

ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ С МАГНИТУД $M_w > 5.0$, РЕАЛИЗИРАНИ В СЕИЗМОГЕННА ЗОНА СОФИЯ СЛЕД 1900 Г.

Пл. Райкова, С. Симеонова, Д. Солаков,, И. Александрова

¹ Национален институт по геофизика, геодезия и география – БАН, София 1113, ул. Акад. Г. Бончев, бл. 3; dimos@geophys.bas.bg; plamena.raikova@gmail.com; stelas@geophys.bas.bg; i.alex@abv.bg

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.6

Резюме: Територията на България е част от земетръсно опасните области на Земята. Столицата на България – град София, е разположена в сеизмогенна зона София. Градът е индустриален и културен център на България, характеризира се с голяма плътност на населението (около 1.2 милиона жители) и високо ниво на сеизмичния риск. В изследването са представени най-силните земетресения (с $M_w > 5.0$), генерирани в сеизмогенна зона София след 1900 г. Първото сеизмично събитие с магнитуд по сеизмичен момент $M_w = 5.7$ е реализирано в началото на 20^{ти} век на 18 октомври 1917 г. Почти един век по-късно (95 години след земетресението от 1917 г.), на 22 май 2012 г. в сеизмогенна зона София е генерирано второ земетресение с $M_w = 5.6$.

Ключови думи: силни земетресения, магнитуд, интензивност

Въведение

Сеизмичността, генерирана в България е неравномерно разпределена в пространството и времето. Земетресенията в пространството се концентрират в определени географски области, наречени сеизмогенни зони. Всяка една от тези зони се характеризира със своя специфика в сеизмотектонски, геоложки и геофизичен аспект. Зоните са дефинирани на базата на пространственото разпределение на сеизмичността, идентифицираните геоложки и геофизични структури, и възможните огнищни зони, предложени в Bonchev et al. (1982). Наблюдаваната за територията на страната сеизмичност може да бъде асоциирана към основните сеизмогенни зони: Кресна, София, Марица, Горна Оряховица и Шабла, които са дефинирани в

редица изследвания за сеизмичността (като например Sokerova et al., 1992; Dachev et al., 1995; Simeonova et al., 2006).

От анализа на дълбочинното разпределение (Bonchev et al., 1982; Sokerova et al., 1992; Dachev et al., 1995) е установено, че земетресенията на територията на страната са корови събития ($h < 60$), локализирани предимно в горната част на Земната кора на дълбочина до 20-25 km.

В настоящата работа са представени най-силните земетресения (с $M_w > 5.5$), реализирани в сеизмогенна зона София след 1900 г. и последствията от тях в град София.

София е столица и най-голям град в България, който е разположен в централната част на Западна България, в Софийска сеизмогенна зона. Историята на София започва преди седем хиляди години. Градът е едно от най-старите човешки селища в Европа, а неговите многобройни исторически и архитектурни паметници съхраняват мъдрости от един вековен културен опит. Градът е наследник на древната римска крепост „Сердика“, която в началото на 2^{ри} век сл.н.е. прераства в регионален център на Римската империя, а в края на 3^{ти} век се превръща в столица на новосъздадената провинция Вътрешна Дакия (Dacia Mediterranea).

София е град с богато архитектурно наследство, включващо римски, византийски и средновековни български сгради, запазени в централната част на града. В края на 19^{ти} век се налага модерният по това време стил в Европа – сецесион. По-късно, през първите години на 20^{ти} век, стилът, примесен с форми и влияние от български архитекти с местното архитектурно наследство, се оформя като национално-романтичен български сецесион.

В своето многовековно развитие София винаги е имал важна роля в историята на българските земи като средищен център, естествено кръстовище на пътищата свързващи Изтока със Запада, както и страните на север от България с тези на юг от нея. Понастоящем градът е най-големият административен, индустриален, транспортен, културен и университетски център на България.

Сеизмотектонски характеристики

Тектонската обстановка в източното Средиземноморие е доминирана от колизията на Арабската и Африканската плочи с Евроазиатската (напр. в McKenzie 1970; Jackson and McKenzie 1984, 1988). Моделите за движение на континенталните плочи показват, че Арабската плоча се движи в север-северозападна посока спрямо Евразия със скорост от около 18–25 mm/y. Африканската континентална плоча се движи в северна посока спрямо Евразия със скорост от около 10 mm/y. Африканската плоча се подпхва (субдукция) по Гръцката дъга под Евроазиатската плоча

Сложното взаимодействие на плочите и свързаните с тях деформации на земната кора в източносредиземноморския регион се изразява в множество разрушителни земетресения (McKenzie, 1970; и Jackson and McKenzie, 1984, 1988).

Предполага се съществуването на Егейска микроплоча и наличие на преходна зона между Евроазитската континентална плоча и Егейската микроплоча – така на-

реченият Южнобалкански екстезионен район, със северна граница Стара планина. Територията на България се намира в северната част на Южнобалканския екстезионен район. За региона е установена екстензия с доминираща посока север-юг, като стойностите на хоризонталните скорости се увеличават от север на юг.

