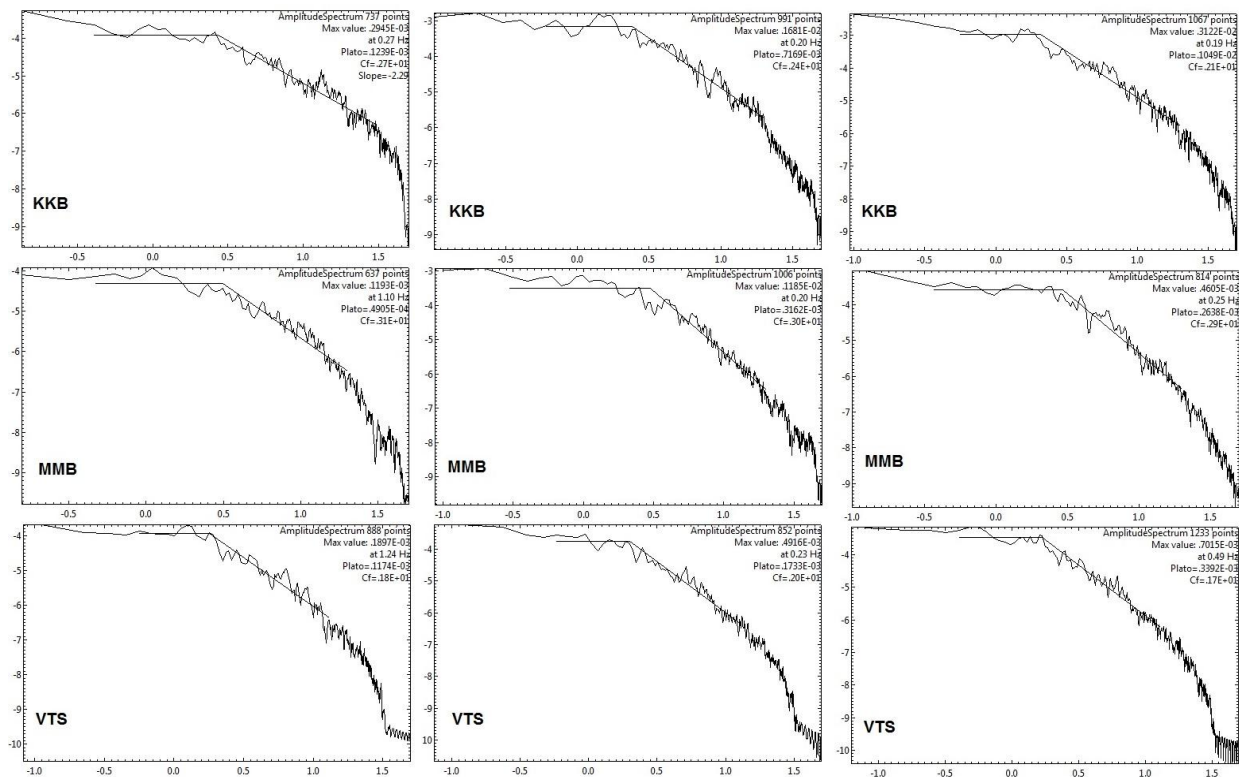
В настоящата разработка са представени спектри за: времевата поредица форшокова серия-главно събитие-афтършокова серия, генерирани през 2009 г. в сеизмогенна зона Валандово; главното земетресение от 2012 и афтършоковата поредица (генерирани в сеизмогенна зона София); сеизмични роеве, генерирани през 2009г. и 2014 г. (съответно в сеизмогенни зони Източни Родопи и Марица). Представени са спектри за най-силните събития от фор-афтършоковите поредици и роевете, генерирани по записите на 3 от близките до епицентъра станции.

В таблиците са дадени оценките на параметрите на сеизмичния източник за всички анализирани събития от фор-афтършоковите и роевите клъстери.

Земетресение от 24.05.2009 г., фор-афтършокови поредици

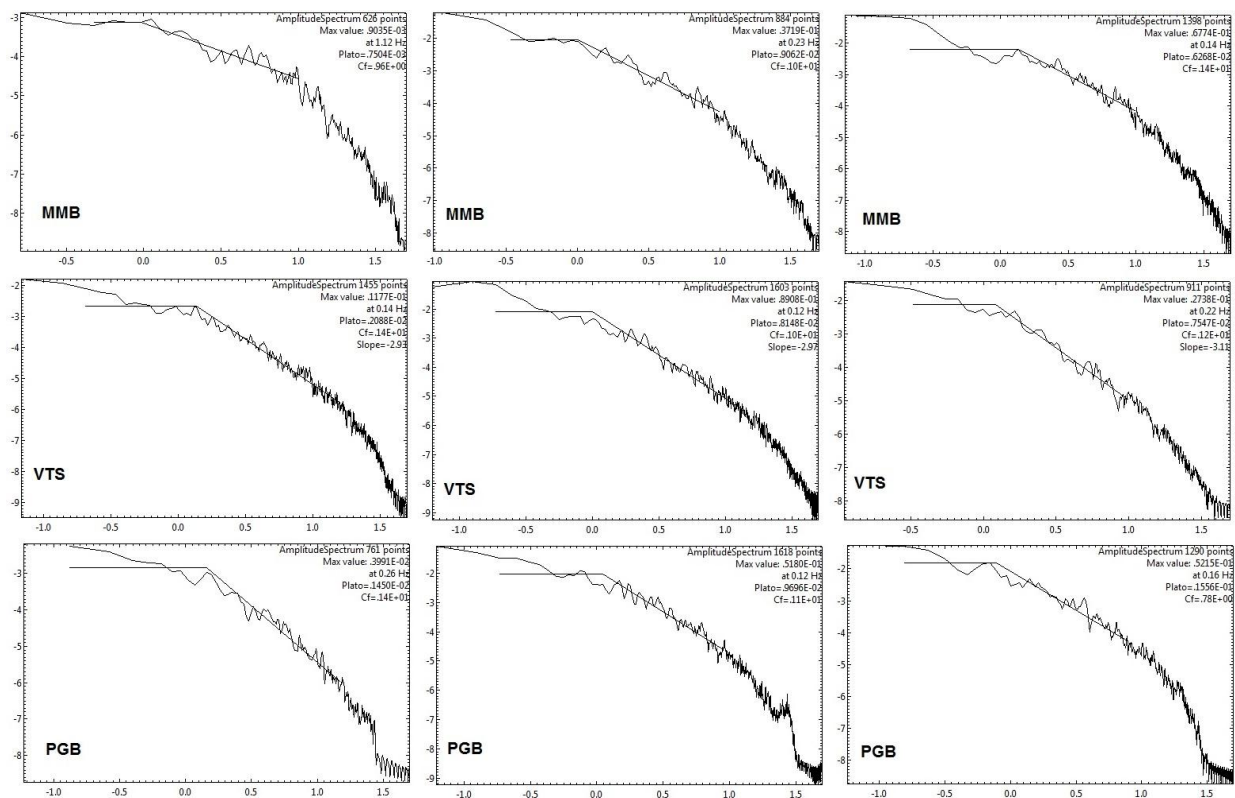
От поредиците, реализирана преди и след земетресението от 24.05.2009 г. с магнитуд $M_w 5.3$, в сеизмогенна зона Валандово (извън територията на България са анализирани 5 форшока, главното събитие и пет от по силните афтершокови събития. Получените резултати за параметрите на сеизмичните източници са представени в таблица 5.1.

