

# Bulgarian Geophysical Journal

2020, Vol. 43

## Contents

<i>Д. Ишлямски, Б. Георгиева, Н. Йорданова</i> – Геофизични изследвания на степента на антропогенно замърсяване на детски площадки в град София. ....	3
<i>Д. Солаков, И. Александрова, С. Симеонова, Пл. Райкова</i> – Разрушителното земетресение от 30(18) Септември 1858 г. ....	19
<i>P. Mukhtarov, N. Miloshev, G. Gadzhev, R. Bojilova</i> – Monitoring and forecasting the biologically active ultraviolet radiation of the sun. ....	31
<i>M. Metodiev, P. Trifonova</i> – Annual report of the observed geomagnetic activity in Panagjurishte observatory for 2014. ....	43
<i>D. Dragomirov, E. Oynakov, V. Buchakchiev, Y. Milkov</i> – Seismicity on the territory of Bulgaria and the adjacent lands recorded by NOTSSI in 2019. ....	59
<i>P. Raykova</i> – Estimation of earthquake source parameters using P and S-waves spectra – case study the 2012 seismic cluster in Sofia seismogenic zone. ....	71
<i>R. Bojilova, P. Mukhtarov</i> – Short-term prediction of the ionospheric critical frequencies over Bulgaria. ....	81
<i>M. Chamati</i> – ULF geomagnetic observation at Panagjurishte, Bulgaria, as a tool for investigation of the magnetosphere-ionosphere-lithosphere system. ....	89

<b>И. Бъчваров</b> – Геомагнитно поле, геомагнитни измервания и модели, картографиране на полето. ....	98
<b>Пл. Райкова</b> – Оценка огнищните параметри на земетресения от роев тип. ....	110

## ГЕОФИЗИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА СТЕПЕНТА НА АНТРОПОГЕННО ЗАМЪРСЯВАНЕ НА ДЕТСКИ ПЛОЩАДКИ В ГРАД СОФИЯ

*Даниел Ишлямски, Божурка Георгиева, Нели Йорданова*

Национален Институт по Геофизика, Геодезия и География, Българска Академия на Науките,  
ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 3, София 1113, България, e-mail: danielishlyamski95@abv.bg

DOI: 10.34975/bgj-2020.43.1

**Резюме.** Проведено е геофизично изследване на колекция от прахови проби, събрани от детски площадки от различни райони в гр. София. Целите на изследването са: 1) оценка на степента на замърсяване на околната среда, в която играят малките деца в София; 2) проследяване на изменението в качеството на околната среда през различни сезони в рамките на 2 години; 3) получаване на нови данни за магнитните свойства на антропогенни продукти от отложена прах. Експерименталните резултати от анализите на вида на магнитните минерали показват, че основен принос дават окисите на желязото – магнетит, магхемит, титаномагнетит. Получените магнитни параметри са интерпретирани във връзка със степента на замърсяване на въздуха от локални и ареални източници, свързани с циркулацията на въздушните маси над града и разпространението на ФПЧ. Установено е, че за повечето локалитети, опробвани през есента на 2017 г. и месец февруари 2019 г. магнитната възприемчивост на дребната фракция е по-висока от тази на едрата фракция. За прахта, опробвана през лятото на 2019 г. магнитната възприемчивост на едрата фракция е по-висока от тази на дребната. Въз основа на анализа на вариациите на магнитните параметри е направен извода, че през есенно-зимните месеци в праховото замърсяване доминира приноса от ФПЧ, а през летния сезон – приноса от локалните източници (най-вече автомобилия трафик). Наблюденията със сканиращ електронен микроскоп на магнитни екстракти от праховете показват масивно наличие на едри антропогенни частици с неправилна форма, както и сферични частици, образувани в резултат на високо-температурни технологични процеси. Всички антропогенни частици са силно обогатени с желязни окиси, а в някои от тях присъстват и включения от елементи на тежки метали като олово, цинк и антимоний.

**Ключови думи:** фини прахови частици, антропогенно замърсяване, детски площадки, магнитна възприемчивост

## **1. Въведение**

София е градът с най-многобройно и постоянно увеличаващо се през последните години население, поради което и проблемът със замърсяването на атмосферния въздух е един от най-сериозните не само в страната, но и в Европа. Броят на действащите мониторингови станции за състоянието на атмосферния въздух в столицата, поддържани от Изпълнителната Агенция към МОСВ, е ограничен (6 на брой), а многобройните граждански станции за измервания в реално време дават само моментните стойности на качеството на въздуха.

Чрез въвеждането на косвени методи за оценка на замърсяването може да се получи икономически ефективна, бърза и детайлна информация за горещите точки в градската среда. Такъв метод за оценка на замърсяването на околната среда е магнитометричният метод. Той е разработен преди около 15 г. и вече намира широко приложение в света за картиране и мониторинг на степента на антропогенно замърсяване на почви и градска прах. Методиката се базира на факта, че повечето индустриални производства, които замърсяват околната среда, емисиите от транспорта и от ТЕЦ-ове отделят в атмосферата заедно с тежките елементи и значително количество силно магнитни частици. В резултат се наблюдава увеличаване на магнитната възприемчивост на близките до замърсителя почви, седименти и градска прах (Petrovsky and Elwood, 1999). По този начин чрез бързите и евтини магнитни измервания (полеви и лабораторни), които могат да бъдат проведени върху гъста мрежа от измервателни пунктове, могат точно да се идентифицират местата с най-силно замърсяване.

Вредното въздействие на фините прахови частици е особено опасно за здравето на децата. Установено е, че съществува корелация между нивата на оловото в кръвта на децата и концентрацията на олово в градската прах и почва (Laidlaw et al., 2005; Laidlaw and Taylor, 2011). Поради това праховата фракция, отложена в детските градини, парковете и на детските площадки, заслужава по-внимателно изучаване. Редица изследвания показват, че материалите, използвани в различните настилки на детските площадки често съдържат завишени нива на определени тежки метали, като Zn, Co, Cr, Ni (Wachtendorf et al., 2017; Frias and de Rojas, 2002). Установяването на нивата на замърсяване с тези тежки метали, както и степента на усвояването им от децата, има огромно значение, тъй като тези елементи имат както силно негативен ефект върху поведението и интелигентността, така и изразени карциногенни ефекти (Wong and Mak, 1997).

В настоящата работа е направена оценка на степента на антропогенно замърсяване на детски площадки от различни райони на гр. София и влиянието на сезонните промени в степента на замърсяване в тези райони. Проведени са редица магнитни и немагнитни лабораторни изследвания върху прахови проби от 13 детски площадки от гр. София и от 3 близки до столицата малки населени места.

## 2. Методология на изследването

### 2.1. Избор на локалитети за опробване

Целта на проведеното изследване бе да се потвърдят сезонни закономерности в магнетизма на отложената прах на детските площадки и да се свържат с градското замърсяване. Поради това бяха проведени опробвания на прах от детски площадки през три годишни сезона – зимен, летен и есенен.

Събрани са образци от 13 различни района в гр. София (Фиг. 1), предимно от североизточните и югоизточни квартали, както и от централните части на града (Борисовата Градина; Център и т.н.). Опробването бе проведено на три кампании – първата през месец септември 2017 г.; втората – месец февруари 2019 г. и третата – месец август 2019 г. От локалитетите в Герена (GER), Дружба (DRZH) и Надежда (NADZ) са взети по 2 проби от едно и също място на разстояние около 20 метра едно от друго. Взети са проби и от детски площадки извън гр. София – с. Панчарево (PAN1, PAN2) и в района на Искърското дефиле – с. Церово (CER) и с. Гара Лакатник (LAK). За всяка детска площадка са измерени и географските координати чрез портативен GPSetrex summit (Garmin).



**Фиг. 1.** Местоположение на локалитетите на опробване в гр. София

Подробно описание на локалитетите е представено в Таблица 1. Всяка проба се състои от материал, взет с помощта на шпакла и четка. Количеството на отделните проби варира между 30 – 40 гр. Цялата колекция проби от трите кампании на опробване се състои от 51 проби.

**Таблица 1.** Описание и географски координати на опробваните локалитети.

Образец №	Най-близка улица	Замърсяване с отпадъци	Координати	Надм. височина
ALJ	бул. „Хр.Ботев“	силно замърсено	N 42° 42' 29,6'' E 23° 19' 03,6''	H=523 m
NADZ1 NADZ2	бул. „Рожен“	силно замърсено	N 42° 43' 37,5'' E 23° 18' 39,7''	H=436 m
GER1 GER2	бул. „Ботевградско шосе“	сравнително чисто	N 42° 41' 53,9'' E 23° 21' 50,0''	H=508 m
SLA	ул. „Слатинска река“	сравнително чисто	N 42° 41' 01,4'' E 23° 22' 38,1''	H=518 m
DRZH1 DRZH2	бул. „Брюксел“	сравнително чисто	N 42° 39' 56,2'' E 23° 23' 23,6''	H=557 m
GEO	ул. „Атанас Узунов“	чисто, почти без отпадъци	N 42° 41' 12,7'' E 23° 21' 49,8''	H=540 m
ML	бул. „Андрей Ляпчев“	силно замърсено	N 42° 39' 02,5'' E 23° 22' 09,4''	H=604 m
DIA	ул. „Никола Габровски“	сравнително чисто	N 42° 39' 43,2'' E 23° 20' 41,8''	H=590 m
BG	до ст. „Българска армия“	чисто, почти без отпадъци	N 42° 41' 08,4'' E 23° 20' 17,1''	H=548 m
CEN	бул. „Васил Левски“	сравнително чисто	N 42° 42' 06,8'' E 23° 20' 05,6''	H=479 m
CER	ул. „Александър Стамболийски“	силно замърсено	N 43° 00' 23,1'' E 23° 20' 52,7''	H=385 m
LAK	ул. „Васил Левски“	силно замърсено	N 43° 05' 05,0'' E 23° 22' 50,5''	H=415 m
PAN 1	ул. „Самоковско шосе“	сравнително чисто	N 42° 35' 46'' E 23° 24' 36''	H=612 m
PAN 2	ул. „Риляник“	сравнително чисто	N 42° 35' 46'' E 23° 24' 24''	H=621 m

## 2.2. Подготовка на пробите и лабораторни изследвания

Събраните проби са изсушени и пресяти през сито с размер на отвора един милиметър. Така са получени две фракции: едра ( $d > 1 \text{ mm}$ ) и дребна ( $d < 1 \text{ mm}$ ). Върху този материал са направени следните лабораторни измервания:

1. Измерване на магнитната възприемчивост ( $\kappa$ ) на едрата фракция от праховите проби с капа-мост MFK-1FA (AGICO Ltd., Czech Republic) с чувствителност  $2 \cdot 10^{-8}$  (SI).

2. Измерване на магнитната възприемчивост ( $\kappa$ ) на фината фракция и пресмятане на мас-специфичната магнитна възприемчивост ( $c$ ), като за целта е измерено и теглото на пробата. Магнитната възприемчивост е измерена на две работни честоти: ниска (low-field “lf”) 976 Hz и висока (high field “hf”) 15616 Hz. Пресметнат е процентът честотно зависима магнитна възприемчивост  $cfd\% = (c_{lf} - c_{hf}) * 100 / c_{lf}$ .

3. От всички проби от трите кампании са приготвени кубични образци със страна 2 см, като е използван 2 гр. прахов материал, смесен с малко количество гипс и вода. Върху тази колекция кубчета са проведени измервания на лабораторно-индуцирани остатъчни намагнитености.

4. Създаване на лабораторна безхистерезисна намагнитеност (ARM) с максимална амплитуда на променливото поле от 100 mT и слабо постоянно поле с интензитет 0.1 mT. Използван е апарат AF-demagnetizer (Molspin Ltd., UK).

5. Създаване на лабораторна остатъчна изотермична намагнитеност на насищане (SIRM) чрез намагнитване с постоянно магнитно поле с големина 2T. След това образецът е намагнитен в обратна посока с поле -0.3 T и -0.1 T ( $IRM_{300mT}$ ;  $IRM_{100mT}$ ) с цел отделяне на фракцията магнитно-меки минерали. Измерванията на остатъчната намагнитеност са направени с автоматичен ротационен магнитометър за скални образци JR-6A (AGICO Ltd., Czech Rep.).

6. Определяне на температурите на Кюри на магнитните минерали в избрани проби чрез измерване на високотемпературното поведение на магнитната възприемчивост. Използвана е високотемпературна пещ CS-23, свързана с капа-мост KLY-2 (AGICO, Czech Republic). Снети са кривите на нагряване от 20 °C до 700 °C и на последващото охлаждане до 40 °C.

7. Определяне на разблокиращите температури на съставна IRM, индуцирана по 3-те оси на кубичните образци (Lowrie, 1990) чрез стъпково температурно размагнитване.

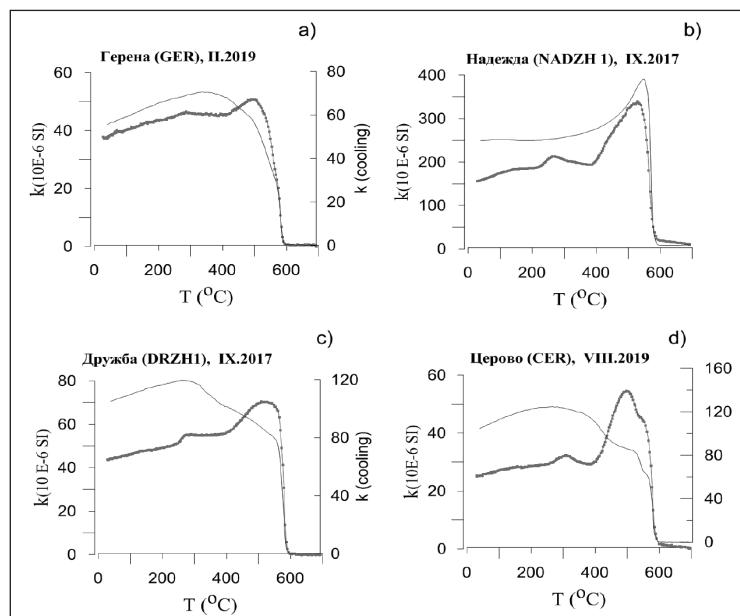
8. Наблюдения със сканиращ електронен микроскоп (SEM-EDS) на единични частици от магнитни екстракти от избрани проби и определяне на елементния състав на частиците.