Град София, разположен в Софийска котловина, е заобиколен от три планини – Витоша, Люлин и Стара планина. Софийска котловина, намираща се в централна западна България е формирана на пресечницата на Задбалканския и Маришкия грабенови комплекси. Геоморфоложкото оформяне на Софийската котловина е свързано с развитието на Софийската грабенова структура, ограничена от север и юг с разседи.

Съвременната тектоника на централна западна България се определя от неотектониката на района, в която доминират процесите на екстензия с генерална посока север-юг, в резултат на което, създадените активни разломни структури имат посока изток-запад до северозапад-югоизток. Детайлно проучване на активните разломи в района на югозападна България и в епицентралната зона на Пернишкото земетресение през 2012 г. е направено, съответно от Георгиев (2010) и Радулов и др., (2012). Геоструктурите в Софийски басейн са изследвани от Радулов и др. (2011).

В тектонско отношение разломните структури са с преобладаващо СЗ-ЮИ направление. Като най-съществени са тези, които ограничават Софийския грабен.

Софийският грабен е ограничен от север от Задбалканската разломна система. По тези разломи става издигане на Стара планина и понижаване на Софийското поле, а в източна посока са образувани Задбалканските грабени (полета). От юг, Софийското поле е ограничено от разломи с разседен характер - Витошки и Лозенски. Районът на юг от град София се счита за най-изявен в структурно-геоморфоложко отношение и наличие на сеизмотектонска активност.

Сеизмогенна зона София е разположена в централната част на Западна България. От сеизмологична гледна точка Софийска котловина е част от тази зона. Наличните исторически документи показват, че през периода 15^{ти} - 18^{ти} век в Софийска зона са ставали силни земетресения с разрушителен ефект върху град София и околностите му (Вацов, 1902). Преди 19^{ти} век, сведенията за усетените земетресения в София са твърде оскъдни, защото по това време София е малък град, разположен дълбоко във вътрешността на отоманската империя. През 19^{ти} век, в близост до град София се реализират две силни събития. Първото с интензивност $I_0=8-9^{\text{та}}$ MSK64 (Скала на Медведев-Шпонхоер-Карник (MSK64)) се е случило на 23 март (4 април) 1818 г. Най-силното земетресение, в исторически и съвременен план, станало в Софийска сеизмогенна зона, е събитието от 30(18) септември 1858 г. ($I_0=9$ МШК64). Земетресението е нанесло сериозни щети в града и е довело до появата на термални извори в западната му част (Вацов, 1902).

Земетресението от 18.10.1917 г.

Земетресението от 18 октомври 1917 г. с $M_w=5.7$ и $I_0=7-8^{\text{ма}}$ MSK64 е най-силното събитие, реализирано в околностите на град София през 20^{ти} век. За това земетресение съществуват подробни описания и изследвания, представени в Иванов (1931), Киров (1931) и Петков, Христосков (1965).

Земетресението е предхождано от няколко по-слаби труса. Усетен е трусът, регистриран около 40 минути преди главното събитие, за което Киров (1931) пише „Въ 20 18 16 се почувства в целия град силно вертикално земетресение, предшествувано и придружено от силно, подземно бучене, подобно на изгърмяването едновременно на множество далечни топове..“. След това събитие е реализирано главното земетресение: „Същата вечер въ 20 57 41 силно...земетресение..., което продължи окло 4 секунди и се предшества и придружаваше от подзмно бучение по-силно от първото“ (Киров, 1931).

„Голяма паника беше обзела цялото население. Хората бягаха изплашени по улиците и дворовете и никои не смееше да влезе отново в къщи...Мнозина прекараха три и повече денонощия на открито“ (Иванов, 1931).

Главният удар е регистриран от много сеизмологични станции в Европа, най-близката, от които е Атина на 526 km, най - далечната е Упсала на 1849 km от София.

Земетресението е придружавано от много силно подземно бучене. Според очевидци „...много силно бучене, прилично на приближаващ ураганъ, което бучене продължи даже много малко и слд свършването на труса“. Някои от жителите на София са разказвали, че при главното събитие са забелязали светене над града (Иванов, 1931).

Земетресението е нанесло значителни повреди върху сградите в София. Според Ради Иванов (1931), „...всички къщи въ София бяха подложени тъй да се каже на изпитъ.“

Най-пострадалата част от града е кварталът между улиците „булевардъ „Цар Освободител“ и „Графъ Игнатиевъ“ и северната страна на булевардъ; Фердинандъ“, въ онази му част, която минава покрай зоологическата градина, и улица „Левски“..“ „Значителните повреди, станалите дори необитаеми здания, съ все именно по тия улици на този кварталъ. Това се дължи, покрай силата на удара, не толкова на лошия строеж, но и на нустойчивия терен, който въ голямата си частъ е изкуственъ насипъ. Тамъ преди години е текла стара река, която отпосле е насипана“ (Иванов, 1931).

Разрушенията, причинени от земетресението в град София са подробно описани в работата на Ради Иванов (1931). На фигура 1 е представена част от установените последствия.