За най-силното форшоково събитие от 24.05.2009 г., $T_0=14:29:15$ с $M_p 4.3$ са генерирани 44 спектъра от 11 станции. На Фиг.5.1 са представени спектрите, генерирани по записите на 3 от близките до епицентъра станции.



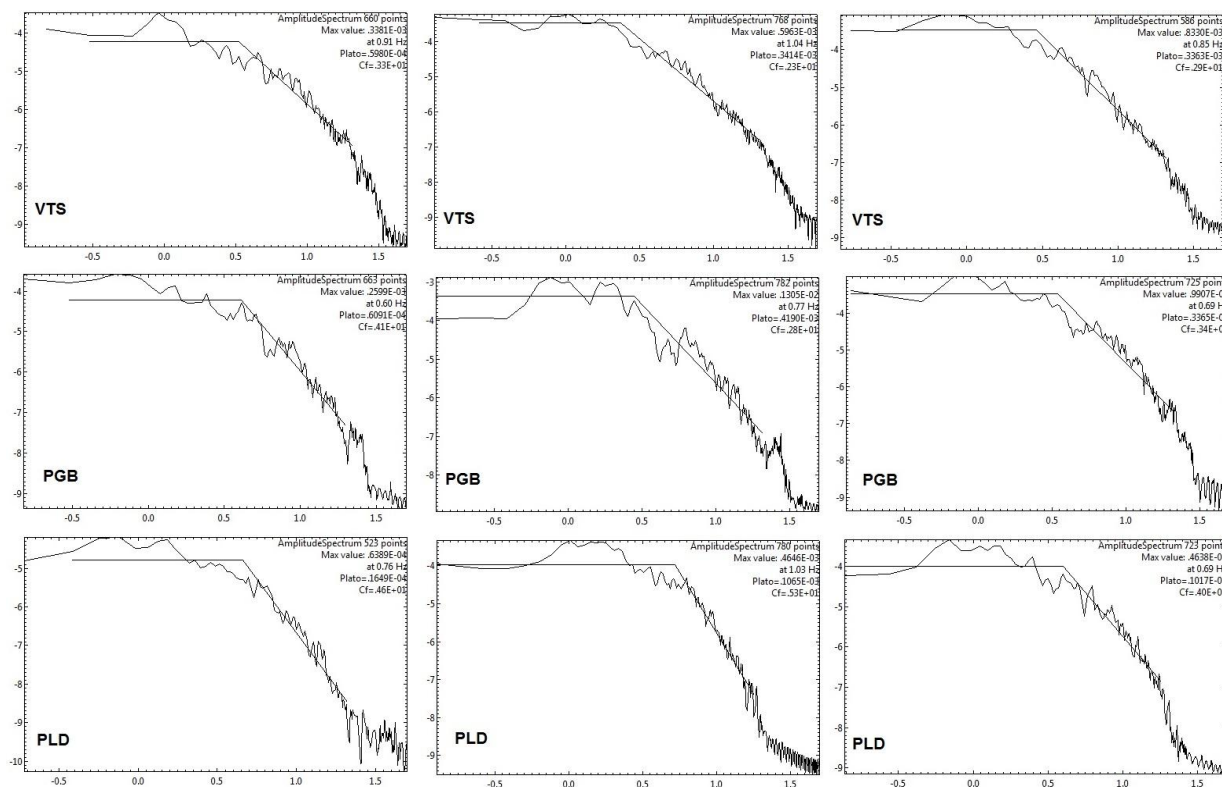
Фиг. 5.1 Спектри (за Р и S – вълна) за форшоковото събитие от 24.05.2009 г., $T_0=14:29:15$, генерирани по записите на 3 от станциите, регистрирали земетресението

За главното земетресение от 24.05.2009 г., $T_0=16:17:50$ и $M_w 5.3$ са направени 44 спектъра от 11 станции. На Фиг.5.2 са представени спектрите, генерирани по записите на 3 от близките до епицентъра станции.



Фиг. 5.2 Спектри (за Р и S – вълна) на главното земетресение от 24.05.2009 г., $T_0=16:17:50$, генерирани по записи на 3 от станциите, регистрирали събитието

За събитието от 24.05.2009 г., $T_0=16:23:08$ и $M_p 4.6$ (един от първите, най-силни афтершоци) са направени 44 спектъра от 11 станции. На Фиг.5.3 са представени спектрите, генерирани по записите на 3 от близките до епицентъра станции.



Фиг. 5.3 Спектри (за Р и S – вълна) за афършока от 24.05.2009 г., $T_0=16:23:08$, генерирани по записите на 3 от станциите, регистрирали земетресението

В Табл.5.1 са представени оценките на параметрите на сеизмичните източници за всички събития от изследваните поредици. Резултатите показват, че форшоковата серия се характеризира с най-ниска стойности на снетото напрежение и радиус на източник, което е в съответствие с резултати, получени и от други автори (напр. Chen, 2013). Стойностите на снетото напрежение за форшоковата активност са в диапазона $1.5 \div 14$ бара за Р-вълна и $2 \div 36$ за S-вълна, а радиусът на източника в диапазона $0.2 \div 0.7$ км за Р- и S-вълна. С най-висока стойност $\Delta\sigma$ се характеризира главното земетресение, 36 бара за Р-вълна и 79 бара за S-вълна, което е очаквана стойност за умерено силно земетресение (напр. Jens Havskov and Lars Ottemöller, 2010). Стойностите за радиуса на източника за главното събитие са най-високи - над 1.3 км. Афършоковата серия се характеризира с по-ниски стойности на $\Delta\sigma$ и радиус на източника, от тези на главното събитие. Стойностите на $\Delta\sigma$ са в диапазона $15 \div 25$ бара за Р-вълна и $32 \div 72$ за S-вълна, а радиусът на източника между $0.4 \div 1.0$ км за Р- и S-вълна. Получените стойности са в съответствие с резултатите, получени от други автори за афършокови серии (напр. Crempien и Archuleta, 2011).