### **3. Анализ и интерпретация на резултатите**

#### **3.1. Идентифициране на вида на магнитните минерали в праховите проби**

За определяне на вида на присъстващите магнитни минерали в прахта, събрана от детски площадки, е използван методът, известен като „термомагнитен анализ на магнитната възприемчивост“. С този метод се проследява високотемпературното поведение на магнитната възприемчивост ( $\kappa$ ) в процеса на нагряване от стайна температура до 700 °C и последващо охлаждане до стайна температура. Проследяването на измененията в ( $\kappa$ ) се прави с цел да се установи температурата на Кюри (температурата, над която феримагнитните минерали губят намагнитеността си и се държат като парамагнитни вещества) на присъстващите магнитни минерали.

Проведени са анализи на 4 броя избрани проби от следните локалитети: GER 1 (колекция II.2019); CER (колекция VIII.2019); NADZH 1 (колекция IX.2017) и DRZH (колекция IX.2017). Получените резултати са показани на Фиг. 2.



**Фиг. 2.** Високотемпературно поведение на магнитната възприемчивост ( $k$ ) при нагряване от стайна температура до  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  (плътната крива) и охлаждане. За образците от примери а, с, и d кривата на охлаждане е показана на отделна ос вдясно от температурната ос.

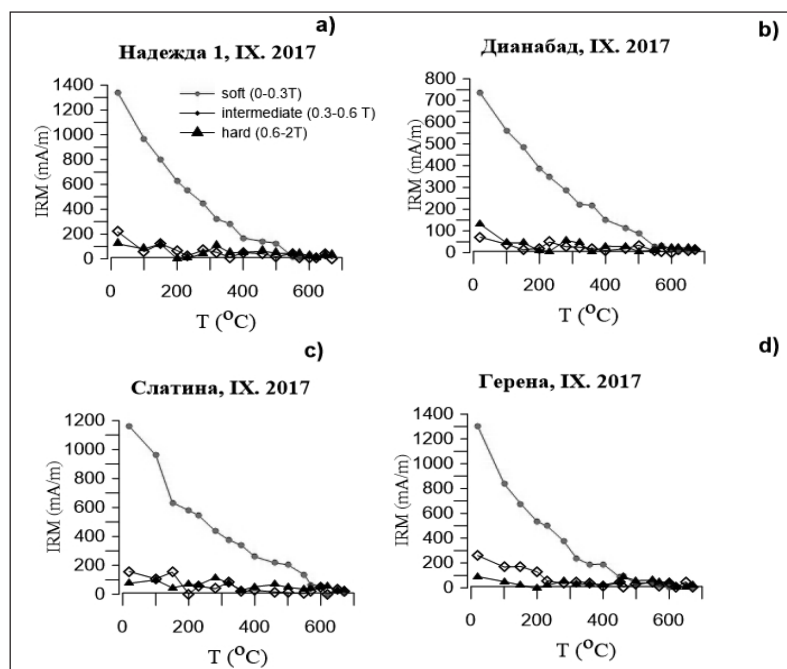
Поведението на магнитната възприемчивост при нагряване е сходно за изследваните образци. То се характеризира с плавно увеличение на ( $k$ ) в интервала  $20\text{--}220\text{ }^{\circ}\text{C}$ , след което се наблюдава изразен максимум в интервала  $250\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Този максимум има различна амплитуда за изследваните проби – най-ясно обособен е за обр. NADZH1 и CER (Фиг. 2 b, d), докато за пробата от Герена (GER) е само слабо загатнат (Фиг. 2 a). Вижда се, че основното намаляване на магнитната възприемчивост става при температури в интервала  $500\text{--}580\text{ }^{\circ}\text{C}$ , съответстващо на температурата на Кюри на магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) (Dunlop and Özdemir, 1997).

Идентифицирането на вида на магнитните минерали в праховите проби е допълнено с определяне на разблокиращите температури на съставна изотермична остатъчна намагнитеност (Lowrie, 1990). Методът се основава на проследяването на температурното размагнитване на 3 изотермични намагнитености (IRM), индуцирани в различно по големина поле по трите взаимно перпендикулярни оси на кубични образци. По този начин в дадения образец се отделят три компоненти на IRM, които намагнитват минерали с различна коерцитивност. Така се получава информация както за температурата на разблокиране (която обикновено е малко по-



ниска от температурата на Кюри за съответния минерал (O'Reilly, 1984)), така и за коерцитивността на тази минерална фракция, фиксирана по съответната ос. Този диагностичен метод бе приложен за избрани проби от колекцията, събрана през 2017 г. Големината на намагнитващото поле бе избрана по следния начин: за меката компонента – 0.3T, за средната – 0.6T, за твърдата – 2T. По този начин в магнитно меката компонента се включват частици, намагнитващи се в полета (0-0.3T), в средната компонента – частици, намагнитващи се в полета между (0.3-0.6T), а в твърдата компонента – частици с коерцитивност в интервала (0.6-2T).

На фиг. 3 са показани типични примери от получените резултати. Сравнявайки интензитетите на меката, средната и твърдата компоненти, се вижда, че за всички проби меката компонента доминира в магнитния сигнал. Кривите на стъпково температурно размагнитване на меката компонента показват сходно поведение на всички проби (Фиг. 3). Кривата на размагнитване е вдлъбната и крайната разблокираща температура е при 580 °C, което потвърждава наличието на магнетит. За пробата от кв. Слатина (Фиг. 3 с) се наблюдава по-значимо намаляване на намагнитеността при температури около 200 °C, вероятно отразяващо температурното разблокиране на намагнитеността, носена от едри магнетитови частици. За пробите от Слатина, Надежда и Герена се забелязва разблокираща температура 200 °C в средната компонента (Фиг. 3 а, с, d), която също е свързана с температурното поведение на едри магнетитови частици с магхемитизирана обвивка.



Фиг. 3. Стъпково температурно размагнитване на съставна изотермична намагнитеност.

Резултатите от идентификацията на магнитните минерали показват, че:

- 1) Основните силно-магнитни окиси на желязото, съдържащи се в праховете от детски площадки, са: магнетит и магхемит (присъстващ вероятно като повърхностна обвивка върху едрите магнетитови частици).
- 2) Възможно е наличието и на титаномангнетит с малко количество титан в състава и/или магнетит с други йонни замествания в кристалната решетка.
- 3) Само в отделни проби се проявява наличие на хематит (високо-коерцитивен минерал).

## **3.2. Магнитни свойства на колекциите от отложена прах от детски площадки в гр. София**

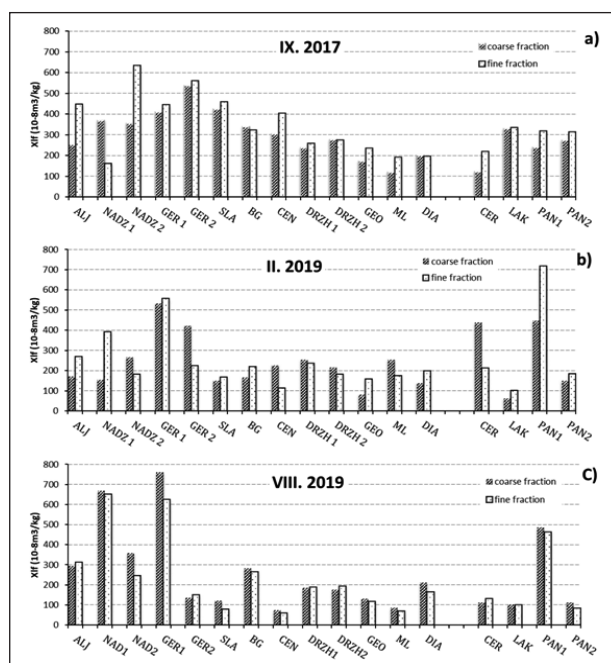
### **3.2.1. Магнитна възприемчивост**

Магнитната възприемчивост е основна магнитна характеристика на естествените материали, която отразява способността на веществото да се намагнитва в приложено слабо магнитно поле (с големина, сравнима с тази на Земяното магнитно поле). Тя зависи главно от концентрацията на силно магнитни окиси на желязото в изследвания материал, но също така и от размерите на магнитните частици (Thompson and Oldfield, 1986).

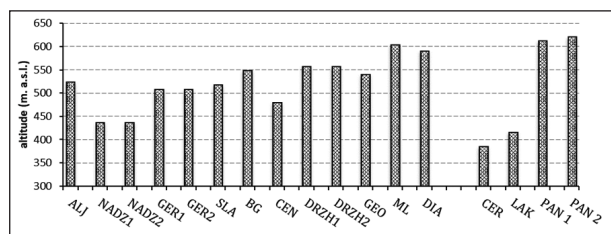
Праховите образци, събрани през трите кампании за опробване, бяха разделени на фина и едра фракция, за да се оцени приноса на най-важните източници на антропогенни частици – ФПЧ, които се отлагат от въздуха и могат да имат по-далечен източник, и едрите фракции, които произхождат от източници в непосредствена близост до локалитета на опробване. Резултатите от измерванията на магнитната възприемчивост на двете фракции за всяка от трите колекции проби са представени на Фиг. 4.

Магнитната възприемчивост на праховете варира в широки граници – от  $62 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  до  $760 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ . Забелязва се, че за пробите, събрани през есента на 2017 г. (Фиг. 4 а) магнитната възприемчивост на дребната фракция е по-висока от тази на едрата фракция за 13 локалитета от общо 17. Най-високи стойности на  $\chi$  се наблюдават в северните и северо-източни райони на София (Надежда, Герена, централната част, Слатина), а по-ниски – в югоизточните части (Дианабад, Младост, Дружба). В локалитетите извън София (Лакатник, Церово, Панчарево) магнитната възприемчивост има междинни стойности (Фиг. 4 а). Праховите проби, взети през февруари 2019 г. показват по-висока магнитна възприемчивост на едрата фракция за 12 локалитета, докато с на дребната фракция е по-висока само в 9 локалитета (Фиг. 4 б). Тази тенденция е засилена за пробите, взети през август 2019 г. (Фиг. 4 с), за които с на дребната фракция е по-висока от тази за едрата само в 5 локалитета. Наблюдаваната закономерност в магнитната възприемчивост на двете фракции може да се обясни ако се предположи, че в течение на обхванатия период от около 2 години намалява количеството на фината фракция в прахта, която се свързва главно с ФПЧ и отразява динамиката на атмосферните условия в целия градски ареал. Това означава, от друга страна, че качеството на атмосферния въздух в града като цяло се подобрява. По-значителният принос на магнитния сигнал на едрата фрак-

ция през 2019 г. показва, че вече доминират източници на замърсяване в непосредствена близост до съответния локалитет. И за трите периода на опробване прахта от детските площадки от кв. Надежда и кв. Герена систематично показват най-високи стойности на магнитната възприемчивост (Фиг. 4), което доказва, че замърсяването там се дължи на емисии от локални източници. От друга страна, ако съпоставим получените магнитни данни с тези за надморската височина на съответния локалитет (Фиг. 5), може да се забележи, че в ниските части на гр. София магнитното обогатяване на прахта е най-силно, а в тези с най-голяма надморска височина – най-слабо.



**Фиг. 4.** Магнитна възприемчивост ( $\chi_f$ ) на едрата (стълбчетата с raster на линии) и дребната (стълбчетата с raster на точки) фракции на праховете от детски площадки за трите периода на опробване. Названията на локалитетите са съгласно Таблица 1.

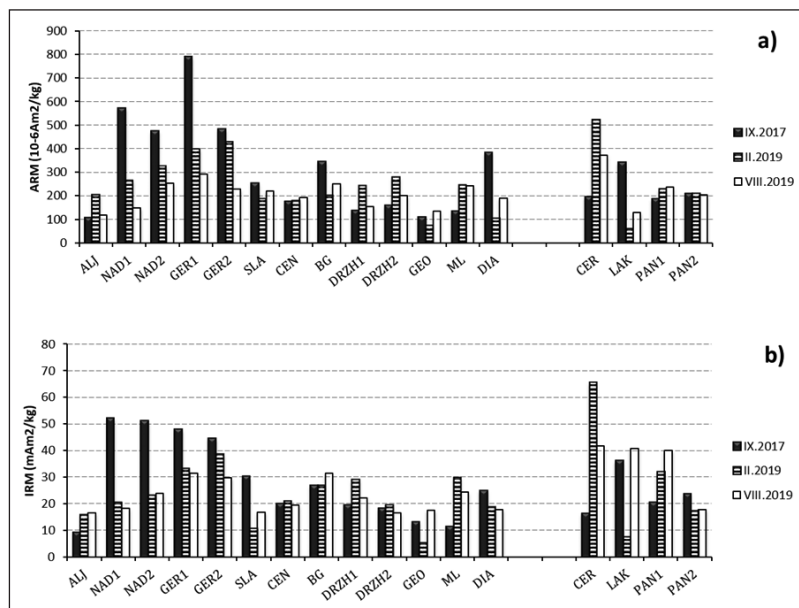


**Фиг. 5.** Надморска височина на опробваните локалитети.

Направените наблюдения позволяват да се направи извода, че магнитната възприемчивост отразява комбинираното влияние на локалните източници и на приноса от по-далечни източници в зависимост от особеностите на reliefa.

Изследването на лабораторно създадени остатъчни намагнитености има за цел установяването на свойствата на фракцията магнитни частици, която има стабилни магнитни свойства (т.е. остатъчна намагнитеност). Използвани са два вида лабораторна намагнитеност – безхистерезисна (ARM) и изотермична (IRM). Безхистерезисната намагнитеност е специфична с това, че се придобива най-ефективно от най-дребните еднодомени частици магнетит (Banerjee et al., 1981; Egli and Lowrie, 2002), които имат размери от порядъка  $\sim 0.03\mu\text{m}$  (Dunlop and Özdemir, 1997). За разлика от ARM, изотермична намагнитеност (IRM) придобиват най-ефективно по-едри псевдо-еднодомени и многодомени частици с размери от няколко микрона до десетки микрона.