Подробните сведения за минералните извори, представени в Иванов (1931), са дадени на Дирекцията на метеорологията от Ст. Петков (асистент) „...следъ земетресението увеличение на дебита на Софийския термаленъ изворъ, температурата се е увеличила само съ 0.2° .“ „Темпратурата на водата се е увеличила..... на изворите въ „Княжево“ съ 0.2°C , и на „Овчата купел“ при Павлово съ 0.35°C , а намаляла въ Банкя съ 0.1°C , въ Кладница съ 0.4°C и въ Панчарево съ 0.9°C “ (Иванов, 1931). Температурата на водата в Горна баня не е променена. Дебитът на водата е увеличен в Банкя, Горна баня, Княжево и в извора „Овча купел“, а е намален в Панчарево и Кладница.

Ради Иванов (1931) определя максималното ускорение в София, което достига от 2000 mm/s^2 до 4000 mm/s^2 , прилагайки подхода, използван от Стайко Стайков

при изучаване на Горно-Оряховското земетресение от 1913 г. Според Иванов (1931) максималната скорост е била 40 cm/s, а амплитудата на земните колебания достига 5-10 cm, „а при високите етажи и по-голяма.“

Съгласно Иванов (1931) земетресението е усетено най-силно в София и с отдалечаване от града усещането намалява, а ообластта на усещане на земетресението е около 70 000 km². „...била е разтърсена западната половина на България въ сегашните и предели, част отъ Сърбия и Македония, като на югъ земетресението е достигнало южно отъ Родопите, на севера е преминало Дунава, а на западъ е достигнало до рката на р.Морава“ Иванов (1931).

Земетресението от 18.10.1917 г. е последвано от афтершокова активност, продължила повече от една година (Симеонова, 1995). След събитието в Софийска зона настъпва относително спокойствие, което продължава около 95 години.



Фиг. 1. Щети в София, причинени от земетресението през 1917 г. (Иванов, 1931).

Земетресението от 22 май 2012

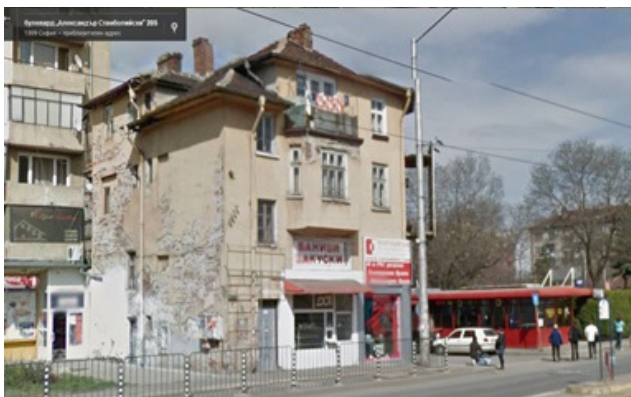
Почти век по-късно след земетресението през 1917 г., на 22 май 2012 г. земетресение с $M_w=5.6$ е регистрирано в района на Софийска зона. Събитието е с епицентър на 25 km в ЮЗ посока от центъра на София, между градовете Перник и Радомир. В град София и околностите са наблюдавани умерени до тежки щети. На фигури 2 и 3 са илюстрирани едни от най-сериозните щети нанесени от земетресението в градовете Перник и София.

Разпределението на макросеизмичните ефекти, наблюдавани след земетресението, в района на град София, е оценено на базата на документи и надеждна информация от отдел „Архиви“ при Столична Община.

Някои от най-уязвените сгради са показани на фигура 3. Една част от тези сгради са необитаеми с неизвестни собственици и саморазрушаващи се. Други са общинска собственост и се използват за жилища на социално слаби семейства. Всички те са сгради, които не са били реновирани. Трети вид сгради с такива увреждания са обявени за паметници на културата, но и тук поради липса на яснота в собствеността им, също са необитаеми и силно увредени от атмосферните условия (Александрова, 2014).

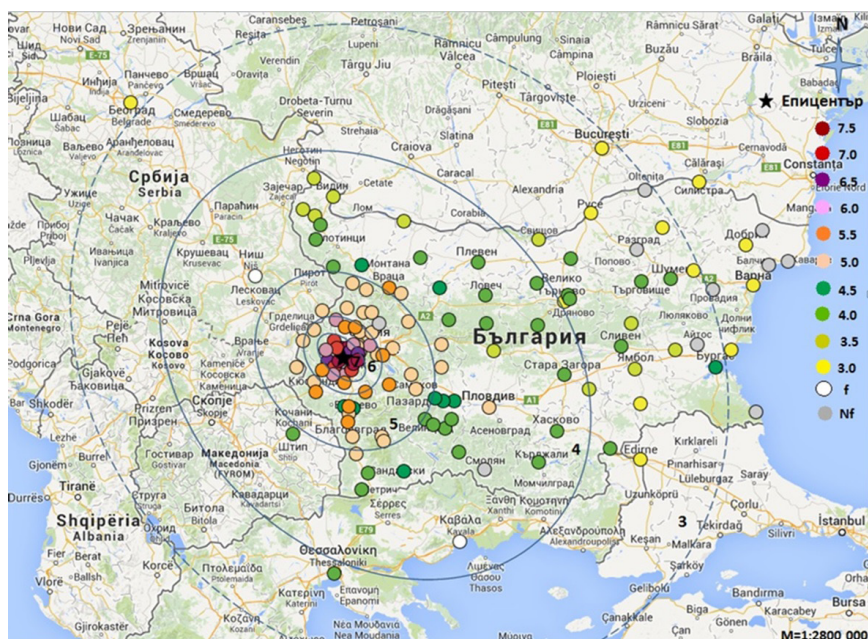


Фиг. 2. Щети, причинени от земетресението в град Перник и околности.