Табл. 5.1 Оценки на параметрите на сеизмичните източници за главното земетресение и по-силните фор-афгършокови събития, генерирани през 2009 г. в сеизмогенна зона Валандово

Дата Ден месец година	Координати $\varphi(^{\circ})/ \lambda(^{\circ})$	Н (км)	М	$\Delta\sigma_p$	Радиус на източник (км)	Площ на източник (sq.km)	$\Delta\sigma_s$	Радиус на източник (км)	Площ на източник (sq.km)
24.05.2009 г.	41.28/22.68	20	2.8	1.53	0.32	0.36	2.10	0.26	0.22
24.05.2009 г.	41.33/22.71	8	3.2	2.94	0.46	0.74	7.20	0.33	0.31
24.05.2009 г.	41.35/22.71	8	4.3	12.29	0.68	1.71	36.47	0.49	1.02
24.05.2009 г.	41.33/22.73	2	4.1	14.33	0.47	0.85	33.32	0.44	0.62
24.05.2009 г.	41.30/22.72	8	3.0	3.20	0.29	0.31	4.30	0.20	0.14
24.05.2009 г.	41.32/22.74	5	5.3	36.03	1.47	7.07	78.81	1.25	4.98
24.05.2009 г.	41.32/22.74	5	4.6	25.21	0.62	1.75	56.92	0.45	0.66
24.05.2009 г.	41.32/22.71	7	4.1	14.63	0.41	0.65	36.59	0.34	0.44
24.05.2009 г.	41.32/22.74	7	5.0	25.70	1.00	3.61	72.18	0.70	1.59
25.05.2009 г.	41.31/22.67	4	4.0	25.68	0.44	0.68	32.32	0.38	0.55
01.06.2009 г.	41.27/22.73	5	4.3	20.31	0.58	1.12	37.01	0.54	1.04

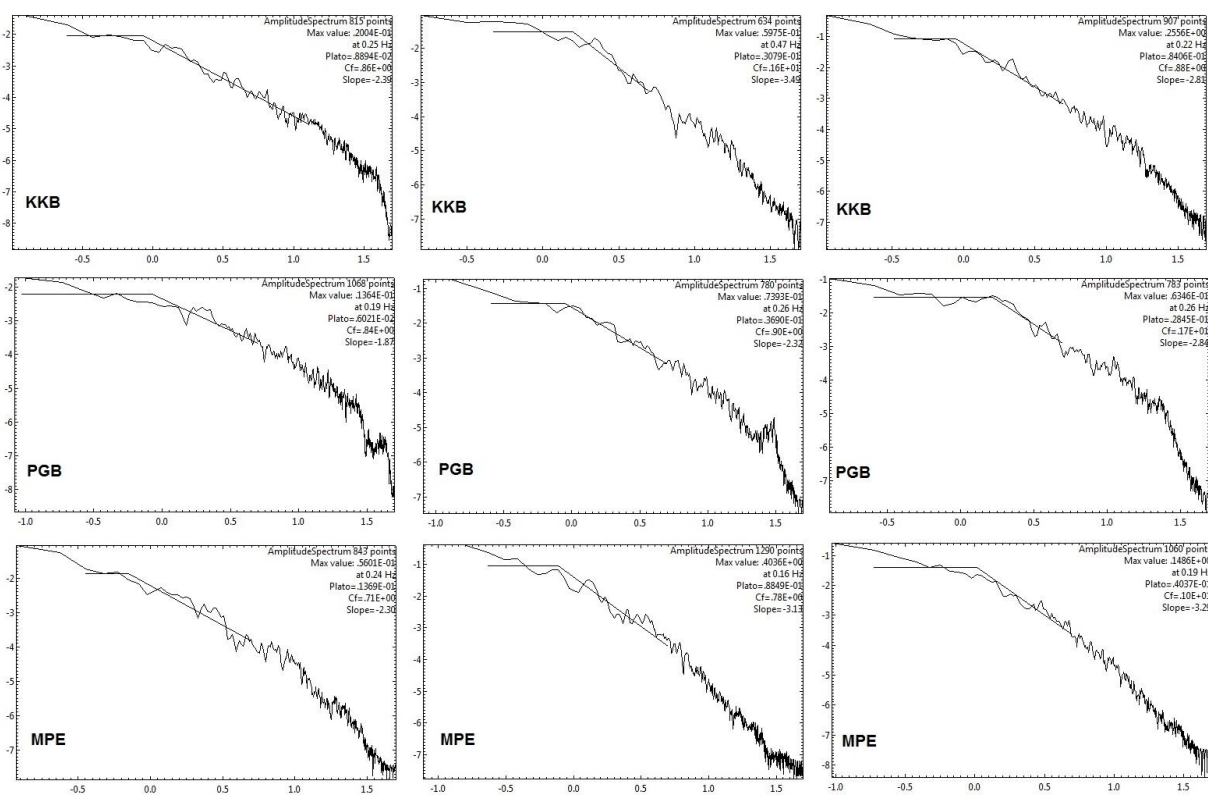
Земетресение от 22.05.2012 г. и афгършокова поредица

От серията, реализирана след земетресението от 22.05.2012 г. с $M_w 5.6$, в Софийска сеизмогенна зона са анализирани пет афгършокови събития. Афгършоковите събития са с магнитуд в интервала от $4.2 \div 4.5$. За всяко от земетресенията са генерирани спектри по преместване за Р и S -вълни, като са използвани записите от трите компоненти (Z-спектри за Р-вълна; Z, N и E-спектри за S-вълна) на станции, регистрирали събитията. Получените резултати за параметрите на сеизмичните източници за главното земетресение и петте афгършокови събития са представени в таблица 5.2.

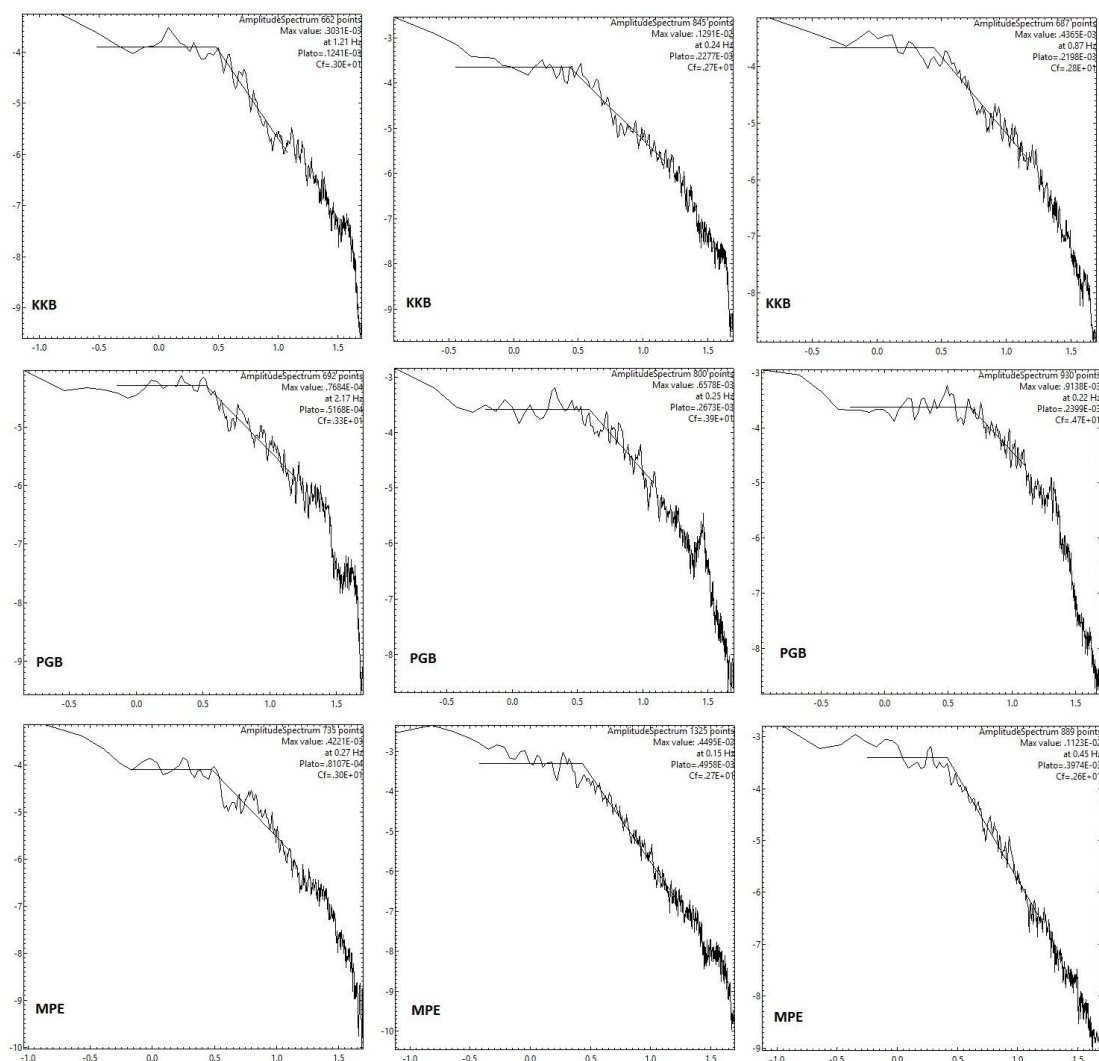
В настоящото изследване са представени спектрите на главното земетресение и най-силният афгършок (Фиг.5.4 и Фиг.5.5), генерирани по записите на 3 от близките до епицентъра станции.