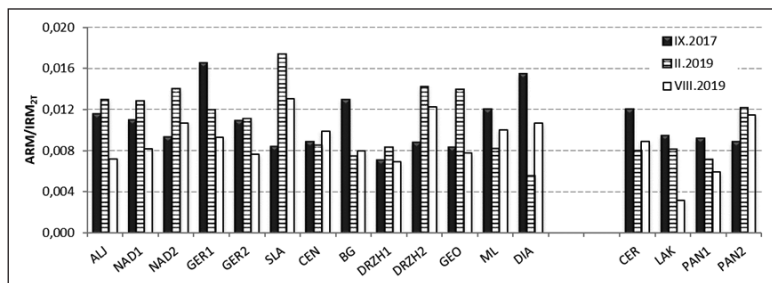
На Фигура 6 са показани резултатите от измерванията на ARM и IRM за събраните проби. Вижда се, че както и при магнитната възприемчивост, така и за ARM и IRM, пробите от 2017 г. показват най-високи стойности. Това означава, че магнитната фракция в прахта съдържа както дребни суб-микронни (т.е. еднодомени), така и едри (многодомени) феримагнитни частици. За локалитетите, показващи най-силни магнитни свойства се забелязва систематично понижаване на остатъчните намагнитености от септември 2017 г. до август 2019 г. (Фиг. 6), докато за останалите локалитети такава тенденция няма. Това е в съгласие с резултатите за магнитната възприемчивост.



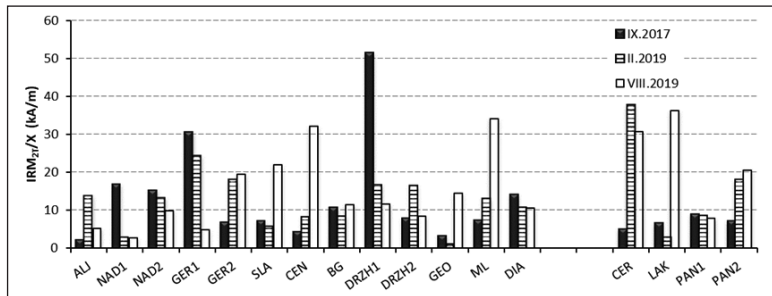
Фиг. 6. Безхистерезисна (ARM) и изотермична (IRM) намагнитеност на праховите проби от детски площадки.

### 3.2.2. Отношения на магнитните параметри като индикатори за размера на частиците.

Тъй като остатъчните намагнитености като големина зависят от количеството на съответните по размер частици (еднодоменни, многодоменни), за изследване на разпределението на размера на магнитните частици, в магнетизма на околната среда се използват различни отношения на магнитни параметри. При разглеждане на отношения на два параметъра, които зависят и от концентрацията, и от размера на дадена фракция частици, се премахва влиянието на концентрацията, тъй като се предполага, че тази фракция дава сравним принос и към двете величини. Най-често използваните отношения са:  $ARM/IRM_{100}$ ;  $ARM/SIRM$ ;  $SIRM/c$  (Thompson and Oldfield, 1986; Evans and Heller, 2003). Използването на тези отношения като индикатори за размера на частиците се базира на експериментално установената зависимост от размера поотделно на всяка една величина (Peters and Dekkers, 2003). Това се прави обикновено за синтетични минерали с предварително известно разпределение на размерите. Отношенията, в които се използват ARM и  $IRM$  са чувствителни към наличието на стабилни еднодоменни частици, тъй като ARM се придобива най-ефективно от тях, а  $IRM$  - от многодоменните частици (Maher, 1988). На Фиг. 7 и 8 са показани стойностите на отношенията  $ARM/IRM_{2T}$   $SIRM_{2T}/c_{fine}$  за изследваните колекции прахове от детски площадки от София.



Фиг. 7. Вариации на отношението  $ARM/IRM_{2T}$  по образци за трите колекции прахове.



Фиг. 8. Вариации на отношението  $IRM_{2T}/c$  по образци за трите колекции прахове.

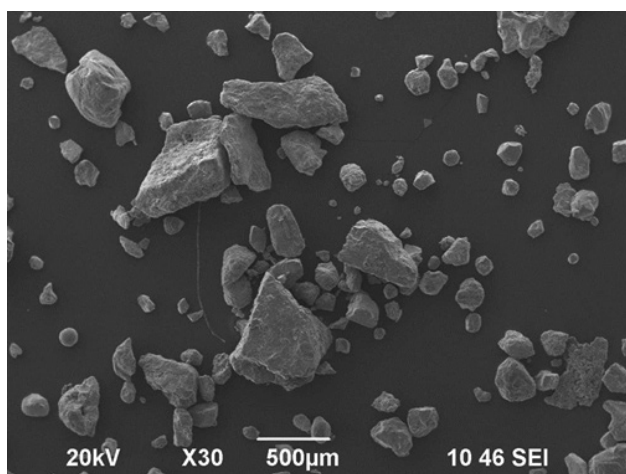
Стойностите на отношението  $ARM/IRM_{2T}$  имат максимални стойности за образци, в които има значително количество най-фини, стабилни еднодоменни частици (т.е. с размери  $\sim 0.03$  mm) (Evans and Heller, 2003). От Фигура 7 се вижда, че за всеки локалитет отношението варира в рамките на изследвания период от около 2 години. За повечето локалитети отношението е по-високо за есенно-зимните месеци, но за няколко (Младост, Дианабад) и в летния сезон стойностите са завишени в сравнение с февруари 2019 г. Най-високи стойности на  $ARM/IRM_{2T}$  се наблюдават за локалитетите в Надежда, Герена, Слатина, което показва, че в тях фракцията частици, която носи остатъчна намагнитеност, е с най-дребни размери.

Отношението  $IRM_{2T}/c$  има максимални стойности за магнетитови частици с размери 0.1-2 mm (Peters and Dekkers, 2003). Стойностите на  $IRM_{2T}/c$  за изследваните прахови проби варират в границите 1 – 50 kA/m (Фиг. 8), които са в съгласие с данните за магнетитови частици с горните размери (Peters and Dekkers, 2003). Максималните стойности на отношението се наблюдават в локалитетите Дружба 1, Герена, Център, Церово, Лакатник. В локалитетите Център, Слатина, Младост, Лакатник се откроява силно завишено отношение  $IRM_{2T}/c$  за летния период на опробване в сравнение със стойностите за зимните месеци. Това показва, че през летния сезон там се натрупват много повече едри магнетитови псевдо-еднодоменни и многодоменни частици.

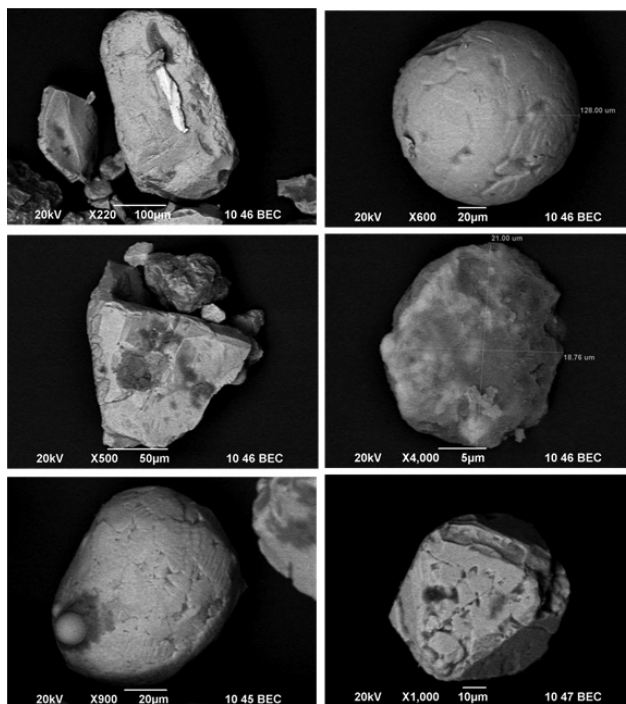
#### **4. Морфология и елементен състав на антропогенните частици от прахта от детски площадки.**

Изследванията със сканиращ електронен микроскоп (SEM) са проведени върху магнитни екстракти от избрани проби, събрани през трите кампании на опробване. Материалът, фиксиран върху държача на SEM е изследван в режим на вторично разсеяни електрони за придобиване на обща представа за вариациите в размера и формата на частиците. Снимките на единични частици са направени в режим на обратно отразени електрони. Тази методология за изследване на единични частици бе избрана за получаване на информация за съдържанието на елементи с по-голям атомен номер (т.е. металите), тъй като те са от интерес за целите на изследването. Наблюдавани са единични частици, на които е проведен и анализ на елементния състав, направен в центъра на частицата. Изследвани са няколко проби от различните колекции.

Както се вижда от Фиг. 9 и Фиг. 10, прахта от локалитета в кв. Дружба съдържа различни по размер антропогенни частици – от десетки микрона до по-едри от 100  $\mu$ m частици. По размер сферичните частици са най-едри. Те се характеризират със специфична морфология на повърхността, наподобяваща портокалова кора. Тази структура се формира в резултат на процеси, свързани с високо-температурно горене (Vassilev, 1992; Jordanova et al., 2006). Такива антропогенни частици обикновено се емитират от ТЕЦ при изгаряне на въглища, както и при определени индустриални металообработващи процеси. Елементният състав, определен в избрани области на изследваните частици показва доминиращ принос на окисите на желязото. В значително по-ниски концентрации присъстват алуминий и силиций.



**Фиг. 9.** Общ изглед на материал от обр. DRZH1 (кв. Дружба) в режим на вторично разсеяни електрони. Вижда се наличие на разнообразни по размер и форма частици – едри, неправилни; дребни, сферични.



**Фиг. 10.** SEM изображения на единични частици от проба DRZH1 (кв. Дружба) в режим на обратно отразени електрони.



## **5. Изводи и заключения**

1. Основният магнитен минерал в праховете от детски площадки е магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), магхемит ( $\text{g-Fe}_2\text{O}_3$ ), както и титаномagnetит и/или магнетит с други замествания в кристалната решетка, които понижават температурата на Кюри.

2. Най-високи стойности на магнитната възприемчивост ( $c$ ) са получени за праховете от детски площадки в североизточните и централни части на София, а най-ниски – в източните и югоизточни части. Подобна зависимост се наблюдава и за концентрацията на по-дребните частици, носещи остатъчните намагнитености (ARM, IRM).

3. Въз основа на получените резултати за вида, концентрацията и размера на магнитните частици в праховете, е направен извода, че през есенно-зимните месеци в праховото замърсяване доминира приноса от дребните ФПЧ, а през летния сезон – приноса от локалните източници (най-вече автомобилния трафик). Този извод се подкрепя и от факта, че през зимните месеци липсва листната маса на растителността, с която обикновено са оградени детските площадки, което позволява по-свободна циркулация и отлагане на фините частици.

4. Проследявайки времевата еволюция на магнитните характеристики, и по-специално на магнитната възприемчивост за обхванатия 2-годишен период, е установена тенденция на намаляване на  $c$ , което може да се свърже с подобряване на качеството на околната среда в града. Въпреки това, локалитетите в кв. Надежда, кв. Герена, както и в централната част, показват най-високо ниво на замърсяване.

5. Наблюденията със сканиращ електронен микроскоп на магнитни екстракти от прахове от няколко локалитета показват наличие на множество едри антропогенни частици с неправилна форма, както и сферични частици, образувани в резултат на високо-температурни технологични процеси. Всички антропогенни частици са силно обогатени с железни оксиди.

6. Магнитометричният метод успешно е приложен за установяване на степента на антропогенно замърсяване на детски площадки от гр. София. Установени са важни зависимости, свързани със сезонните особености в разпространението на антропогенните частици. Това показва, че методът може успешно да се прилага за дългосрочен мониторинг на качеството на околната среда в градовете.

## **Литература**

- Banerjee, S. K., King, J., Marvin, J., 1981. A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies. *Geophysical Research Letters*, vol. 8, no. 4, 333-336.
- Dunlop, D. and Özdemir, Ö., 1997. *Rock Magnetism. Fundamentals and frontiers*, (D. Edwards, ed.), Cambridge Studies in Magnetism, Cambridge University Press.
- Egli, R. and W. Lowrie, 2002. Anhyseretic remanent magnetization of fine magnetic particles, *J. Geophys. Res.*, 107(B10), 2209, doi:10.1029/2001JB000671,
- Evans, M., Heller, F., 2003. *Environmental Magnetism. In: Principles and Applications of Enviromagnetism*. Academic Press, California, USA.



- Frias, M., de Rojas, M. I. S., 2002. Total and soluble chromium, nickel and cobalt content in the main materials used in the manufacturing of Spanish commercial cements. *Cement Concrete Res* 32(3), 435-440.
- Jordanova, D., Jordanova, N., Hoffmann, V., 2006. Magnetic mineralogy and grain-size dependence of hysteresis parameters of single spherules from industrial waste products. *Phys. Earth Planet. Inter.* 154, 255-265.
- Laidlaw, M. A. S., Mielke, H. W., Filippelli, G. M., Johnson, D. L., Gonzales, C. R. 2005. Seasonality and Children's Blood Lead Levels: Developing a Predictive Model Using Climatic Variables and Blood Lead Data from Indianapolis, Indiana, Syracuse, New York, and New Orleans, Louisiana (USA). *Environ Health Perspect.* 113(6), 793-800.
- Laidlaw, M. A., Taylor, M. P., 2011. Potential for childhood lead poisoning in the inner cities of Australia due to exposure to lead in soil dust. *Environ. Pollut.*; 159, 1-9.
- Lowrie, W., 1990. Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties. *Geophysical Research Letters*, 17, 159-162.
- Maher, B. A., 1988. Magnetic properties of some synthetic submicron magnetites. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 94: 83-96.
- O'Reilly, W. 1984. *Rock and Mineral Magnetism*. Blackie & Son Ltd, Springer, US, 220 pp.
- Peters, C. and Dekkers, M. J., 2003. Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size. *Phys. Chem. Earth*, 28, 659-667.
- Petrovský, E. and Elwood, B., 1999. Magnetic monitoring of air-, land- and water pollution. In: *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. Eds. B. Maher and R. Thompson, Cambridge Univ. Press., pp. 279-322.
- Thompson, R. and F. Oldfield, 1986. *Environmental Magnetism*, Allen & Unwin, Winchester, MA
- Vassilev, S.V. 1992. Phase mineralogy studies of solid waste products from coal burning at some Bulgarian thermoelectric power plants. *Fuel*, 71(6), 625-633.
- Wachtendorf, V., Kalbe, U., Krüger, O., Bandow, N., 2017. Influence of weathering on the leaching behaviour of zinc and PAH from synthetic sports surfaces. *Polym Test* 63: 621-631.
- Wong, J. W. C., Mak, N. K., 1997. Heavy metal pollution in children playgrounds in Hong Kong and its health implications. *Environ Technol.* 18: 109-115.