Фиг. 3. Наблюдавани щети в град София след земетресението, реализирано през 2012 г.

Преобладаващите въздействия са оценени на 7^{ма} степен MSK64 (Фиг. 4), като сградите с тези увреждания са съсредоточени в централната градска част. Това са къщи и кооперации, построени в началото на 20^{ти} век.

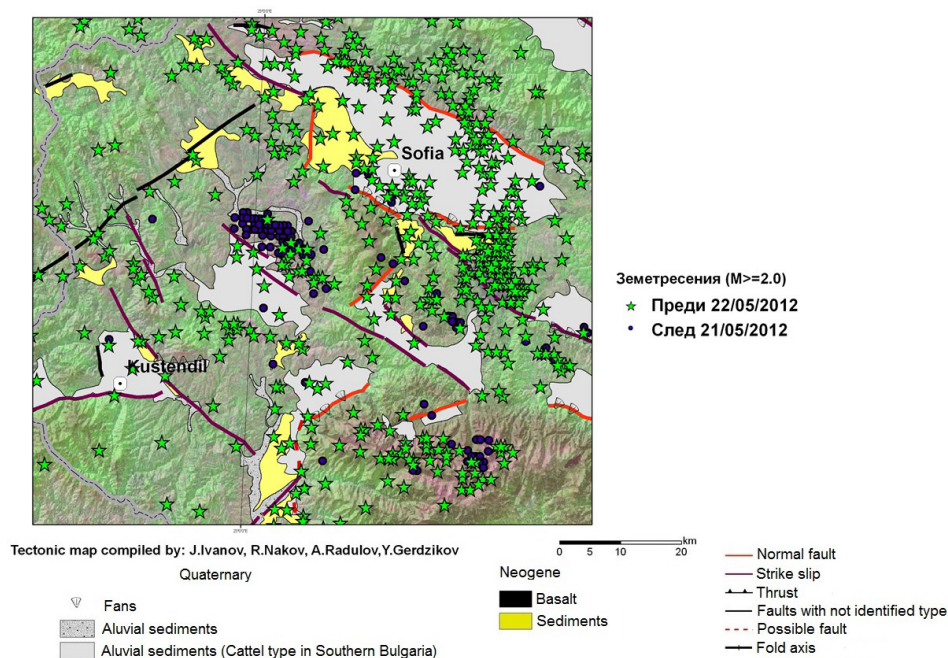


Фиг. 4. Наблюдавани въздействия след земетресението, реализирано през 2012 г.

Повечето от тези сгради не са поддържани - без да е извършван основен ремонт. Вследствие на това комините са с паднали шапки, с изронена мазилка, тухлите са несигурни и податливи на падане. Има големи късове мазилка паднали от фасадите на сградите, а също и тънки пукнатини в стените. В около 40% от наблюдаваните случаи има разместване и свличане на керемиди от покривите. Площта с въздействия от 7^{ма} степен по MSK64 се разширява предимно западно от централните части на града (от северозапад до югозапад, достигайки до квартал Владая, разположен в югозападната част на Витоша).

Основното земетресение и последвалата го афтершокова активност са реализирани в област, която добре очертава асейсмично пространство, югозападно от град София (Фиг. 5). На фигура 5 е илюстрирано пространственото разпределение на епицентрите на земетресенията, генерирани за 30 годишен времеви интервал с магнитуд над 2.0 ($M \geq 2.0$), реализирани в Софийска зона.

За проследяване пространствено-времето разпределение на сеизмичността, разглежданият времеви интервал е разделен на два периода: 1^{ви} от 1985 г. до 22.05.2012 г. (когато е реализирано най-силното събитие с $M_w = 5.6$); 2^{ри} период от 22.05.2012 г. до края на 2014 г. Събитията от двата периода са означени с различен



Фиг. 5. Пространствено разпределение на земетресенията с $M \geq 2.0$, реализирани в Софийска сеизмогенна зона през периода 1985-2014 г. (Основата е фрагмент от неотектонската карта, съставена от Ж. Иванов и др., представена в Отчет ГФИ, 2008 г.).