За главното събитие от 22.05.2012 г., $T_0=00:00:30$ с магнитуд $M_w 5.6$ са генерирани 52 спектъра, използвайки записите от трите компоненти (Z, N, E) на 13 станции. На Фиг.5.4 са представени спектрите по записите на 3 от станциите, регистрирали земетресението.

За най-силното афгършоково събитие от 20.02.2012 г., $T_0= 01:30:50$ с магнитуд $M_p 4.9$ са генерирани 44 спектъра, използвайки записите от трите компоненти (Z, N, E) на 11 станции. На Фиг. 5.5 са представени спектрите по записите на 3 от станциите, регистрирали земетресението.



Фиг. 5. 4 Спектри (за Р и S – вълна) на главното земетресение от 22.05.2012 г., $T_0=00:00:30$, генерирани по записи на 3 от станциите, регистрирали събитието



Фиг. 5. 5 Спектри (за Р и S – вълна) за афтершока от 22.05.2012 г., $T_0=01:30:50$, генерирани по записите на 3 от станциите, регистрирали земетресението

Табл. 5.2 Оценки на параметрите на сеизмичния източник за главното земетресение и по-силните афтершокови събития от 2012 г., генерирани в Софийска сеизмогенна зона

Дата Ден месец година	Координати $\varphi(^{\circ})$ $\lambda(^{\circ})$	Н (км)	М	Брой станции	$\Delta\sigma_p$	Радиус на източник (км)	Площ на източник (sq.km)	$\Delta\sigma_s$	Радиус на източник (км)	Площ на източник (sq.km)
22.05.2012 г.	42.58/ 23.02	14	5.6	13	53.05	2.24	16.34	555.7	1.23	4.98
22.05.2012 г.	42.58/ 22.96	7	3.2	13	3.77	0.65	1.40	14.26	0.36	0.50
22.05.2012 г.	42.58/ 23.00	13	4.9	11	17.95	0.94	2.83	41.78	0.73	1.74
22.05.2012 г.	42.58/ 23.02	7	3.2	7	2.34	0.33	0.37	2.68	0.30	0.29
22.05.2012 г.	42.58/ 23.07	12	4.5	13	22.00	0.51	0.94	45.74	0.36	0.48
14.07.2012 г.	42.58/ 23.06	13	4.6	13	26.41	0.52	0.87	64.58	0.41	0.54

Получените стойности на снето напрежение за главното земетресение за Р-вълната (53 бара) са в очаквания диапазон за умерено земетресение, каквото е събитие от 22.05.2012 г.

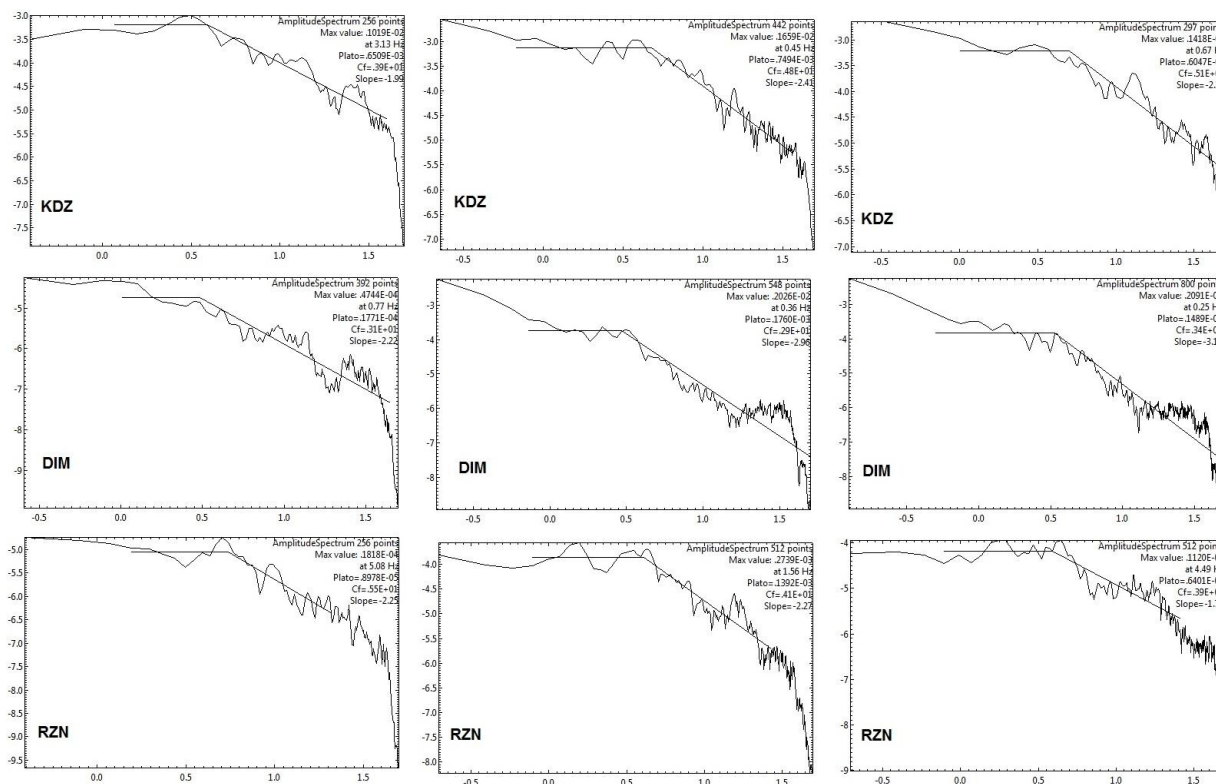
(M_w 5.6). Резултатите, получени за снето напрежение за S-вълната (560 бара) са пет пъти над очакванията и се различават значително от стойностите получени за умерено силни земетресения. Това е индикация за особеност на сеизмогенните процеси и физичните свойства на средата, в която е реализирано земетресението. Стойностите на снетото напрежение на последвалата го афтершокова серия са по-ниски от тази на главното събитие. Те варират в диапазона $2 \div 26$ бара за Р-вълната и между $3 \div 65$ бара за S-вълната, стойностите за радиуса на източника са: $0.3 \div 0.9$ км за Р-вълна и от $0.3 \div 0.7$ за S-вълна.