## **Geophysical magnetometric study on the degree of anthropogenic pollution at children playgrounds in the city of Sofia**

Daniel Ishlyamski, Bozhurka Georgieva, Neli Jordanova

Geophysical magnetometric study on a collection of dust material from playgrounds in the city of Sofia and several sub-urban areas in its vicinity was carried out. The main aims of the study were: 1) evaluation of the degree of anthropogenic pollution at the urban playgrounds in Sofia; 2) tracking out the changes in the quality of environment during different seasons; 3) obtaining new data on the magnetic properties of anthropogenic settled dust. Experimental mineral magnetic data show that the main magnetic minerals are magnetite, maghemite and titanomagnetite. The obtained magnetic results are interpreted in relation to the degree of anthropogenic pollution by local (point) and areal (distant)

sources, related to the atmospheric air circulation in the city and the particulate matter (PM) distribution. Magnetic susceptibility of the fine-grained ( $d < 1\text{mm}$ ) dust fraction for the locations, sampled in the autumn 2017 and January 2019 is higher than the susceptibility of the coarse ( $d > 1\text{mm}$ ) fraction. Contrary, playground dust sampled in summer 2019 has magnetic susceptibility of the coarse fraction higher than that of the fine fraction. It is concluded that fine-grained PM pollution dominates during the autumn-winter seasons, while during the summer season local sources (mostly automobile traffic) dominate. Scanning electron microscopy observations on magnetic extracts from playground dusts show abundant presence of anthropogenic particles of irregular shape and spherules formed as a result of high-temperature technological processes. All anthropogenic particles are strongly enhanced in iron oxides. In some of them other chemical elements, like lead, zinc and antimony are also detected.

## РАЗРУШИТЕЛНОТО ЗЕМЕТРЕСЕНИЕ ОТ 30(18) СЕПТЕМВРИ 1858 Г.

*Д. Солаков<sup>1</sup>, И. Александрова<sup>1</sup>, С. Симеонова<sup>1</sup>, Пл. Райкова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Национален институт по Геофизика, Геодезия и География, 1113, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 3, София, България, e-mail: dimos@geophys.bas.bg, i.alex@abv.bg, stelas@geophys.bas.bg, plamena.raikova@gmail.com

DOI: 10.34975/bgj-2020.43.2

**Абстракт:** София е столицата и най-големият град в България. София е основен административен, индустриален, транспортен, културен и университетски център на страната, като в нея е съсредоточено 1/6 от промишленото производство на България. Градът е културен, икономически и административен център на държавата с висока плътност на населението, който е изложен на висок сеизмичен риск. През изминалите векове в София и околностите ѝ са реализирани силни земетресения – събитието от 1818 с епицентрална интензивност  $I_0=8-9$  MSK64 и най-силното документирано земетресение, събитието от 1858 с интензивност  $I_0=9$  MSK64. В настоящото изследване, за оценка последствията от земетресението през 1858, е събрана и анализирана макросеизмичната информация от множество налични писмени източници – стари религиозни приписки, ръкописи, записки, писма, бележки, вестници, списания и др.

**Ключови думи:** разрушително земетресение, София, интензивност

## Въведение

България е разположена в източната част на Балканския полуостров. В съвременните неомобилистични представи тази част на Балканския полуостров представлява сектор от интензивно деформиращата се континентално маргинална зона на Евразия. Стойностите на скоростта на съвременните хоризонтални движения, които се увеличават от север на юг потвърждават екстензионния режим в Централна Западна и Югозападна България. Град София е разположен в централната част на Западна България, в Софийската котловина, която е заобиколена от планините: Витоша на юг, Люлин на запад и Стара планина на север. Градът е изграден върху

четирите тераси на река Искър и нейните притоци: Перловска и Владайска (Елешница). Софийска котловина е разположена в северните части на транзитна зона между Евразийската континентална плоча и Егейската микроплоча – т.нар. Южно Балкански екстензионен район, със северна граница Стара планина.

София носи името на късно античната ранно християнска съборна църква на града „Света София“. Най-ранните археологични свидетелства за обитаване на територията на София са от ранния неолит (VI хилядолетие пр. Хр.). София е обявена за столица на 3 април 1879 г. от Учредителното народно събрание по предложение на проф. Марин Дринов, като стар български град.

Сеизмичността в сеизмогенна зона София е свързана предимно с периферните неотектонски разломи на Софийски грабен. Сеизмичната активност на Софийска зона представлява голям интерес поради концентрацията на промишлени, административни и граждански обекти и висока плътност на населението в нея. Проведените сеизмологични изследвания показват, че в Софийска зона значителни разрушения могат да се очакват от земетресенията, генерирани в локалните огнища.

## **Исторически земетресения**

Историческият преглед на сеизмичната активност в Софийска зона показва, че в нея са ставали силни земетресения с разрушителен ефект върху град София и околностите му. Открити са исторически документи за сеизмични прояви в тази зона от XV, XVI, XVII и XVIII век. Тези данни като цяло са твърде неточни и може само приблизително да се оцени силата и местоположението на събитията. По-точно документирани са земетресенията, станали в Софийска зона през XIX век, като основен източник на информация са работите на Спас Вацов от 1902 г. и 1908 г.

Първото документирано разрушително земетресение през XIX е станало на 4.04.1818 г. с  $I_0=8-9$  МШК64. Според сведенията, представени във Вацов (1902) „се тресла земята... много здания и джамии попадали, жежки и студени води пресекли“ и „...насред Банябаши (при турската баня) извряла жежка вода“.

Най-силното земетресение в исторически и съвременен план, станало около град София през 19<sup>ти</sup> век, е събитието от 30(18) септември 1858 г. ( $I_0=9$  МШК64). По това време София е неголям град (около 20 000 жители и площ от 2.8 km<sup>2</sup>) в границите на Отоманската империя. Земетресението е нанесло сериозни щети в града и е довело до появата на термални извори в западната му част.

За това земетресение учителят Сава Филаретов пише в Цариградски вестник: „В същия момент земята така страшно се залюля, че всички помислиха, че настъпва скончание мира света. След 2-3 минути се видя, че от 24 джамии, които се намираха в града, само 5 са останали с минарета... Но както на първите, така и на вторите стените и кубетата се разпукали...“. „От 7 църкви само в две може да се служи...“. „Половин час на запад от града на полето, където никога не е имало вода, в тоз час се показва гореща вода да извира и скача нагоре...“ „...планината Витоша, един час на югозапад от София, да се е разпукала на едно място от половин аришин и половин час на дълж между селата Бояна и Драгалевци...от

*тая пукнатина се е показал гъст дим и син пламък... “...кората на земята не се люлееше, а скачаше; ту се повдигаше примерно на един аришин нагоре, ту падаше пак долу с неописуема чевръстина и ужасен екот. „На джамията на „Башичешме“ металният, конусообразен покрив на минарето, който от земетресението бе отхвърлен нагоре, като паднал надолу, забучил се с върха си във викалото на същото минаре...” (Вацов, 1902).*

В настоящото изследване са анализирани многобройните, публикувани писмени източници - ръкописи, записки, писма, вестници, списания и други издания, отразяващи наблюдаваните въздействия от земетресението (от 30 септември 1858 г.) върху сградите и населението на град София и околностите, както и в други близки селища на територията на България. Допълнително, използвайки наличната макро-сеизмична информация, са оценени някои от основните параметри на събитието.

### **Документирани макросеизмични въздействия от земетресението на 30(18) септември 1858 г.**

Земетресението е засегнало чувствително голяма част от сградите в град София и близките населени места (сегашните квартали на София: Бояна, Драгалевци, Горна Баня. Княжево, Овча купел). Около 70-80% от постройките са повредени и опасни за използване (Авдев, 2007).

От наличната макросеизмична информация може да се обобщи, че на определени места земетресението е било усетено и не са описани подробности за ефектите му. На други места информацията за събитието е подробна, което дава възможност за картографиране на последствията в съответни точки. Данните отразяват повреди на монументални, за времето си, сгради – църкви, джамии, манастири, обществени сгради с подсилени каменни стени. Информацията за щетите върху обикновените жилищни къщи – каменни и дървени не са така подробно засегнати. Най-общо е упоменато, че каменни домове са „паднали“. Очевидно е, че при едно и също ниво на приповърхностните движения на почвата реакцията при различните типове конструкции ще бъде различна. За да се избегне подценяване или надценяване на интензивностните стойности за определяне на въздействията в района на град София и близките околности са взети под внимание конкретните данни за документирани щети.

Документирани макросеизмични въздействия от земетресението на 30(18) септември 1858 г. са подробно представени в Таблица 1. Наблюдаваните характерни особености при разрушенията на сградите са оценени по макросеизмичната скала MSK64 (Medvedev, Sponheuer and Kärnik, 1965). Посочена е най-вероятната степен за получаване на съответния макросеизмичен ефект (увреждане).

За оценка на вторичните макросеизмични ефекти като каменопади, промяна в нивото на минералните извори, поява на нови извори и повърхностни разкъсвания, наблюдавани в близките населени места е приложена и Макросеизмичната скала ESI-07 (представена в Michetti et al. (2011)). Тази скала се основава на ефектите в околната среда, породени при реализация на земетресение.

В Таблица 1 са посочени наблюдавани вторични ефекти, индуцирани от земетресението – търкаляне на камъни и размери на повърхностно разкъсване. Тези ефекти дават основание за разпределението на най-високите интензивности в околностите на град София.

Земетресението е последвано от интензивна афтершокова активност, продължила повече от две години.

Фактът, че земетресението е взело сравнително малко жертви, може да се обясни с по-долу представените демографски особености и тип строителство в София през 1858 г. (съгласно Авдев, 2007).

*Първо* – през 1858 г. град София е малко селище с около 20 000 жители и площ от 2.8 km<sup>2</sup>. Границите на града обхващат територия, която е по-малка от настоящия софийски център. Максималните въздействия (от 9 степен MSK64) са върху значително по-малко населените околности на града (селата през 1858 г. Бояна, Драгалевци, Овча купел, Горна Баня, виж Таблица 1).

*Второ* – земетресението е реализирано на обед, когато голяма част от хората са работили извън града на полето.

*Трето* – устойчивите на земетресения сградни конструкции. Повечето от сградите са значително повредени, но много малко от тях са напълно разрушени.

**Таблица 1.** Документирани въздействия от земетресението, реализирано на 30.09.1858 г. (M<sub>w</sub>6.5) в Софийска сеизмогенна зона

Селище	Описание	Източник	Интензивност I MSK 64
София	„От новата църква Св. Крал Стефан (дн. Хр. Св. Неделя), която сега се прави отново, падна един свод (кубе) и убива един от работниците ....“	Авдев. Ст., 2007	8
София	„По време на 3-то в местността „Земляне“ (мин. извор при Овча купел), където никога преди това не е имало топла вода се показва „жежка вода“, която скачала нагоре и била толкова много, че можела да кара 3 воденични камъка.... Като гейзер - стълб от прах, земя и вода“	Вацов, Сп., 1902	8.5
Витоша	„...планината Витоша, един час на ЮЗ от София, се е разпукала на едно място от половин аршин (30-40см) и половин час надлъж (около 1.5-2км) между селата Бояна и Драгалевци селяните с удивление казват, че най-напред когато се е разтърсила земята от тази пукнатина се е показал гъст дим и син пламък...Изпадали и големи каменни скали.“	Вацов, Сп., 1902	9
София	„...Изпадаха тогава много джамии ...и на Кору чешма джамията падна, та притисна Исаия Ахтар“	Авдев. Ст., 2007	8.5

София	„...На джамията на Баш чешма металният конусообразен покрив на минарето, който от земетресението бе подхвърлен нагоре, като падна надолу, забучил се е с върха си във викалото (чанака) на същото минаре“.	Вацов, Сп., 1902	7.5
София	„Боюк джамия падна върху ахтарницата на Исаия Ахтарина и го уби...“	Авдев. Ст., 2007	8.5
София	падна, Челеби джамия	Авдев. Ст., 2007	8.5
София	Сиявуш джамия (ц. Св.София). „При тази тресавица се е разсипала отчасти Св. София, която дотогава е служела за кланяне и молитва на хаскера... След тази тресавица турците престанали да се молят в нея.“ Храмът е бил празен, само две момчета загиннали, които се били покатерили на минарето.	в Паметни бележки из Средец. (Авдев. Ст., 2007)	8.5
София	„Падна църквата „Св. Никола Мали“	Начев, В. и др., 1984	8.5
София	„Падна църквата „Св. Богородица Пречиста“	Начев, В. и др., 1984	8.5
Ихтиман	„... съборени комините на къщите“	Вацов С., 1912	6.5
Долна баня	„...а топлите води в с Долна баня толкова намалели, някои външни чешми престанали да текат и женската баня запустяла.“	Вацов. Сп., 1912	7
Черепишки манастир	„1858, септември 18, три пъти този ден земята се тресе...“	Ив. Гогошев, 1932	усетено
Враца	„1858, 18 септември, Кога се търси Земята“	Във Вратца-Сборник умотворения, наука и книжнин (Авдев. Ст., 2007)	усетено
Вършец	„Да се знае кога се търси Земята 1858, месец септември, на 18 ден...“	Във Вратца-Сборник умотворения, наука и книжнин (Авдев. Ст., 2007)	усетено
Ловеч	Земетресението е било усетено	Вацов, Сп., 1907	усетено
Бояна	„...изворът наречен „Светата Вода“ престанал в деня на 3-то и протекъл чак след няколко дни... Търкаляне на камъни от Витоша.“	Вацов, Сп., 1902	9
Драгалевци	като Бояна	Вацов, Сп., 1902	9
Горна баня	„...и там резервоарът в минералната баня така се препълнил във време на 3-то, щото всички избягали навън“	Вацов, Сп., 1902	8
София	„...както и къшлата се събориха“. Отнася се за казармите, които са се намирали на мястото на днешния Военен клуб.	Авдев. Ст., 2007	8