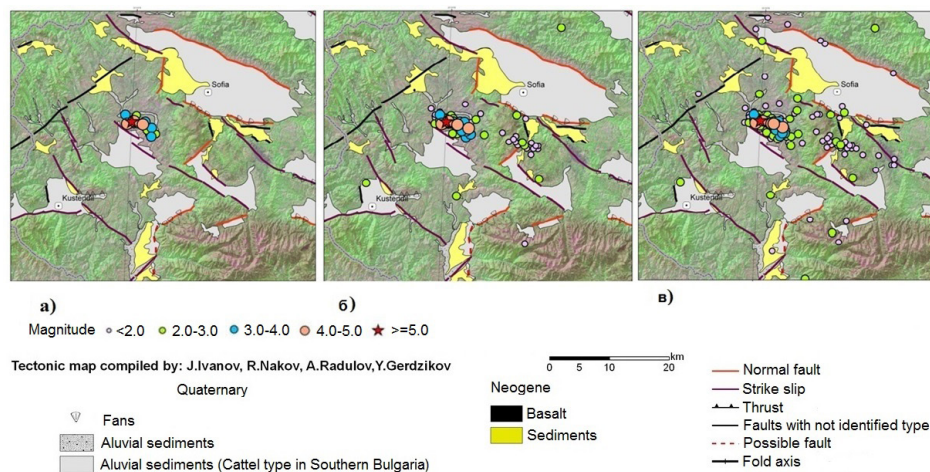
растер и цвят на фигурата. От фигурата се вижда, че събитията, реализирани след 22.05.2012 г. (означени с черни точки) частично запълват добре очертаното асейсмично пространство, югозападно от град София.

През първия период (до 22.05.2012 г.) са реализирани 736 земетресения (с $M \geq 2.0$) със средна годишна активност 27.3 събития/година. Не се наблюдава закономерност във вариациите на годишната активност. Най-висока е активността през 2010 г, реализирани са 59 земетресения, но през 2011 г. активността спада под средната – генерирани са само 18 събития. Подобни вариации в сеизмичната активност се наблюдават и след 2012 г. През 2013 г. и 2014 г. са реализирани, съответно 14 и 45 земетресения с $M \geq 2.0$ (от сеизмичните изяви са изключени афтершоковите събития). Основна част от тези земетресения са реализирани в периферията на Софийска сеизмична зона.

Земетресение от 22 май 2012 г. не се характеризира с форшокова активност, но е реализирано в област, характеризираща се с изявено 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. е формирана извадка, включваща 209 афтершокови събития с магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 4.4$ (M_p , дефиниран в Christoskov et al., 2012).

На фигура 6 е представена пространствена картина на афтершоковата активност за три различни времеви интервала.



Фиг. 6. 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.

Фигурата илюстрира особености в пространствено разпределение на афтершоковата активност: 1) главното земетресение и последвалите го, в първите 3 часа (Фиг. 6 а), афтершокови събития се групират по разломна структура в СЗ-ЮИ направление; 2) най-силните афтершокови събития са реализирани в сравнително малка област, която нараства с времето (Фиг. 6б) и в)); 3) пространствената експанзия на афтершоковата активност е предимно в северозападно направление (Фиг. 6в)).

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

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

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

Модифицираната формула на Omori е един от малкото емпирично установени закони в сеизмологията с основен параметър p , характеризиращ затихването на афтершоковата активност във времето. Параметърът зависи както от физичните свойства на средата, например от нейната хетерогенност, така и от разпределението на напреженията в нея.

При анализа на времево разпределение на афтершоковата активност е приложена методика за определяне на затихването на афтершоковата активност във времето, която е подробно описана в работите на Симеонова, 2015 и Райкова, 2021 (Simeonova et. al., 2015, Raykova, 2021). 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 фигура 7 е представено честотно-времето разпределение на афтершоковите събития за четирите разглеждани случая.

На фигура 8 е показано честотно-линеаризираното разпределение на афтершоковите събития за време $T=1080$ дни и $T=254$ дни, при различен долен магнитуден праг M_a .