Сеизмичен рой, реализиран през 2009 г.

От серията, реализирана през месец април 2009 г. в района на град Кърджали (част от сеизмогенна зона Източни Родопи), са разгледани 5 събития. Представените събития са реализирани в началните часове на серията и са с магнитуд в интервала $3.1 \div 3.5$. Оценените параметри на сеизмичния източник за всяко от събитията са дадени в Табл. 5.3, в хронологичен ред.

В настоящото изследване са представени (Фиг.5.6) спектрите за най-силното събитие, генерирани по записите на 3 от близките до епицентъра станции.

За събитието от 09.04.2009 г., $T_0 = 06:35:26$ с магнитуд $M_p 4.1$ са генерирани 32 спектъра, използвайки записите от трите компоненти (Z, N, E) на 8 станции. На Фиг.5.6 са представени спектрите по записите на 3 от станциите, регистрирали събитието.



Фиг. 5.6 Спектри (за Р и S – вълна) за събитието от 09.04.2009 г., $T_0=06:35:26$, генерирани по записите на 3 от станциите, регистрирали земетресението

Табл. 5.3 Оценки на параметрите на сеизмичния източник за събитията от роя, генериран 2009 г. в района на град Кърджали

Дата Ден месец година	Координати $\varphi(^{\circ})/\lambda(^{\circ})$	Н (км)	М	Брой станции	$\Delta\sigma_p$	Радиус на източник (км)	Площ на източник (sq.km)	$\Delta\sigma_s$	Радиус на източник (км)	Площ на източник (sq.km)
08.04.2009 г.	41.73/25.25	12	3.5	8	4.79	0.40	0.53	10.35	0.34	0.40
08.04.2009 г.	41.73/25.27	8	3.3	5	3.02	0.20	0.13	3.14	0.21	0.15
08.04.2009 г.	41.72/25.28	13	3.5	7	9.51	0.19	0.11	7.29	0.20	0.13
09.04.2009 г.	41.74/25.26	13	4.1	8	13.43	0.46	0.73	19.98	0.35	0.47
09.04.2009 г.	41.72/25.27	9	3.4	5	9.74	0.18	0.10	7.94	0.18	0.10

Представените събития в Табл. 5.3 са с приблизително еднакъв магнитуд в интервала $3.3 \div 4.1$. Оценените стойности на снето напрежение са в диапазона $3 \div 13$ бара за Р-вълна и $3 \div 19$ бара за S- вълна, а стойности за радиус на източника в диапазона $0.1 \div 0.7$ км за Р-вълна и $0.18 \div 0.35$ км за S- вълна. Снетото напрежение и радиусът на източника са в диапазона на резултатите, получени за роева сеизмичност в други изследвания (напр. Süle, 2010).

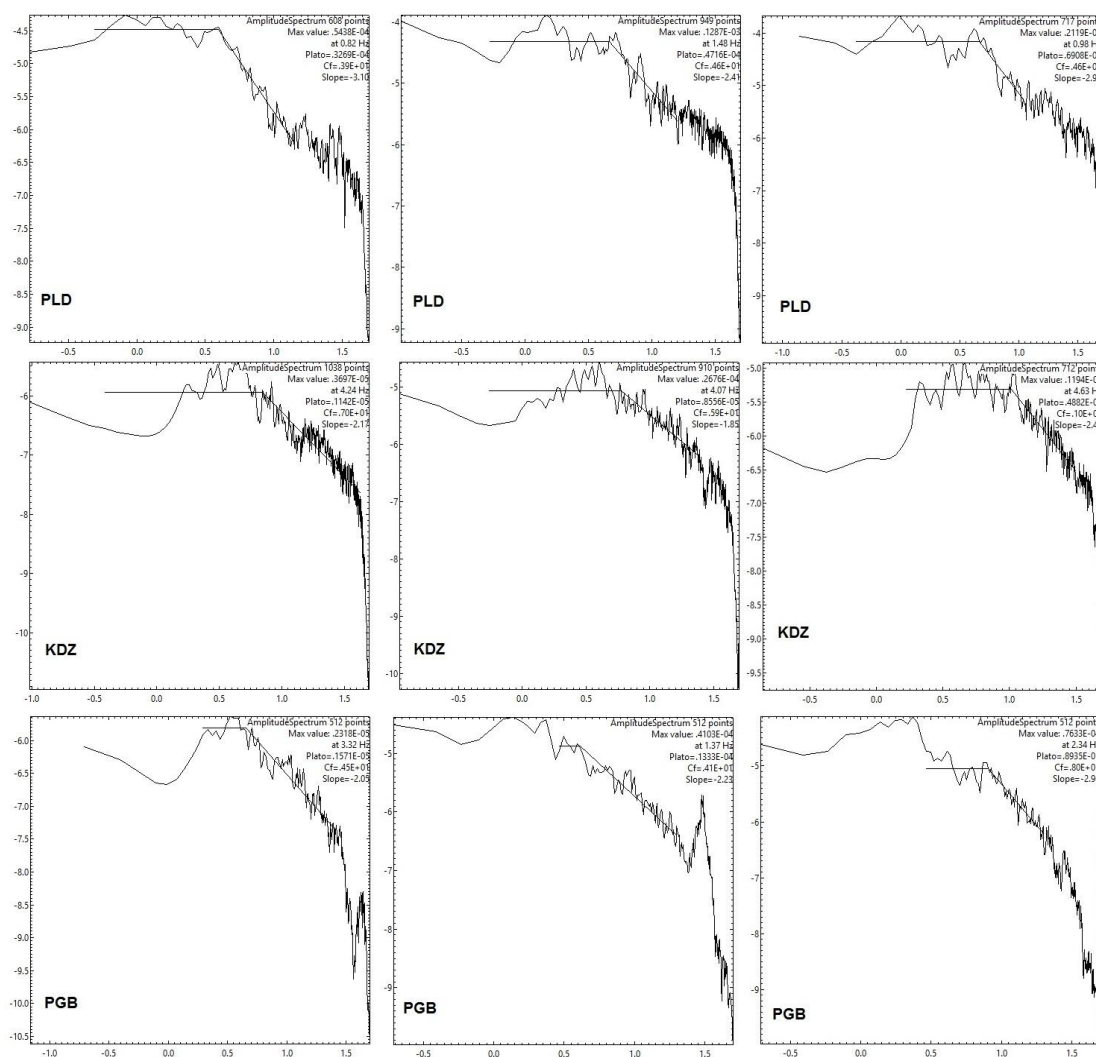
Сеизмичен рой, реализиран през 2014 г.