Пловдив	Усетено	Цариградски вестник, бр. 398, 1858, Авдев. Ст., 2007	усетено
Пазарджик	Усетено	Цариградски вестник, бр. 398, 1858, Авдев. Ст., 2007	усетено
Рилски манастир	Силно усетено. Пропукали се някои стени. Скелета, поставени за подновяване на стенописите в манастирската църква, така се разиграли, че живописците едва успели да наскочат от тях и да побягнат навън.	Вацов, Сп., 1902.	7
Брезник	„Да се знае кога се тресе земята на месец септември, ден 18, 1858, у пладне се тресе три пъти и по пладне два пъти, и много се свет изплаши. ... Тогава вършееха брезничани на бегличкото гумно.,,	Гогошев, И., 1935	6

При изследване на земетресението от 30(18) септември 1858 г. Киров (1952) прави следните заключения:

- 1) „Вертикалното ускорение на това земетресение е било много голямо - може би от порядъка на земното ускорение“;
- 2) „Интензивността .... е била минимум IX, а максимум X степен по динамичната интернационална скала.“
- 3) „... трусът принадлежи към умерено дълбоките земетресения - може би от порядъка на 10-15 km“

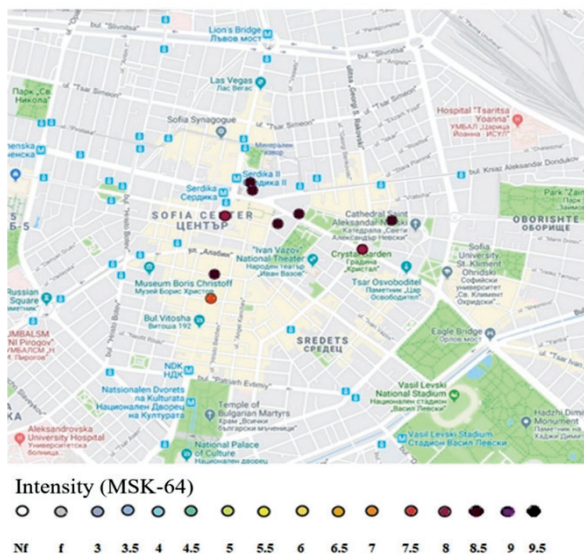
На Фигура 1 е представена силно увредената от земетресението Сиявуш джамия (настоящата църква Св. София).



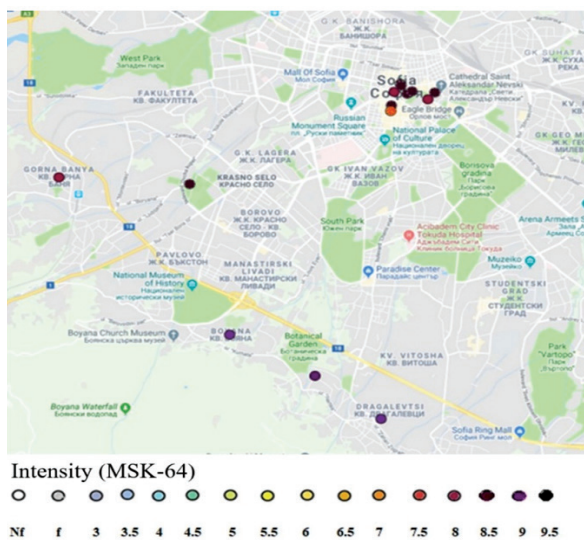
Фиг. 1. Сиявуш джамия (църквата Св. София). Снимка от 1879 г.



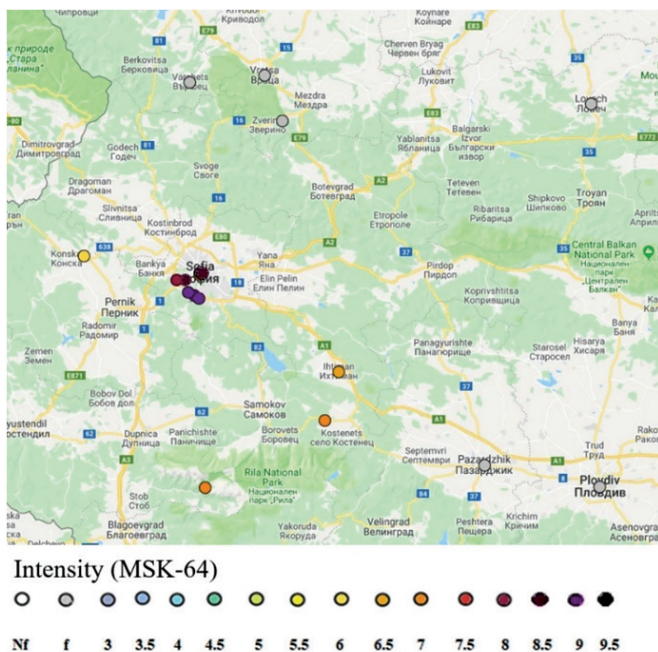
Фигури 2 - 4 илюстрират разпределението на документираните въздействия, съответно върху град София, околностите на града през 1858 (селата Бояна, Драгалевци, Овча купел, Княжево и Горна Бана) и върху други селища от територията на България.



Фиг. 2. Въздействия от земетресението, реализирано през 1858 г. върху територията на гр. София



Фиг. 3. Въздействия от земетресението, реализирано през 1858 г. върху територията на съвременна София



Фиг. 4. Въздействия от земетресението, реализирано през 1858 г. върху територията на страната

## Параметри на земетресението от 30(18) септември 1858 г.

В някои от съществуващите за региона каталози са оценени основни параметри на историческото земетресение от 1858 г., реализирано в близост до град София. В Таблица 2 са представени налични оценки на координатите, магнитуда и епицентралната интензивност на събитието.

Таблица 2. Параметри на земетресението от 1858 г., дадени в съществуващи каталози

$\phi$ (°N)	$\lambda$ (°E)	M	$I_0$	Източник	Абревиатура
42.8	23.5	6.6 ( $M_w$ )	8	Papazachos et al. (2000)	GR
42.8	23.2			Karnik (1971)	KR
42.5	23.3			Utsu (1990)	UT
42.8	23.25	5.9 ( $M_s$ )		Grigorova et al. (1978)	BG
42.667	23.286	6.2 ( $M_w$ )		Stucchi et al (2013)	SHARE
42.75	23.25	6.1 ( $M_s$ )	9	Shebalin et al. (1998)	SH

## Епицентрална интензивност, $I_0$

В Таблица 2 са дадени две оценки на епицентралната интензивност  $I_0$ . Очевидно е, че координатите на епицентъра се различават съществено в различните източници. Магнитудите варират в широк диапазон и са дадени само две, различаващи се с единица оценки на епицентралната интензивност.

На базата на наличната макросейзмична информация в настоящата работа са преоценени и представени, по-долу, някои от параметрите на земетресението от септември 1858 г., реализирано в близост до град София.

В изследването на Papazachos et al. (2000) интензивността на земетресениято е от 8 степен, а в изследване на Shebalin et al. (1998), интензивността е 9<sup>та</sup> степен. Според Киров (1952) „Интензивността .... е била минимум 9, а максимум 10 степен...“, а в Григорова и Григоров (1964) е посочено, че интензитетът на земетресението не превишава 9<sup>та</sup> степен.

Представените по-горе оценки и подробната макросейзмична информация в Таблица 1 дават основание да се приеме, че епицентралната интензивност  $I_0$ , на земетресението от 1858 в град София, е 9<sup>та</sup> степен по скалата MSK64 ( $I_0=9$  MSK64).

## Магнитуд по сеизмичен момент, $M_w$

В Таблица 2 са представени две оценки на магнитуд по сеизмичен момент  $M_w$  - 6.6 в Papazachos et al. (2000) и 6.2 в Stucchi et al. (2013).

Магнитудът на земетресението може да се оцени в съответствие с макросейзмичната информация в Таблица 1: „планината Витоша, един час на ЮЗ от София, се е разпукала на едно място от половин аршин (30-40см)“ Вацов (1902). Ако се приеме, че средното преместване е 40 см то  $M_w=6.5\pm0.34$  и  $M_w=6.3\pm0.34$  при предположение за максимално преместване 40 см (съгласно Wells and Coppersmith, 1994).

Допълнително, магнитудът може да бъде оценен и въз основа на епицентралната интензивност  $I_0$ , използвайки релациите  $M_w=M_w(I_0)$ , получени по метода на най-малките квадрати (LSQ) и метода на ортогонална регресия (OR) представени в публикацията на Aleksandrova et al (2019). Оценките за магнитуда по сеизмичен момент са  $M_w = 6.47\pm0.4$  (по LSQ) и  $M_w = 6.56\pm0.4$  (по OR).

Тук получените оценки на магнитуда дават основание да се предположи, че магнитуда по сеизмичен момент на земетресението от 30(18) септември 1858 г., реализирано в околностите на град София, е  $M_w = 6.5$ .

## Координати на епицентъра

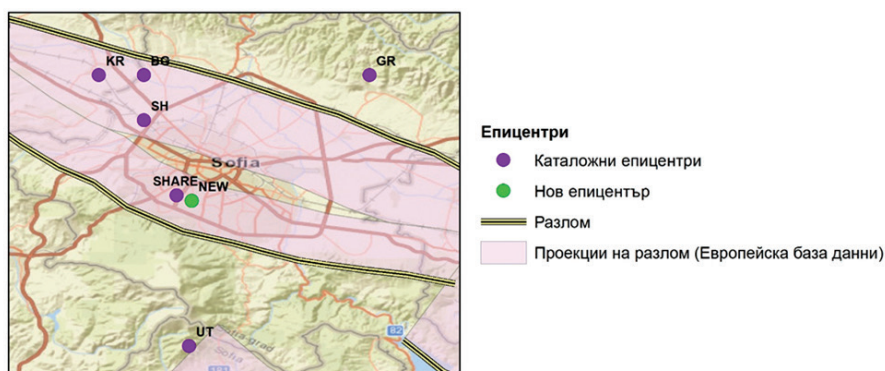
На Фиг. 5 са представени епицентрите на земетресението, дадени в различните каталози (Таблица 2).

В работата на Вацов (1902) вторичните явления, индуцирани от земетресението (посочени в Таблица 1) са детайлно описани „...планината Витоша, един час на ЮЗ от София, се е разпукала на едно място от половин аршин (30-40 cm) и половин

час надлъж (около 1.5-2 km ) между селата Бояна и Драгалевци и селяните с удивление казват, че най-напред когато се е разтърсила земята и от тази пукнатина се е показал гъст дим и син пламък“. „До 5 октомври там течало страшно..“. „Изпадали и големи каменни скали.“

Въз основа на това описание и допълнителните макросеизмични въздействия (посочени в Таблица1) може да се предположи, че земетресението от 1858 ( $M_w 6.5$ ) е реализирано по разлома, разположен южно от гр. София в полите на Витоша.

При  $M_w = 6.5$ , взимайки в предвид геометрията на разлома (залягане  $60^\circ$ ), ширината на разломяване (оценена по Wells and Coppersmith, 1994) 14 km и местоположението на пукнатината върху земната повърхност, то една оценка на проекцията на центъра на разломяването върху земната повърхност е с координати  $\varphi -42.66^\circ N$  и  $\lambda -23.3^\circ E$  и може да се приеме за епицентър на земетресението. На Фиг. 5 предполагаемият епицентър е маркиран като NEW и оцветен със зелено.



Фиг. 5. Оценки на епицентъра на земетресението от 1858 г.

## Заклучение

Актуално за сеизмичния риск на съвременна София е предупреждението на И. Начев, написано в списание „Природа“ още през 1897 г. „От година на година се правят нови и големи здания.....Не е зле обаче нашите граждани и архитекти да имат предвид гореказаното (описани са последствията от земетресението от 1858 г.,  $M_w 6.5$ ). Не дай Боже едно подобно земетресение и нашата млада столица със своите нови и гиздави държавни и частни постройки би се обърнала на куп от развалини“ (Авдев Ст., 2007)

**Acknowledgments:** The present study has been carried out in the framework of the National Science Program “Environmental Protection and Reduction of Risks of Adverse Events and Natural Disasters”, approved by the Resolution of the Council of Ministers № 577/17.08.2018 supported by the Ministry of Education and Science of Bulgaria (Agreement № ДО-230/06-12-2018).