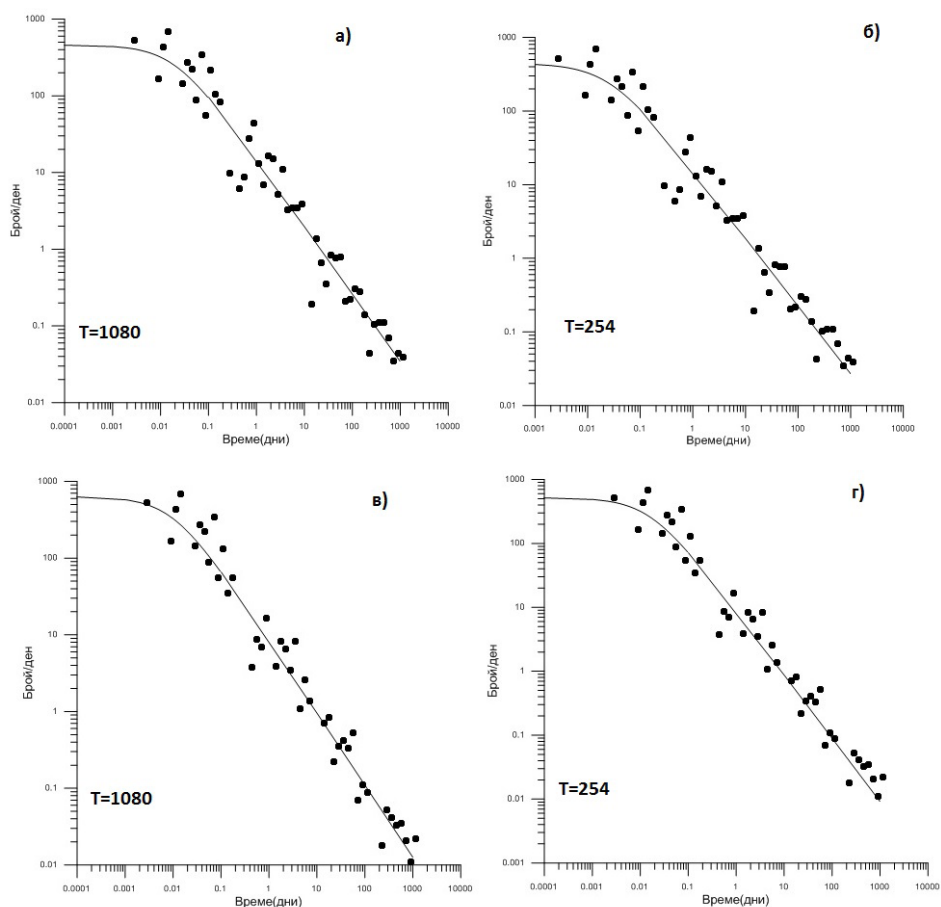
Наблюдава се добро съвпадение между очакваното (теоретичното) и наблюдаваното честотни разпределения и в четирите разглеждани случая. Така избраният модел за апроксимиране на времето разпределение е в относително добро съответствие с разпределението на афтершоковите събития. При четирите случая афтершоковата активност се понижава малко преди 40-я ден и нараства между 50-60-ия ден, когато е реализирано едно от най-силните афтершокови събития (на 14 юли 2012 г. с $M_p=4.4$). Това дава основание в този интервал да се потърси модел с вторична афтершокова активност. Получените резултати са представени в Таблица 1.

Табл. 1. Оценки на параметрите K , p , c и AIC - критерий за различни модели на поредици след земетресението от 22.05.2012 г.

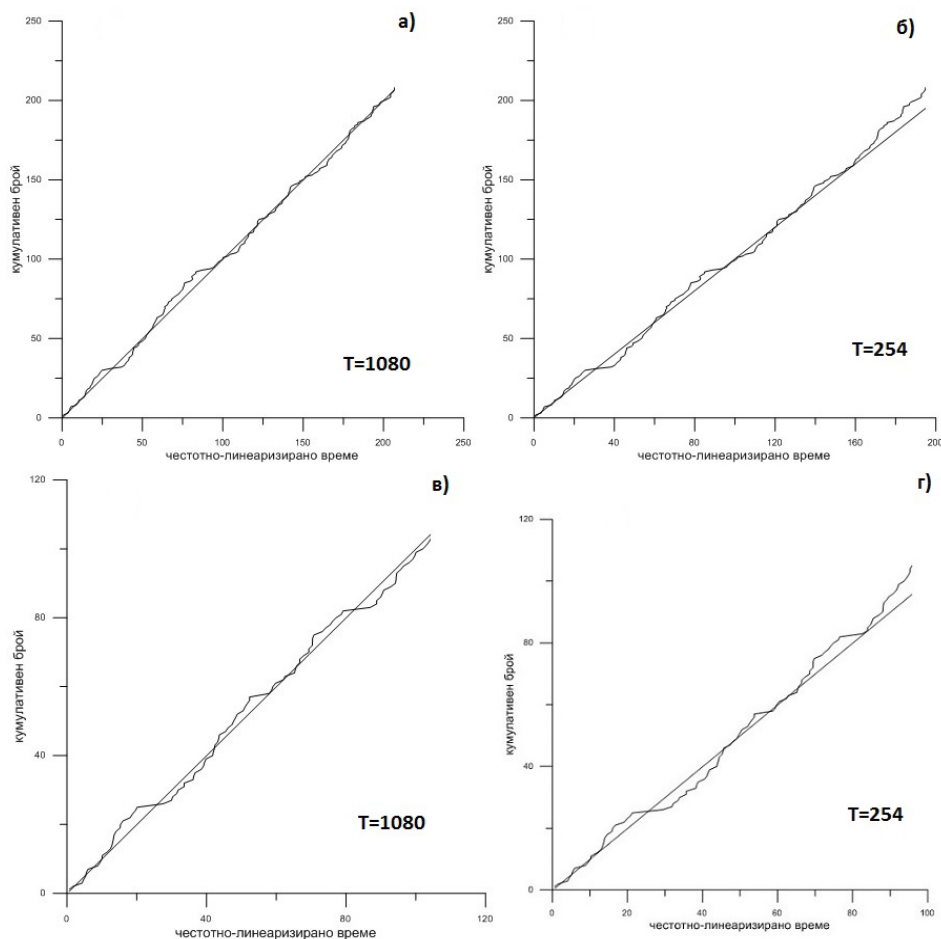
Модел	Период	K	p	C	K_1	p_1	c_1	AIC
Без вторична серия, без магнитуден праг	1080	14.86	0.88	0.02				279.96
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	1080	8.30	0.94	0.01				143.95
Без вторична серия, без магнитуден праг	254	15.46	0.92	0.03				-93.51
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	254	8.57	0.99	0.02				-59.59
С една вторична серия, без магнитуден праг	1080	14.87	0.89	0.02	0.47	0.89	0.02	274.48
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	254	15.46	0.93	0.03	0.50	0.93	0.03	-99.69
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