От серията, реализирана през месеците януари-февруари 2014 година, в близост до град Пловдив (сеизмогенна зона Марица) са разгледани 5 събития. Представените събития са с магнитуд в интервала $2.7 \div 3.4$. За всяко земетресение са генерирани спектри по преместване за Р и S -вълни, като са използвани записите от трите компоненти (Z-спектри за Р-вълна; Z, N и E-спектри за S -вълна) на станциите, регистрирали събитията.

За най-силното събитие от 29.01.2014 г., $T_0 = 05:05:10$ и M_p 3.4 са направени 32 спектъра от 8 станции. На Фиг. 5.7 са представени спектрите на 3 от разгледаните станции по Z, N, E компоненти на най-силното събитие от серията.

Оценените параметри на сеизмичния източник за всяко от събитията са представени в Табл. 5.4, в хронологичен ред.

Представените събития в Табл. 5.4 са събития от роев тип, с магнитуд в интервала $2.7 \div 3.4$. Получените стойности на снето напрежение са в диапазона $3 \div 11$ бара за Р-вълна и $5 \div 24$ бара за S- вълна, а стойности за радиуса на източника варират от 0.17 до 0.3 км за Р-вълна и от 0.13 до 0.3 за S- вълна. Оценените параметри са в очаквания диапазон и са в съответствие с резултатите, получени от други автори (напр. Shearer, 2006; Süle, 2010; Bhat, 2013).



Фиг. 5.7 Спектри (за Р и S – вълна) за събитието от 29.01.2014 г., $T_0=05:05:10$, генерирани по записите на 3 от станциите, регистрирали земетресението

Табл. 5.4 Оценки на параметрите на сеизмичния източник за събития от роя, реализирана в близост до град Пловдив през 2014 г

Дата Ден месец година	Координати $\varphi(^{\circ})$ / $\lambda(^{\circ})$	H (km)	M	Брой станции	$\Delta\sigma_p$	Радиус на източник (km)	Площ на източник (sq.km)	$\Delta\sigma_s$	Радиус на източник (km)	Площ на източник (sq.km)
14.01.2014 г.	41.92/24.54	18	3.2	5	3.46	0.17	0.09	4.7	0.13	0.05
14.01.2014 г.	41.91/24.53	17	3.1	8	10.99	0.22	0.16	24	0.20	0.13
29.01.2014 г.	41.91/24.53	20	3.4	9	3.73	0.34	0.39	14.7	0.28	0.25
02.02.2014 г.	41.93/24.49	8	2.8	7	3.87	0.20	0.14	9.31	0.17	0.08
09.02.2014 г.	41.92/24.53	20	2.7	6	3.73	0.24	0.16	9.47	0.22	0.16

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Земетресенията са неравномерно разпределени в пространството и времето. Изследването на пространствено-времето 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 не случаен елемент на сеизмичността. Изявени и разпознаваеми клъстери от земетресения са фор-афтьршоковите поредици и сеизмичните роеве. Форшоковите събития са група от слаби земетресения, предхождащи по-силното главно събитие. Ако могат да бъдат разпознати преди реализацията на главното събитие, те представляват полезен инструмент за прогнозиране на силни земетресения. Афтьршоковите събития са поредица от по-слаби земетресения, които се реализират непосредствено след главното събитие. Една от феноменалните характеристики на афтьршоковия процес е затихването му във времето по обратен степенен закон (модифицирана формула на Omori), докато повечето от физичните процеси затихват експоненциално във времето. Роят е земетръсен клъстер от събития с приблизително еднакъв магнитуд, групирани в пространството и времето. В много случаи тези групи от събития не се характеризират с изразено главно земетресение.

Изследването върху пространствено-времето разпределение и спектралните характеристики на фор-афтьршокова и роев тип активност, реализирана на територията на България и близките околности, е проведено въз основата на формирана база сеизмологични данни от стандартизирани, информационни файлове, включващи 6 умерено силни земетресения с магнитуд по сеизмичен момент по-малък или равен на 5.6 ($M_w \leq 5.6$), над 961 форшокови събития, 3051 афтьршокови събития и 578 земетресения от три сеизмични роя.

Чрез анализ на получените резултати се достига до следните заключения за пространствено-времето разпределение и спектралните характеристики на фор-афтьршокова и роев тип активност:

1. В първото, за територията на България и близките околности, изследване върху пространственото разпределение на трите вида поредици са установени следните особености:
 - пространственото разпределение на форшоковите събития, реализирани преди земетресението от 24 май 2009 г., генерирано в сеизмогенна зона Валандово (разположена в трансграничен регион FYROM- България) показва, групиране на форшоковите събития в сравнително малка област, разположена в близост до единия

край на разпозната разломна структура. По тази структура в последствие се генерират главното земетресение и най-силните афтершокови събития;

- пространствената картина на афтершоковата активност при разгледаните 4 афтершокови поредици показва, че най-силните афтершокови събития се групират в сравнително малка област около главното събитие по или в близост до дефинирани разломни структури. Афтершоковата област нараства с времето и намаляване на магнитуда. Слабите афтершокови събития ($M_p < 3.0$) са силно диспергирани в пространството;
- при два, от изследваните три роя, земетресенията (включително и най-слабите с $M_p < 2.0$) се групират в много малка пространствена област, която не може да се привърже към дефинирана разломна структура. При третия рой събитията се групират, в близост до разпозната разломна структура, а част от най-слабите събития са генерирани по самата структура.

2. Времето разпределение на фор-афтершоковата и роевата активност се характеризира със следните особености:

- при разгледаните две форшоковите поредици не се наблюдава прогностично сеизмично затишие преди реализацията на главното събитие;
- чрез моделиране на афтершоковия процес във времето се оформя следната картина за района на България и близките ѝ околности:
- за афтершоковите поредици, реализирани в Южна България и в трансграничния регион FYROM-България е установено, че в първо приближение затихването на афтершоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Omori. Афтершоковият процес затихва относително бавно със стойности на параметъра p (оценени по ММП), вариращи в интервал $[0.80; 1.03]$. Оценките на p са в средата на интервала от стойности на параметъра ($p \in [0.71; 1.17]$), получени за афтершокови поредици след силни земетресения, реализирани на територията на България (Simeonova, Solakov, 1999). За разгледаните афтершокови поредици е установена мултиполна активност с една или повече вторични серии (това потвърждава резултати от изследвания върху афтершоковата активност в южна България, представени напр. в Simeonova, Solakov, 1999). За три от сериите е установена продължителността на афтершоковата активност (преминаване от афтершокова активността към фонова сеизмичност). При трите афтершокови поредици наблюдаваната продължителност значително превишава очакваната (определена по релацията, представена в Христосков, Лазаров, 1981).
- за двете афтершокови серии, генерирани в Северна България и сеизмогенна зона Шабла затихването на афтершоковия процес не е моделирано с модифицираната формула на Omori, поради редуциран брой на афтершоковите събития. Изключително ниското ниво на афтершоковата активност след земетресението с $M_w 5.0$ потвърждава

резултати от предходни изследвания (напр. Симеонова С., 1999)-сеизмогенна зона Шабла не се характеризира с изявена афтершокова активност

- за поредиците от роев тип е установено неравномерно разпределение във времето - бърза активизация (взрив на събития) преди и рязко затихване след реализацията на най-силните събития. След роевата поредицата сеизмичната активност бързо преминава към фонова сеизмичност. За роя, реализиран 1997 -1999 г., е оценен параметърът b -наклон на магнитудно-честотната зависимост (Gutenberg, Richter, 1942). Получените оценки на параметъра са в съответствие с хипотезата, че b -стойностите на сеизмични роеве, генерирани в континенталните области са <1.0 (напр. в Ibs-von Seht et al., 2008). Проследени са времевите вариации на стойността на параметъра b , установена е изявена тенденция за нарастване във времето.