## Литература

- Aleksandrova, I., D. Solakov, S. Simeonova, P. Raykova, 2019. Impirical relations converting seismic intensity to moment magnitude. EAGE, BGS2019-SM2.2-N14P3.
- Grigorova, E., Christoskov L., Sokerova D., Rizhikova S., Roglinov A., 1978. Catalogue of earthquakes in Bulgaria and the nearby territories during the period 1st cent. BC-1977. Geoph. Inst-BAS, Sofia.
- Karnik, V., 1971. Seismicity of the European Area. Part 2 (1801-1900). Praha, 218 p.
- Medvedev, S., W. Sponheuer and V. Kärnik, 1965. Seismic Intensity Scale Version MSK64 by, UNESCO/NS/SEISM/28, Paris, 7 May 1965, 7 pp.
- Michetti, A. M., E. Esposito, L. Guerrieri, S. Porfido, L. Serva, R. Tatevossian, E. Vittori, F. Aude-mard, T. Azuma, J. Clague, V. Commerci, A. Gurpinar, J. McCalpin, B. Mohammadioun, N. A. Morner, Y. Ota, and E. Roghazin, 2011. Environmental Intensity Scale - ESI 2007 (English). In *Memorie Descrittive Carta Geologica d'Italia*, Vol. xyz, Draft14.09.2011, 7-10.
- Papazachos, B. C., Comninakis, P. E., Karakaisis, G. F., Karakostas, B. G., Papaioannou, Ch. A., Papazachos, C. B. and E. M. Scordilis, 2000. A catalogue of earthquakes in Greece and surrounding area for the period 550BC-1999, Publ. Geophys. Laboratory, University of Thessa-loniki, 1, 333 pp.
- Shebalin, N., Leydecker, G., N. G. Mokrushina, R. E. Tatevossian, O. Erteleva and V. Vassiliev, 1998. Earthquake Catalogue for Central and Southeastern Europe 342 BC - 1990 AD, Final Report to Contract No ETNU-CT93-0087 Brudde, (computer file <http://www.bgr.de/quake-cat>).
- Stucchi, M., A. Rovida, A. Gomez Capera, P. Alexandre, T. Camelbeeck, M. Demircioglu, P. Gas-perini, V. Kouskouna, R. Musson, M. Radulian, K. Sesetyan, S. Vilanova, D. Baumont, H. Bungum, D. Fäh, W. Lenhardt, K. Makropoulos, J. M. Martinez Solares, O. Scotti, M. Živčić, P. Albini, J. Batllo, C. Papaioannou, R. Tatevossian, M. Locati, C. Meletti, D. Viganò, D. Giardini, 2013. The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) 1000–1899, *Journal of Seismology* volume 17, 523-544.
- Utsu, T., 1990. Catalog of Damaging Earthquakes in the World (Through 1989), (in Japanese), Utsu, Tokuji, Tokyo, 243 pp. [https://iisee.kenken.go.jp/utsu/index\\_eng.html](https://iisee.kenken.go.jp/utsu/index_eng.html).
- Wells, D. and Coppersmith, K., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *BSSA*, 84(4), 974-1002.
- Авдев, Ст., 2007. Разрушителните исторически земетресения в София., Изд. Бесике, София, стр. 120.
- Вацов, Сп., 1912. Градиво за сеизмографията на България, II, 227-228, Списание на БАН.
- Вацов, Сп., 1902. Земетресенията в България през XIX век., стр. 93. Ц.М.См., С., Д.П.
- Вацов, Сп., 1908. Градиво за сеизмографията в България, LXIX, Сп. Бълг. Кн. Д-во, БАН.
- Вацов, Сп., 1907. Градиво за сеизмографията на България, т. 68, с. 643. Списание на БАН.
- Гогошев, Ив. 1932. Дамаскин Хилендарец и неговият дневник 1808–1869. Сп. Духовна култура, август.
- Гогошев, Ив. 1935. Стари записки и подписки, с. 13–14. Св. III, С. печ. Художник.
- Григорова, Е., Б. Григоров, 1964. Епицентрите и сеизмичните линии в НР България. БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ. Геофизичен институт. София, стр. 69.
- Киров, К., 1952. Принос към изучаването на земетресенията в Софийската котловина. Год. Гл. Дир.Геол. и Мин. проучв., 5, 407.
- Начев, В., Н. Ферманджиев (съст), 1984. Писахме да се знае (преписки и летописи), София, 1984, стр. 173.

## **The devastating earthquake of September 30(18), 1858**

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

**Abstract:** The city of Sofia is the capital of Bulgaria. It is the most populated (with more than 1.2 mil. inhabitants), industrial and cultural region of Bulgaria that faces considerable earthquake risk. The city of Sofia represents a typical example of high seismic risk area in the central Balkans. Over the past centuries, the city of Sofia has experienced strong earthquakes: the 1818 earthquake with epicentral intensity  $I_0=8-9$  MSK 64 and the 1858 earthquake with  $I_0=9$  MSK 64. In the present study, to assess the consequences of the 1858 earthquake, macroseismic information from a number of available written sources - old religious records, letters, memoirs, newspapers, journals and others was collected and analysed.



## MONITORING AND FORECASTING THE BIOLOGICALLY ACTIVE ULTRAVIOLET RADIATION OF THE SUN

*P. Mukhtarov, N. Miloshev, G. Gadzhev, R. Bojilova*

National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography - Bulgarian Academy of Sciences, str. Acad. G. Bonchev, bl. 3, Sofia 1113, Bulgaria, e-mail: engpjm@abv.bg, miloshev@geophys.bas.bg, ggadjev@geophys.bas.bg, rbojilova@geophys.bas.bg

DOI: 10.34975/bgj-2020.43.3

**Abstract.** This article presents information about the importance of biologically active ultraviolet radiation from the Sun (UV-B), which is the subject of long-term (2011-2019) monitoring at the National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography - Bulgarian Academy of Sciences. Information on the technique, the units of measurement and the summarized characteristics of the diurnal and seasonal course of UV-B are presented. On the basis of simple physical concepts of absorption of UV- radiation in the Earth's atmosphere is proposed an empirical model for forecasting its integral value, depending on the daily weather and season. According to the recommendations of the World Health Organization, a method for real-time notification of the permissible stay in the sun has been developed. In conclusion, the information on UV-index, which is provided on the website of the National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography - Bulgarian Academy of Sciences is described in detail.

**Key words:** Solar ultraviolet radiation, UV-index, monitoring, empirical modelling

### Introduction

Solar radiation includes ultraviolet (UV) radiation, visible radiation (light), and infrared (IR) radiation. The radiation is often characterised by its wavelength, usually expressed in nanometers ( $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ ). When describing biological effects ultraviolet radiation is often subdivided into three spectral bands: UV-C radiation (100-280nm), UV-B radiation (280- 315nm) and UV-A radiation (315-400nm). UV radiation can be measured as an irradiance – the power falling upon a surface unit area – in units of  $\text{W}/\text{m}^2$ , or as a radiant exposure, or dose – the energy falling upon a surface unit area during a specified period of time – in units of  $\text{J}/\text{m}^2$ .

UV radiation is absorbed and scattered in the atmosphere. UV-C radiation is completely absorbed in the upper atmosphere by oxygen and ozone molecules. Most of the UV-B radiation is absorbed in the stratosphere by ozone molecules and only a few percent reach the surface of the Earth. Therefore, at the surface of the Earth the solar UV radiation is composed of a large amount of UV-A radiation and only a very small amount of UV-B radiation. UV-B radiation is known to be biologically damaging, whereas UV-A radiation is much less damaging but is known for its ability to tan the human skin. As ozone is the main absorber of UV-B radiation the UV-B intensity at the Earth's surface depends strongly on the total column of ozone in the atmosphere, thus on the thickness of the ozone layer (Kaleyna et. al, 2013a; Kaleyna et. al, 2013b). A factor, which describes the relation between the sensitivity of the UV-B intensity to changes in total ozone, is the so-called Radiation Amplification Factor (RAF). For small changes in the ozone layer thickness the RAF represents the percent change in UV-B intensity for a 1-percent change in the total column ozone (Kaleyna et. al, 2014).

Solar elevation is the angle between the horizon and the direction to the sun. The solar zenith angle (SZA) is often used in place of the solar elevation: it is the angle between the zenith and the direction to the sun. For high solar elevations the UV radiation is more intense because the rays from the sun have a shorter path through the atmosphere and therefore pass through a smaller amount of absorbers. As the UV irradiance depends strongly on the solar elevation it changes with latitude, season and time, being highest in the tropics, in summer and at noon.

The UV irradiance increases with altitude because the amount of absorbers in the overlaying atmosphere decreases with altitude. Measurements show that the UV irradiance increases by 6-8% per 1000 m increase in altitude.

At the surface of the Earth solar radiation is composed of a direct and a scattered (diffuse) components. Solar radiation is scattered on air molecules and on particles such as aerosols and water droplets. The direct component consists of the rays from the sun that has passed directly through the atmosphere without being scattered or absorbed. The diffuse component consists of rays that have been scattered at least once before reaching the ground. Scattering depends strongly on wavelength. The sky looks blue because blue radiation is scattered more than the other components. UV radiation is scattered even more and at the surface of the Earth the UV-B is roughly composed of a 1:1 mixture of direct and diffuse radiation.

The UV irradiance is higher when the sky is cloudless. Clouds generally reduce the UV irradiance but the attenuation by clouds depends on both the thickness and the type of clouds (optical depth of clouds). Thin or scattered clouds have only a little effect on UV at the ground. At certain conditions and for short times a small amount of clouds may even enhance the UV irradiance comparing the fully clear skies. In hazy conditions UV radiation is absorbed and scattered on water vapour and aerosols and this leads to decreasing of the UV irradiance.

Part of the UV radiation that reaches the ground is absorbed by the Earth's surface and part of it is reflected back to space. The amount of reflected radiation depends on the properties of the surface. Most natural surfaces such as grass, soil and water reflect less than about 10% of the falling UV radiation. Fresh snow, on the other hand, may reflect up



to about 80% of the falling UV radiation. During winter and spring and a cloud-free sky, the reflection of snow can increase UV radiation on inclined surfaces to values typical of summer. This is important at higher altitudes and at higher latitudes. Sand may reflect about 25% of the UV radiation and can increase the UV exposure at the beach. About 95% of the UV radiation penetrate into the water and 50% penetrate to a depth of about 3 m. An action spectrum describes the relative effectiveness of UV radiation at a particular wavelength in producing a particular biological response. The biological response may refer to various detrimental effects on biological subjects including humans, animals or plants. An action spectrum for a given biological effect is used as a wavelength-dependening weighting factor to the spectral UV irradiance (280 to 400nm) and then integrating over wavelength to find the actual biologically effective irradiance (in  $\text{W}/\text{m}^2$ ). The effective UV dose (in  $\text{J}/\text{m}^2$ ) for a particular exposure period is found by summing (integrating) the effective irradiance over the exposure period. The most important for common use are the erythema, DNA absorption and non-melanoma skin cancer action spectra.

Human exposure to solar radiation may result in acute and chronic health effects. The main affected are the skin, the eye and the immune system. Acute effects of UV exposure include erythema (sunburn) of the skin and photo keratitis of the eye. Benign abnormalities of melanocytes may occur from overexposure to UV during childhood or adolescence. Chronic skin changes due to UV are skin cancer, and photo aging. Chronic effects on the eye include cataract, pterygium, droplet keratopathies and squamous cell cancer of the conjunctiva.

Major risks and public health concerns related to exposure to UV are skin cancer and cataract. The majority of UV epidemiological studies have addressed skin cancer. Various studies have been carried out on UV related cancers, influences on the immune system and diseases of the eye. A comprehensive summary and review of current knowledge can be found in the WHO/UNEP/ICNIRP Environmental Health Criteria 160 “Ultraviolet Radiation”, published by WHO, Geneva, in 1994 (World Health Organization, 1994).

As sunburn is a frequent detrimental effect on human skin the CIE Erythema action spectrum is recommended for use in assessing the skin-damaging effect of UV radiation.

The “Minimal Erythema Dose” (MED) is used to describe the erythema potential of UV radiation and 1 MED is defined as the effective UV dose that causes a perceptible reddening of previously unexposed human skin. However, because human individuals are not equally sensitive to UV radiation due to different self-protection abilities of their skin (pigmentation), 1 MED varies among the European population within the range of between 200 and 500  $\text{J}/\text{m}^2$  (McKinlay and Repacholi, 2000).

The best known acute effect of excessive UV radiation exposure is erythema, the familiar skin reddening termed sunburn. In addition, most people will tan from the UV radiation stimulation of melanin production, which occurs within a few days of exposure. A further, less obvious adaptive effect is the thickening of the outermost layers of the skin that attenuates UV radiation penetration to the deeper layers of the skin. Both changes are a sign of damage to the skin. Depending on their skin type, individuals vary greatly in their skin’s initial threshold for erythema and their ability to adapt to UV exposure. Prolonged exposure to UV radiation also causes a number of degenerative changes in the cells, fibrous tissue and blood vessels of the skin. These include freckles,

nevi and lentigines, which are pigmented areas on the skin, and diffuse brown pigmentation. UV radiation accelerates skin ageing, and the gradual loss of the skin's elasticity results in wrinkles and dry, coarse skin. Several studies have demonstrated that exposure to environmental levels of UV radiation alters the activity and distribution of some of the cells responsible for triggering immune responses in humans. Therefore, sun exposure may enhance the risk of infection with viral, bacterial, parasitic or fungal infections, which has been demonstrated in a variety of animal models. Furthermore, especially in countries of the developing world, high UV radiation levels may reduce the effectiveness of vaccines. Since many vaccine-preventable diseases are extremely infectious, any factor that results in even a small decrease in vaccine efficacy can have a major impact on public health.

The purpose of this study is to present detailed information on the importance, methods of measurement and application of biologically active ultraviolet radiation from the Sun (UV). This paper illustrates the method of monitoring and the possibilities for forecasting the biologically active ultraviolet radiation of the Sun at the National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography (NIGGG) - Bulgarian Academy of Sciences. The practical application of the UV index is presented in detail on the NIGGG website.

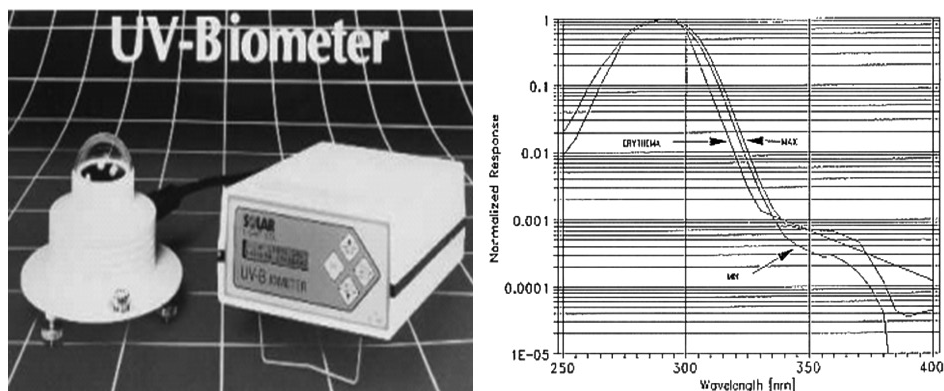
## Monitoring equipment and organization

UV-B measurements are performed with equipment manufactured by Solar Light Company, Philadelphia. Two independent semi-kits are supported, consisting of a sensor located on the roof of the NIGGG building, a device for recording data in digital form (data logger) and a personal computer program developed by the company, performing the setup of the equipment and control over it. The sensor contains a detector, a GaAs semiconductor located in the horizontal plane, an optical system ensuring the transmission of a certain range of wavelengths and a device for maintaining a constant temperature of the detector. The operation of the detector is based on the ability of semiconductors to generate an electrical voltage proportional to the flow of light energy that irradiates it. Recording device transforms the voltage indications in digital form, averaging in the set time interval and recording the values in RAM from which the program transfers them to the disk memory of the working computer.