От получените оценки за параметрите K , p , c и стойности на AIC, представени в таблица 1, както и от представените резултати на фигурите, може да се направят следните заключения: 1) оценките и на трите параметъра се влияят от долния магнитуден праг M_a , 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 честотното разпределение на афтершоковите събития може да се каже, че в първо приближение затихването на афтершоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Omori; 4) 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; 5) преминаването на активността към фонов сеизмичност се наблюдава около 360 дни след главното събитие, когато кумулативният брой на събитията се увеличава бързо и показва отклонение от началния тренд. Трябва да се отбележи, очакваната продължителност на афтершоковата поредица е 254 дни (продължителност определена чрез работите на Gardner and Knopoff, 1974; Христосков и Лазаров, 1981) и е превишена от наблюдаваната с около 100 дни.



Фиг. 7. Честотно – времево разпределение на афтершоковите събития във времето: а) за период $T=1080$ дни без магнитуден праг; б) за период $T=254$ дни без магнитуден праг; в) за период $T=1080$ дни, с магнитуден праг $M_a=2$; г) за период $T=254$ дни, с магнитуден праг $M_a=2$



Фиг. 8. Честотно-линеаризирано разпределение на афтершоковите събития: а) за период $T=1080$ дни без магнитуден праг; б) за период $T=254$ дни без магнитуден праг; в) за период $T=1080$ дни, с магнитуден праг $M_a=2$; г) за период $T=254$ дни, с магнитуден праг $M_a=2$.

Заклучение

Сеизмогенна зона София се намира в Югозападна България - зона характеризираща се с тектонска активност и доказано движение на земната кора. В исторически и съвременен план силни земетресения, причинили много щети в градовете, се генерират и в сеизмогенна зона София. Изследването на пространствено-времето разпределение на земетресенията е от основно значение за разбирането на физиката на процеса на генериране на земетресения. Резултатите от това изследване могат да се интерпретират като потвърждение на концепцията, че групирането на

земетресенията е съществен аспект на сеизмичността, който предоставя ключова информация за динамиката на земетресението.

Изследването предполага, че неравномерното пространствено-времево разпределение е присъща характеристика на възникването на земетресения и в сеизмогенна зона София. Умерено силните земетресения, реализирани в тази зона се характеризират с продължителна афтершокова активност.

Световният опит в сеизмично застрашените райони каквато е сеизмогенна зона София показва, че сеизмичният риск може да бъде намален чрез ефективно градоустройствено планиране, съобразено с природните особености и наличното устройство на населеното място. Със строителство, съобразено със сеизмичната опасност – антисеизмично строителство. Чрез повишаване готовността за посрещане последиците от силни земетресения – адекватни превантивни мерки, обучение на населението, планиране на спасителните дейности, както и чрез активно взаимодействие на науката с всички нива на управление на страната.

Литература

- Bonchev E., I. Bune, L. Christoskov, J. Karagjuleva, V. Kostadinov, G. Reisner, S. Rizhikova, N. Shebalin, V. Sholpo, D. Sokerova, 1982. A method for compilation of seismic zoning prognostic maps for the territory of Bulgaria. *Geologica Balcanica*, 12(2), 2-48.
- Christoskov L., L. Dimitrova, D. Solakov, 2012. Magnitude determinations of P wave by digital broadband seismometers of NOTSSI network for local and regional events. *Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences*, 65 (5), 653-660.
- Dachev H., I. Vaptzarov, L. Filipov, D. Solakov, S. Simeonova, S. Nikolova, P. Sokolova, E. Botev, Tz. Georgiev, 1995. Seismology, geology, neotectonics, seismotectonics and seismic hazard assessment for the PNPP Belene site, Report of Project: Investigations and activities for increasing of the seismic safety of the PNPP Belene site, *Geoph. Inst., BAS, S, I*, pp. 250.
- Gardner, J. K., L. Knopoff., 1974. Is the sequence of earthquakes in southern California, with after-shocks removed, Poissonian. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, 1363-1367.
- Jackson J., D. P. McKenzie, 1984. Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan, *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 77, 185-246.
- Jackson J., McKenzie, D., 1988. The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. - *Geophysical Journal* 93, 45-73.
- McKenzie D. P., 1970. Plate tectonics of the Mediterranean region, *Nature*, 226, 239-243.
- Raykova, P., 2021. TEMPORAL DISTRIBUTION OF THE 2020 PLOVDIV EARTHQUAKE SEISMIC SEQUENCES. ПРОБЛЕМИ НА ГЕОГРАФИЯТА, 2, БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ, 2021, DOI:<https://doi.org/10.35101/prg-2021.2.2>, 15-28
- Simeonova S., D. Solakov, 1999. Temporal characteristics of some aftershock sequences in Bulgaria. *Annali di Geofisica*, 42, 5, 821-832.
- 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.