3. За първи път са изследвани спектралните характеристики на фор-афтершокова и роев тип сеизмичност, реализирана на територията на България и близките околности след 2006 г. Чрез програма, базирана на модела на Brune са оценени параметри на земетръсното огнище (свалено напрежение, радиус и площ). Параметрите са оценени по спектрите на Р и S вълни (общо са генерирани 1160 спектъра). Установени са следните особености за параметъра на сеизмичния източник свалено напрежение ($\Delta\sigma$), който зависи от физични свойства на средата и сеизмогенните процеси, протичащи в нея:

- роевият тип активност се характеризира с най-ниски стойности на сваленото напрежение ($\Delta\sigma$). Средната стойност на сваленото напрежение за събитията от разгледаните роеве е около 7 бара по Р-вълна и около 11 бара по S-вълна;
- форшоковите събития се характеризират с най-ниска стойност на сваленото напрежение от поредицата форшок-главно събитие – афтершок. Оценките за свалено напрежение ($\Delta\sigma$) достигат до 14 бара по Р-вълна и 36 бара по S-вълна;
- при афтершоковите събития сваленото напрежение достига до 25 бара по Р-вълна и до 72 бара по S-вълна;
- за основните събития, най-общо, получените стойности на сваленото напрежение по Р-вълна достигат до 30 бара, а по S-вълна до 78 бара.

ЛИТЕРАТУРА

- Akaike, H., (1974). On entropy maximization principle. IEEE Trans. Autom. Control AC-19, 716-723.
- 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.
- Aki, K. (1965). Maximum Likelihood estimate of b in the formula $\log N=a-bM$ and its Confidence Limits. Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ., 43, 237-239.
- Aki, K. (1966). Generation and propagation of G-waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G-wavespectrum, Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ., 44, 73-88.
- Aki, K. (1967). Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., 72(4), 1217–1231.
- Bhat (2013). Estimation of Source Parameters of Local Earthquakes in Jammu and Kashmir, India. International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 3, Issue 2, ISSN 2250-3153

- Bowman, J. and C. Kisslinger (1984). A test of foreshock occurrence in the Aleutian Arc, *Bull. Seism. Soc. Am.* 74, 181-198.
- Brune, J. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009.
- Chen, X. (2013). Aspects of earthquake triggering and seismicity clustering. UC San Diego Electronic Theses and Dissertations.
- Christoskov L., L. Dimitrova, D. Solakov (2012). Digital broadband seismometers of NOTSSI for practical magnitude determinations of P waves. *BGS. Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences*, 65 (5), 653-660.
- Contadakis, M. E. and Asteriadis, G. (2001). Recent results of the research for preseismic phenomena on the underground water and temperature in Pieria, northern Greece, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 1, 165-170, doi:10.5194/nhess-1-165-2001.
- Credner, H., (1876). Das vogtländisch-erzgebirgische Erdbeben vom 23. November 1875. *Z. Ges. Naturwiss.* 48, 246-269.
- Crempien, J. and R. Archuleta (2011). Stress drop variability and site effects at the Borrego Valley downhole array. 4th IASPEI / IAEE International Symposium: August 23-26, 2011 · University of California Santa Barbara
- Dieterich, J. (1978). Time dependent friction and the mechanics of strike-slip. *Pure Appl Geophys.*, 116, 790-806.
- Eneva M., G.L. Pavlis (1988). Application of pair analysis statistics to aftershocks of Morgan Hill, California, earthquake, *J. Geophys. Res.*, vol.93, No.B8, pp. 9113-9125
- Eneva M., M.W. Hamburger (1989). Spatial and temporal patterns of earthquake distribution in Soviet Central Asia: application of pair analysis statistics, *BSSA*, vol.79, No.4, pp. 1457-1476
- Fischer, T. et al. (2014). Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: A review, *Tectonophysics* 611, 1-27.
- 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, B., and C. Richter (1949). *Seismicity of the Earth*. Princeton Univ. Press.
- Habermann, R. E.; McCann, W. R.; Perin, B. (1986). [Spatial Seismicity Variations Along Convergent Plate Boundaries](#), *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society Issue: 1*, 43-68, Volume: 85
- Hainzl, S. and Fischer, T. (2002). Indications for a successively triggered rupture growth underlying the 2000 earthquake swarm in Vogtland/NW-Bohemia, *J. Geophys. Res.*, 107, 2338, doi:10.1029/2002JB001865.
- Haskell, N. (1964). Total energy and energy spectral density of elastic wave radiation from propagating faults, *Bull. Seism. Soc. Am.* 54, 1811-1841.
- Ibs-von Seht, M., Plenefisch, T., and Klinge, K. (2008). Earthquake swarms in continental rifts -A comparison of selected cases in America, Africa and Europe, *Tectonophysics*, 452, 66-77
- Jens Havskov and Lars 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.
- Jones, L. (1984). FORESHOCKS (1966-1980) IN THE SAN ANDREAS SYSTEM, CALIFORNIA, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 74, No. 4, pp. 1361-1380.
- Jones, L. M., and P. Molnar (1979). Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on faults, *J. Geophys. Res.*, 84(B7), 3596-3608.
- Kagan, Y. Y., and L. Knopoff (1978). Statistical study of the occurrence of shallow earthquakes, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 55, 67- 86.
- Kanamori, H. (1981). The nature of seismicity patterns before large earthquakes, in: *Earthquake Prediction – An International Review*, AGU Geophys. Mono. Series 4, Washington DC, 1-19.
- KNOPOFF and GILBERT (1959). RADIATION FROM A STRIKE-SLIP FAULT, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 49, No. 2, pp. 163-178
- Mikumo, 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.
- 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.
- Mogi, K (1967). Earthquakes and fractures. *Tectonophysics*, 5, 35-55.
- Mogi, K (1969). Relationship between the occurrence of great earthquakes and tectonic structures, *Bull Earthquake Res. Inst*, Tokyo Univ. 47, 429.
- Molchan, G. M., Kronrod, T. L., and Nekrasova, A. K. (1999). Immediate foreshocks: time variation of the b-value, *Phys. Earth Planet. Int.*, 111, 229-240.