The basic unit for the UVB level is referred to as the UV index. It is a dimensionless quantity related to the energy flow of solar radiation:

$$I_{UV} = k_{er} \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} S_{er}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

where  $E_{\lambda}$  is the spectral density of solar radiation [ $W/(m^2nm)$ ],  $S_{er}$  is the so-called erythral function, which equalizes the impact on human skin of the components of the solar spectrum and the coefficient  $k_{er}=40 \text{ m}^2/\text{W}$  turns the energy flow into a dimensionless index, which is convenient for information to a wide range of people.



**Fig. 1.** Left panel- sensor and data recording device, right panel - erythral function of the device.

The control program records in text form the average hourly values of the relative radiation dose (dose rate), which represents the ratio of the ultraviolet radiation flux to this value  $0.05833 \text{ W/m}^2$ , which causes sunburn in people with sensitive skin, exposed for 1 hour. From these values the UV index can be determined as:

$$I_{UV} = \text{Dose Rate} \cdot 0.05833 \cdot 40. \quad (2)$$

Assuming an inversely proportional dependence of the time for obtaining sunburn on the flow of ultraviolet radiation, the reciprocal value of the dose gives the allowable stay in hours.

According to the definition of the UV index, the permissible dose for 1 hour corresponds to  $I_{UV}=2.3332$ . Therefore, the time required to obtain a sunburn can be defined as:

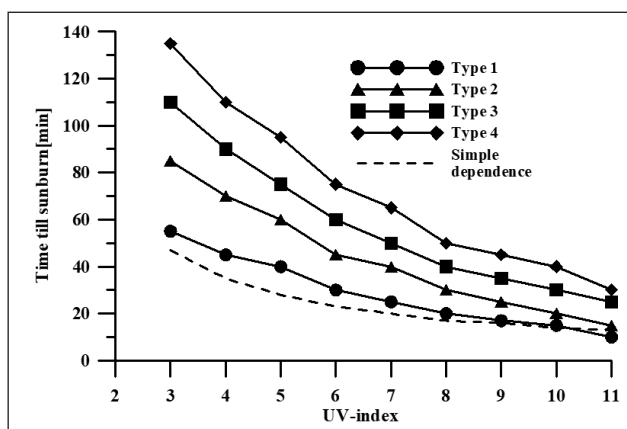
$$\text{Time till sunburn [hours]} = 2.3332/I_{UV}. \quad (3)$$

## Using the UV index to determine the degree of risk of sunburn.

World Health Organization recommends  $I_{UV}$  values up to 2 to completely safe. Values between 3 and 7 as requiring precautions especially for people with sensitive skin. At values above 7, exposure of uncovered skin to sunlight is not recommended. In this way, the publication of real - time UV data available to the user allows everyone to assess the risk of sunburn and take the necessary measures to avoid it (World Health Organization, 2002).

More precise researches about the protecting against the harmful effects of sunburn divides human skin into four main types:

- Type 1* very sensitive, people with very light skin;
- Type 2* sensitive, people with light skin;
- Type 3* normal, people with light brown skin;
- Type 4* weakly sensitive, people with brown skin.



**Fig. 2.** Dependence of the allowable stay under solar radiation of UV- index and type of human skin. A dotted line shows the simplified dependence of formula (3).

Based on these dependencies, the allowable time for staying under the Sun's radiation of people with different sensitivity to sunburn can be determined with sufficient accuracy.

## Main dependences of UV-index on the diurnal time and atmospheric conditions.

The flux of biologically active UV radiation can be considered constant, it is slightly affected by the activity of the Sun. The UV index is defined as the flux of radiation through a horizontal area of a single size ( $m^2$ ), therefore, other things being equal, the value of the index will depend on the zenith angle of the Sun.

Fig. 3 shows a simplified model of the passage of UV radiation through the Earth's atmosphere. Different components of air have the ability to absorb the energy of radiation. In the stratosphere, UVB is absorbed mainly by the ozone layer and water vapor. In the figure the area of absorption of the UVB is simply presented as homogeneous. At the zenith angle of the Sun (denoted by  $\chi$ ) is different by 0, the path of radiation through the absorption layer increases and it decreases in proportion to the cosine of the zenith angle. The impact of the radiation flux on the horizontal Earth's surface also reduces it in proportion to the cosine of the zenith angle. In the absence of additional absorption by the cloud layer in the troposphere, the dependence of the UV index on the zenith angle of the Sun can be assumed with sufficient as:

$$I_{UV} = I_{UV0} \cos^2 \chi \quad (4)$$

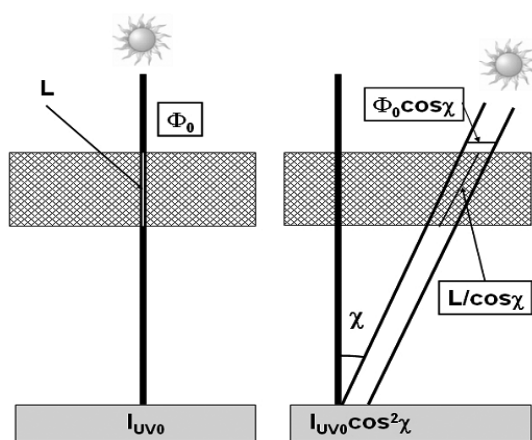
where  $I_{UV0}$  denotes the UV - index that can be measured at the position of the Sun at the zenith. This value is conditional, because at the latitude of Bulgaria the Sun is never at

its zenith. The zenith angle of the Sun depends on the time of day and the day of the year as follows:

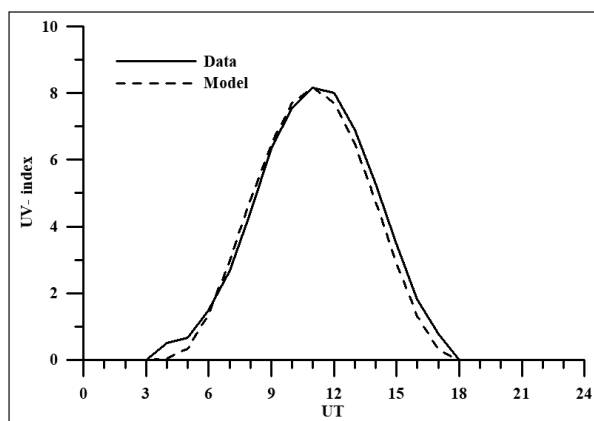
$$\cos \chi = \sin \varphi \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cos \varphi_0 \cos \left( \frac{\pi}{180} (15(UT - 12) - \theta) \right) \quad (5)$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{180} 23.45 \sin \left( \frac{360}{365} (DOY - 21) \right)$$

With  $j$  is marked latitude,  $q$  is longitude,  $UT$ - universal time (along the Greenwich meridian) and  $DOY$  is the day of the year.



**Fig. 3.** Simplified representation of the passage of ultra-violet radiation through the Earth's atmosphere.

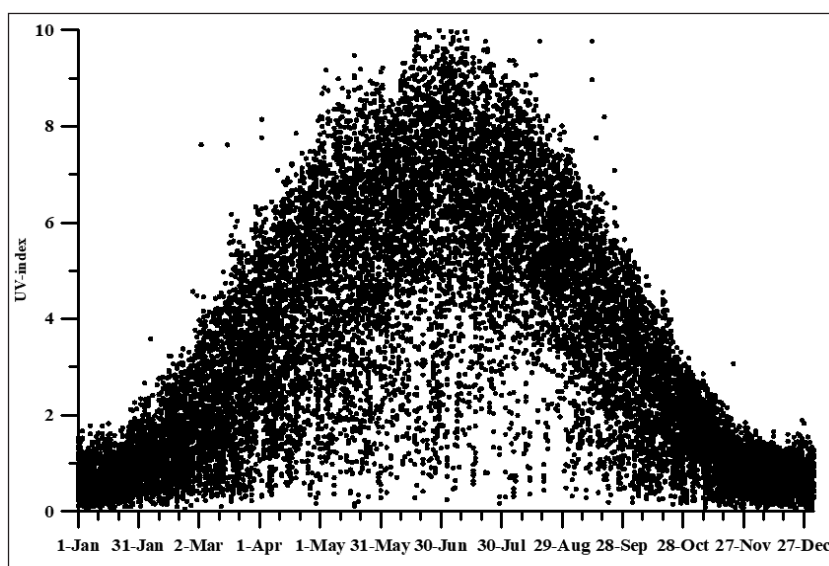


**Fig. 4.** Comparison of average data for August and model according to formula 4 and 5.

Fig. 4 shows a comparison between the average hourly data for August during the period 2011-2019 and the model values calculated by formulas 4 and 5. The dependence of the diurnal time, represented by the square of the cosine of the zenith angle of the Sun, satisfactorily describes the diurnal course of the UV- index. Equations (4) and (5) make it possible to predict the values of the UV- index in clear weather depending on the time of day and the date.

## **Results of the monitoring of the UV-index for the period 2011-2019.**

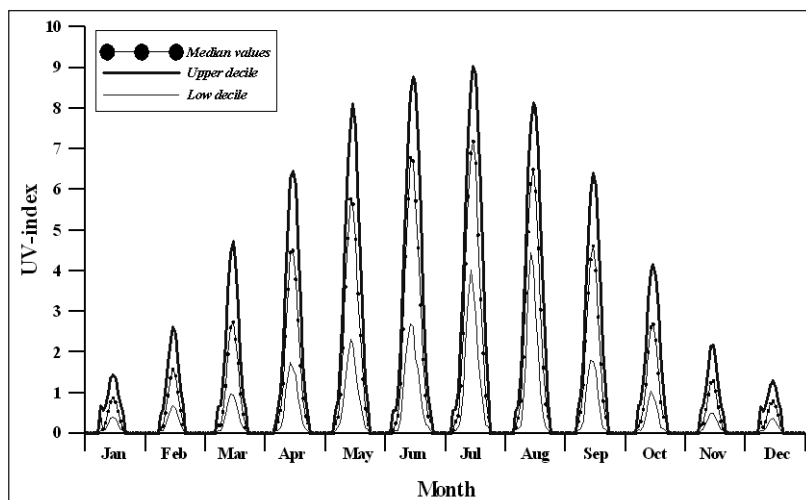
The values of the UV index strongly depend on the cloud cover, that is why the statistical processing of data during the study period is difficult, especially during the winter and equinox months, when days with very clear sky are rare.



**Fig. 5.** Composed year from the measured values for the period 2011-2019 at local time 11, 12 and 23 hour.

As an illustration, Fig. 5 shows the measured values for the entire period 2011-2019 at 11, 12 and 13 hour local time (around noon). There is a significant scattering of data due to the different degree of cloudiness in the respective dates of the years, as well as the presence of obviously invalid values due to equipment errors. In order to obtain a relatively reliable value of the noon UV- index for the date, the respective medians, lower and upper deciles were calculated from the data for each day. The median is a value that halves the values below and above it, the upper decile is a value above which 10% of the data is found. The lower decile is a value below which 10% of the total data remains. The upper decile is a suitable value for estimating the UV- index in clear weather.

Fig. 6 shows the climatology of the UV index for the period 2011–2019. For each calendar month and for every hour are calculated the medians, upper and lower deciles. For each calendar month and for each hour, the medians, upper and lower deciles of the set of measured values are calculated. The diurnal and seasonal course of the UV-index satisfactorily follows the diurnal and seasonal course of the zenith angle of the Sun according to formula 5. The values of the upper deciles can be taken as values in clear weather, the lower deciles as values in significant cloudiness, and the medians as values in average seasonal cloudiness. The maximum value of the UV index for Bulgaria turns out to be 9.



**Fig. 6.** Climatology of the UV-index for the period 2011–2019.

## UV- index forecasting.

The empirical model for forecasting the UV-index developed in NIGGG is based on the measurements conducted for the period 2011–2019 and on the basic regularities of the diurnal and seasonal variability according to Equations 4 and 5 (Bojilova et. al, 2020).

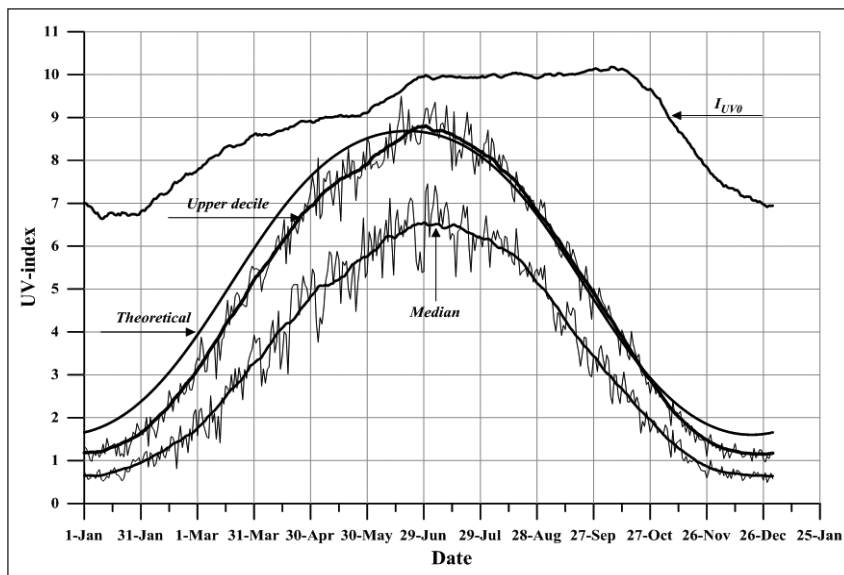
Fig. 7 demonstrates climatological values of the quantity  $I_{UV0}$  obtained for each day of the year from the upper deciles of the measurements in the hours around the local noon according to Equation 4. If the UV-index depended only on the zenith angle of the Sun, this value should not change during the year, but its dependence on the season is observed. Practically constant values are obtained only in the months of July, August and September. During the winter season, the increase of aerosol concentrations in urban conditions is likely to have an impact, which may cause additional absorption of UV radiation even on cloudless days. During the spring months, the spring maximum is also affected by the concentration of stratospheric ozone, which can also cause additional absorption. The obtained empirical daily values of  $I_{UV0}$  allow to predict the value of the UV- index or each hour of the respective date in clear weather according to formulas 4

and 5, taking into account the additional seasonal dependences of the absorption of UV radiation from the atmosphere.