- Simeonova, S.D., Solakov, D.E., Leydecker, G., Busche, H., Schmitt, T., Kaiser, D., 2006. Probabilistic seismic hazard map for Bulgaria as a basis for a new building code. *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 6, 6, 2006, 881-887.
- Sokerova, D., S. Simeonova, S. Nikolova, D. Solakov, E. Botev, R. Glavcheva, S. Dineva, B. Babachkova, S. Velichkova, S. Maslinkova, K. Donkova, S. Rizikova, M. Arsovski, M. Matova, I. Vaptzarov, L. Filipov, 1992. Geomorphology, neotectonic, seismicity and seismotectonic of NPP Kozloduy, Final Report (Summary) on IAEA Mission: Design basis earthquake for seismic upgrading of NPP Kozloduy, Sofia, pp. 200.
- Solakov D., Simeonova S., Raykova P., Aleksandrova I., Popova M. and Protopopova V., 2016. Seismological analysis of the 2012 Mw5.6 earthquake in Sofia seismic zone, *Comptes rendus de l'Acad'emie bulgare des Sciences* 69, 1, 67-74.
- Utsu, T., 1957. Magnitude of earthquakes and occurrence of their aftershocks. *Zisin (J. Seism.Soc. Jap.)*, 10, 35-45, (in Japanese).
- Utsu, T., 1961. A statistical study on occurrence of aftershocks. *Geoph. Mag.*, 30, 521-605.
- Utsu, T., 1969. Aftershocks and earthquakes statistics (I)- Some parameters which characterize an aftershock sequence and their interaction. *J. Fac. Sc. Hokaido Univ., Ser. VI. (Gephys)*, 3, 129-195.
- Александрова И., 2014. Моделиране на макросеизмичното поле за територията на България. Автореферат, НИГГГ-БАН, София, стр. 40.
- Вацов С., 1902. Земетресенията в България през 1901, Д. П., С., стр. 39.
- Георгиев, Ив., 2010. Държавна и перманентна GPS мрежи на Република България – обработка на измерванията, анализ и приложение в геодинамиката. Автореферат за придобиване на научната степен „доктор на науките“, стр. 88.
- Иванов, Р., 1931. Принос към изучаването на земетресението в София на 18 октомври 1917 година. МЗДИ, Д.М., Д.П., С., 1-33.
- Киров, К., 1931. Зметресения въ България. Отчет за усетените зметресения презъ годините 1917-1927. С. Д.П. 126 стр.
- Отчет ГФИ, 2008. Сеизмично райониране на Република България, съобразено с изискванията на Еврокод 8 „Сеизмично осигуряване на строителни конструкции“ и изработване на карти за сеизмичното райониране с отчитане на сеизмичния hazard върху територията на страната, Част II, стр.150.
- Петков, И., Л. Христосков, 1965. Върху сеизмичността на района на гр. София с оглед на микросеизмичното райониране. Год. СУ, 58, С., 163.
- Радулов, А., Дилов, Ц., Янева, М. и Николов, Н., 2011. Земетръсни разломи в Софийския басейн. В: Сборник резюмета от Национална конференция „Геонауки 2011“, Българско геологическо дружество, с. 99–100.
- Радулов, А., Янева, М., Шанов, С., Костов, К., Николов, В. и Николов, Н., 2012. Косеизмични геоложки ефекти, вързани с Пернишкото земетресение на 22 май 2012 г., Западна България. В: Сборник резюмета от Национална конференция „Геонауки 2012“, Българско геологическо дружество, с. 99–100.
- Симеонова С., 1995. Разпределение във времето на събития от афтершокови серии, реализирани на територията на България и околностите ѝ. БГС, ХХ1, 3, 23-33.
- Христосков, Л., Р. Лазаров, 1981. Основни съображения върху представителността на сеизмичните каталози с оглед на сеизмостатистическите оценки. БГС, VII, 3, 58-72

Eearthquakes with magnitude $M_w > 5.0$, occurred in Sofia seismogenic zone after 1900

P. Raykova, S. Simeonova, D. Solakov, I. Aleksandrova

Abstract: The territory of Bulgaria represents a typical example of high seismic risk area in the eastern part of the Balkan Peninsula. The city of Sofia is the capital of Bulgaria. It is situated in the Sofia seismogenic zone. The city is the most populated (the population is of more than 1.2 mil. inhabitants) industrial and cultural region of Bulgaria that faces considerable earthquake risk. In the present study, the two strongest earthquakes (with $M_w > 5.5$) occurred in Sofia seismogenic zone after 1900 are presented. The first $M_w = 5.7$ earthquake occurred at the beginning of the 20th century on October 18th, 1917. Almost a century later (95 years after the 1917 earthquake) on May 22nd, 2012 an earthquake of moment magnitude 5.6 hit Sofia seismogenic zone.