- 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.
- Omori, F. (1894b). On after-shocks earthquakes. *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 7, 111-200.
- Page, R. (1968). Aftershocks and microaftershocks, *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 1131-1168.
- Papadopoulos, G. A., Drakatos, G., and Plessa, A. (2000). Foreshock activity as a precursor of strong earthquakes in Corinthos Gulf, Central Greece, *Phys. Chem. Earth*, 25, 239–245.
- Shearer, P. M., G. A. Prieto, and E. Hauksson (2006), Comprehensive analysis of earthquake source spectra in southern California, *J. Geophys. Res.*, 111, B06303, doi:10.1029/2005JB003979.
- Simeonova S., D. Solakov (1999). Temporal characteristics of some aftershock sequences in Bulgaria, *Annali di Geofisica*, 42,5, 821-832.,
- Simeonova S., D. Solakov (2000). Temporal characteristics of the 1904 Kresna earthquake aftershock sequence in Reports on Geodesy, Politechnika Warszawska, Inst. Geodezji i Astronomii Geodezyjnej, 4(49), 39-49. *re des Sci*, 51,1-2, 49-52.,
- Sobolev, G. A (1999). Precursory phases of large Kamchatkan earthquakes, *Volcanol. Seismol.*, 21, 497–509.
- Solakov et al., (2016). SEISMOLOGICAL ANALYSIS OF THE 2012 Mw5.6 2016 EARTHQUAKE IN SOFIA SEISMIC ZONE. 69, 2016, 67-74.
- Spicak, A. (2000). Earthquake swarms and accompanying phenomena in intraplate regions: a review, *Stud. Geophys. Geod.*, 44, 89–106.
- Süle (2010). Spectral source parameters for weak local earthquakes in the Pannonian basin, *Cent. Eur. J. Geosci.*, 2(4), 475-480
- Suzuki, Y. (1979). Records of Foreshocks, Private pub. (in Japanese)
- Sykes, L. R. (1970). Earthquake swarms and sea-floor spreading, *J. Geophys. Res.*, 75, 6598–6611.
- UTSU, T. and SEKI, A. (1955). Relation between the area of afterhock region and the energy of the main shock. *Zisin (J. Seism. Soc. Jap.)* ii, 7, 233-240, (in Japanese with English summary).
- UTSU, T. (1957). Magnitude of earthquakes and occurrence of their aftershocks. *Zisin (J. Seism. Soc. Jap.)* ii, 10, 35-45, (in Japanese).
- Utsu, T. (1961). A statistical study on occurrence of aftershocks. *Geoph. Mag.*, 30, 521-605.
- Utsu, T. (1965). A method for determining the value of b in the formula $\log n = a - bM$ showing the magnitude-frequency relation for earthquakes (with English summary). *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.* 13, 99-103.
- Utsu, T. (1969). Aftershocks and earthquakes statistics (I)- Some parameters which characterize an aftershock sequence and their interaction. *J. Fac. Sc. Hokkaido Univ., Ser. VI. (Gephys)*, 3, 129-195.
- Utsu, T. (1970). Aftershocks and earthquakes statistics (II) -Further investigation of aftershocks and other earthquake sequences based on a new classification of earthquake sequences. *J. Fac. Sc. Hokkaido Univ., Ser. VI. (Gephys)*, 3, 197-266.
- Vere-Jones D. (1978). Earthquake prediction - a statistician's view, *J. Phys. Earth.*, 26, pp. 129-146
- Yamashita, T. (1999). Pore creation due to fault slip in a fluid-permeated fault zone and its effect on seismicity, *Pure Appl. Geophys.*, 155, 625–647.
- Вацов С. (1902). Земетресенията в България през XIX век, Д. П., С. 94.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. (1987) Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.. Наука. 101с.
- Симеонова С. (1999). Изследване на афтершоковия процес на територията на Централни Балкани (България и близките ѝ околности, автореферат, С. стр.38
- Солаков Д. (1993). Един алгоритъм за определяне на основните кинематични параметри на близки земетресения, БГС, XIX, 1, 56-69.
- 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.

ПРИНОСИ

1. В първото, за територията на България и близките околности, изследване върху пространствено разпределение на фор-афършокова и роев тип активност е установено:

- Групиране на форшоковите събития в област, разположена в непосредствена близост до единия край на разломна структура, по която в следствие се генерират главното земетресение и най-силните афършокови събития;
- Силните афършокови събития се групират в сравнително малка област около главното събитие, по или в близост до дефинирани разломни структури. Областта нараства с времето и намаляване на магнитуда;
- При два, от разгледаните три роя, земетресенията са концентрират в много малка пространствена област, която не се привързва към дефинирана разломна структура.

2. Установени са следните особености във времето разпределение на разгледаните времеви клъстери:

- При форшокови поредици не се наблюдава прогностично сеизмично затишие преди реализацията на главното събитие;
- Затихването на афършоковите серии, реализирани в Южна България и околностите, в първо приближение, се описва с модифицираната формула на Omori. Получените резултатите, за тези поредици, показват относително бавно затихваща мултиполна активност с наблюдавана продължителност, значително превишаваща очакваната;
- За поредиците от роев тип е установено бърза активизация преди и рязко затихване след реализацията на най-силните събития. За роя, реализиран през периода 1997 - 1999 г., са установени времеви вариации с изявена тенденция за нарастване във времето на стойността на параметъра b (наклон на магнитудно-честотната зависимост).

3. За първи път са изследвани спектралните характеристики на фор-афършокова и роев тип сеизмичност. Оценени са параметри на земетръсното огнище, прилагайки програма, базирана на модела на Brune. За сваленото напрежение ($\Delta\sigma$), параметър на сеизмичния източник, зависещ от физични свойства на средата и сеизмогенните процеси, протичащи в нея, е установено:

- Най-ниски стойностите на сваленото напрежение ($\Delta\sigma$) за роев тип активност;
- Форшоковите събития се характеризират с най-ниска стойност на сваленото напрежение ($\Delta\sigma$) от времевата поредица форшок-главно събитие – афършок, а $\Delta\sigma$ е с най-висока стойност за главните земетресения.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Raykova P., 2013. Temporal characteristics of the 2012 Pernik earthquake aftershock sequence, Bulgarian Geophysical Journal, Vol. 39, 52-58

Simeonova S., D. Solakov, I. Aleksandrova, P. Raykova, V. Protopopova, 2015. The 2012 Mw5.6 earthquake in Sofia seismic zone and some characteristics of the aftershock sequence, Bulgarian Chemical Communications, Volume 47, Special Issue B (pp. 398–405).

Solakov D., S. Simeonova, L. Hristoskov, P. Raykova, M. Popova, 2015. Space-temporal variations of seismicity in Sofia seismic zone during the period 1985-2014, (in bulgarian). Seventh National Conference on Geophysics with international participation „Geophysics 2015”, 20-23 May 2015, Sofia, Bulgaria, CD available.

СПИСЪК НА ДОКЛАДИТЕ ПО ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИЯТА

Solakov D., S. Simeonova, I. Georgiev, P. Raykova, L. Dimitrova and V. Protopopova, A detailed study of the Pernik (Bulgaria) seismic sequence of 2012, EGU General Assembly 2014, held 27 April- 02 May, 2014 in Vienna, Austria

Райкова Пл., М. Попова, Анализ на афтершоковата активност след земетресението от 22 май 2012 г. в Софийска сеизмична зона, Национален научен семинар, гр. Хисаря

Raykova P., S. Simeonova, D. Solakov, Space-time distribution of foreshock, aftershock and swarm activity in and near Bulgaria, 35rd General Assembly of the European Seismological Commission, Trieste, Italy