If there is a forecast for cloud cover (in percent) for the respective day, the forecast values can be adjusted using the recommendation of the World Health Organizations, according to the research of which in case of cloudiness 100% UV-index drops to 20% of the value time. Assuming that the decrease of the UV index from the clouds has a linear character, the final formula for predicting the UV-index becomes:

$$I_{UV}(DOY, LT) = (1 - 80R_{cl}) I_{UV0}(DOY) \cos \chi(DOY, UT). \quad (6)$$

$R_{cl}$  is the relative cloudiness in percent, and  $I_{UV0}$  are the values shown in Fig. 7.



**Fig. 7.** Comparison between upper decile of the UV-index, median values of the UV-index, the theoretical values of the UV-index and  $I_{UV0}$ .

The recommendations of the World Health Organization allow an additional opportunity to correct the forecasts of the UV-index, taking into account the influence of altitude and the reflectivity of the environment.

Approximately every hundred meters above sea level UV-index increases by 1%. In the presence of an environment with expressive reflectivity, the time for safe stay is reduced as follows:

- snow cover - 1.9 times;
- sand - 1.15 times;



- sea foam - about 1.25 times;
- water - about 1.1 times.

## **Final remarks.**

This study presents a detailed analysis of the importance of biologically active ultraviolet radiation from the Sun, as well as the monitoring and practical application of the UV index for the territory of Bulgaria. In order to provide information available to anyone interested in the condition of UV radiation at the Bulgarian Academy of Sciences, NIGGG has developed a special website presenting the current condition and relevant forecasts. The Web Page is publicly available: [http://data.niggg.bas.bg/uv\\_index/uv\\_index\\_bg.php](http://data.niggg.bas.bg/uv_index/uv_index_bg.php).

The graph of the UV-index for the current day is presented, which is updated automatically every hour. The values shown on the NIGGG page are colored with the colors recommended by the World Health Organization, indicating the degree of danger of getting sunburn, as well as the allowable time for stay according to equation 3.

A separate graph on the same web page shows the forecast for the next day - values that are obtained in clear weather, medium cloudiness and dense clouds (rain or snow). The values corresponding to the cloud forecast are shown in a separate color.

A separate application ([http://data.niggg.bas.bg/uv\\_index/uvmaps\\_bg.htm](http://data.niggg.bas.bg/uv_index/uvmaps_bg.htm)) shows an animated map of Bulgaria with values of the UV index in clear weather, corrected for altitude.

The information services provided on the NIGGG website also include an interactive calculator ([http://data.niggg.bas.bg/uv\\_index/time\\_sunb.htm](http://data.niggg.bas.bg/uv_index/time_sunb.htm)), through which the user can calculate the time for safe stay on the Sun depending on the date and time, skin type, altitude and reflective properties of the surroundings. It includes also information to the user about the protective cream, which will ensure a safe stay for an unlimited time and a Practical Guide translated into Bulgarian and published by the World Health Organization.

**Acknowledgments.** The present work is supported by the Bulgarian Ministry of Education and Science under the National Research Programme “Young scientists and postdoctoral students” approved by DCM № 577/ 17.08.2018.

The presentation of the results is financed by Contract No D01-282/17.12.2019 - Project “National Geoinformation Center (NGIC)” funded by the National Roadmap for Scientific Infrastructure 2017-2023 of Bulgaria.

This work has been carried out in the framework of the National Science Program “Environmental Protection and Reduction of Risks of Adverse Events and Natural Disasters”, approved by the Resolution of the Council of Ministers № 577/17.08.2018 and supported by the Ministry of Education and Science (MES) of Bulgaria (Agreement № Д01-322/18.12.2019).

## References

- Bojilova, R., Mukhtarov, P. & Miloshev, N. (2020). Climatology of the index of the biologically active ultraviolet radiation for Sofia. An empirical forecast model for predicting the UV-index. *Comptes rendus de l'academie bulgare des sciences*, 73(4), 531-538.
- Kaleyna, P., P. Muhtarov, N. Miloshev (2013a). Condition of the stratospheric and mesospheric ozone layer over Bulgaria for the period 1996-2012, Part 1: Total ozone content, seasonal variations, *Bulgarian Geophysical J.*, 39, 9-16.
- Kaleyna, P., P. Muhtarov, N. Miloshev (2013b). Condition of the stratospheric and mesospheric ozone layer over Bulgaria for the period 1996-2012, Part 2: Total ozone content, short term variations, *Bulgarian Geophysical J.*, 39, 17-25.
- Kaleyna, P., P. Mukhtarov, N. Miloshev (2014). Seasonal variations of the total column ozone over Bulgaria in the period 1996-2012, *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 67(7), 979-986.
- McKinlay, A. F., M. H. Repacholi eds (2000). Ultraviolet Radiation Exposure, Measurement and Protection, Proc. Int. Workshop, NRPB, Chilton, UK, 18-20 October, 1999, *Nuclear Technology Publishing, Radiation Protection Dosimetry*, 91(1-3), ISBN 1870965655.
- World Health Organization, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2002) Global solar UV index: a practical guide (No. WHO/SDE/OEH/02.2).
- World Health Organization (1994) Ultraviolet radiation: an authoritative scientific review of environmental and health effects of UV, with reference to global ozone layer depletion.

## Мониторинг и прогнозиране на биологически активната ултравиолетова радиация на Слънцето

П. Мухтаров, Н. Милошев, Г. Гаджев, Р. Божилова

**Резюме:** В статията е представена информация за значението на биологически активната ултравиолетова радиация на Слънцето (UV-В), която е обект на дългогодишен (2011-2019) мониторинг в Националния институт по Геофизика, Геодезия и География към Българска академия на науките. Представени са сведения за техниката, измерителните единици и обобщените характеристики на денонощния и сезонен ход на UV-В. На базата на опростени физически представи за поглъщането на UV-радиацията в земната атмосфера е предложен емпиричен модел за прогнозиране на нейните стойности в зависимост от датата и сезона. Съгласно препоръките на Световната Здравна Организация е разработен метод за оповестяване в реално време за допустимия престой под слънчевите лъчи. Описани са детайлите на разработените он-лайн приложения, свободно достъпни на интернет страницата на НИГГГ.

## ANNUAL REPORT OF THE OBSERVED GEOMAGNETIC ACTIVITY IN PANAGJURISHTE OBSERVATORY FOR 2014

*M. Metodiev, P. Trifonova*

Dept. of Geophysics, National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography-BAS, Acad.  
G. Bonchev Str., Bl. 3, 1113 Sofia, Bulgaria, m.i.metodiev@gmail.com

DOI: 10.34975/bgj-2020.43.4

**Abstract.** Presently, in the era of Internet communication the preliminary time series (INTERMAGNET's reported data) acquired in geomagnetic observatories are available in near-real time, while the final absolute time series (definitive data) are disseminated with many months delay, being subject to many checks. This paper reports the definitive geomagnetic data obtained in Panagjurishte observatory in 2015, prepared in the form of local geomagnetic indices and absolute time-series of daily mean values plots. Calculated indices show that 2015 has quite disturbed geomagnetic field reaching  $K=8$ . This is reasonable due to the fact that it is in the middle of the 24th So;ar cycle when the Sun is in its most active period. Verification of data quality is performed according to "IAGA guide for magnetic measurements and observatory practice".

**Key words:** PAG observatory, geomagnetic variations, geomagnetic activity, local geomagnetic indices, daily mean values, 2015.

## Introduction

The Geomagnetic observatory in Panagjurishte (PAG) is established in 1937 – first on the Balkan Peninsula and unique in Bulgaria and during more than 80 years performs absolute measurements of the geomagnetic field elements and continuous registration of their variations (Buchvarov, 2006). In 2007 PAG observatory was equipped with digital systems for the recording of geomagnetic field element's variations. Thus, the observatory implemented the technical requirements and was joined to the INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network), which establishes a global network of cooperating digital magnetic observatories, and facilitate data exchanges and

geomagnetic products in close to real time. Preliminary recorded time series and local geomagnetic k-indices are published on the NIGGG web page ([http://data.niggg.bas.bg/magn\\_data1/dailymag\\_bg.php](http://data.niggg.bas.bg/magn_data1/dailymag_bg.php)) and automatically reported to INTERMAGNET. The present paper provides quasi-definitive geomagnetic data which are checked and processed to comply with the IAGA standards for observatory practices.

## Local geomagnetic indices ( $K$ , $A_K$ , $\Sigma K$ ) calculated at PAG observatory.

The K-index is often used as a quantitative measure of local magnetic activity. It is a 3-hour quasi-logarithmic scale developed to measure magnetic activity ranging from 0 to 9, with 0 indicating completely quiet conditions and 9, representing extreme magnetic activity. It is intended to measure geomagnetic disturbances outside the normal diurnal quiet time variations. In order to have a somewhat consistent scale of magnetic activity between observatories at high latitudes, where field variations can be quite large in amplitude, and those at low latitudes, each observatory is assigned its own set of amplitude ranges corresponding to the various K-index levels. Thus, for example, a K-index of 5 at College (TCO) observatory (212.4°E, 64.87°N) corresponds to a lower limit of magnetic activity range of 350 nT over the 3-hour interval, while at San Juan (SJG) observatory (293.85°E, 18.117°N) this same K-index level corresponds to a lower limit of magnetic activity of 40 nT. The idea is to have K-index compensation for the influence of latitude on magnetic activity, so that a K-index of 7 at College and San Juan would represent the same magnetic storm intensity despite the actual differences in the range of magnetic fluctuation amplitudes at the two latitudes.

The ranges of the individual  $K$  numbers in PAG observatory (24.177°EN, 42.515°N) are defined as follows:

Deviation from the normal $S_q$ variation [nT]	<5	5 -10	10 - 20	20 - 40	40 - 70	70 - 120	120 -200	200-330	330-500	> 500
$K$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

The eight three-hourly K numbers (after Bartels) are calculated by a computer code (FMI method, Sucksdorff et al., 1991) from the digital recordings of three component flux-gate variometer FGE.

The local equivalent daily amplitude index  $A_k$  [nT] which is determined by converting K –indices into eight 3-hour equivalent linear amplitudes  $a_k$ , and calculating the mean value. The 3-hour equivalent amplitude  $a_k$  is assigned for each K value using the following table:

$K$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a_{K[nT]}$	0	3	7	15	27	48	80	140	240	400

$\Sigma K$  is the daily sum of the eight  $K$  numbers.

The calculated local geomagnetic indices ( $K$ ,  $A_k$ ,  $\Sigma K$ ) at PAG observatory for 2015 are presented in Table 1.

**Table 1.** Local geomagnetic indices ( $K$ ,  $A_k$ ,  $\Sigma K$ ) calculated at PAG observatory in 2015.

Activity Indices										
Day	$K$								$A_k [nT]$	$\Sigma K$
01-Jan-15	2	1	1	2	1	2	2	3	7	14
02-Jan-15	3	1	2	2	2	3	4	5	16	22
03-Jan-15	5	3	2	3	2	1	1	0	12	17
04-Jan-15	1	1	1	3	3	5	4	5	20	23
05-Jan-15	5	3	2	3	2	2	3	3	16	23
06-Jan-15	2	3	3	4	2	3	4	1	15	22
07-Jan-15	2	3	6	5	3	2	2	4	26	27
08-Jan-15	3	3	3	3	3	3	2	3	14	23
09-Jan-15	2	2	2	3	2	2	2	2	8	17
10-Jan-15	2	3	2	2	2	4	2	1	10	18
11-Jan-15	3	1	3	2	2	2	2	3	10	18
12-Jan-15	1	1	2	2	3	2	3	2	8	16
13-Jan-15	1	2	2	2	2	3	2	2	8	16
14-Jan-15	2	1	2	2	3	2	3	1	8	16
15-Jan-15	0	0	1	2	3	2	0	1	4	9
16-Jan-15	2	2	2	2	2	1	2	1	6	14
17-Jan-15	2	2	1	2	1	0	1	3	6	12
18-Jan-15	1	1	1	1	2	2	2	3	6	13
19-Jan-15	2	1	1	1	0	1	2	3	5	11
20-Jan-15	2	0	1	1	1	0	1	2	3	8
21-Jan-15	2	2	3	2	2	4	4	3	14	22
22-Jan-15	4	2	1	3	3	1	3	2	12	19
23-Jan-15	3	2	2	2	1	2	2	1	7	15
24-Jan-15	1	1	1	1	2	2	3	2	6	13
25-Jan-15	2	2	1	1	1	2	2	3	7	14
26-Jan-15	3	2	3	3	2	3	3	2	12	21
27-Jan-15	3	3	3	2	2	3	2	4	14	22
28-Jan-15	3	2	2	2	1	1	2	2	7	15
29-Jan-15	2	1	1	2	2	3	5	3	13	19

30-Jan-15	3	2	2	2	1	2	4	4	13	20
31-Jan-15	1	2	2	2	2	2	3	4	10	18
01-Feb-15	4	3	3	3	2	3	4	5	21	27
02-Feb-15	4	4	3	3	2	4	4	3	20	27
03-Feb-15	3	3	2	2	3	3	3	3	13	22
04-Feb-15	2	2	1	2	3	3	2	2	9	17
05-Feb-15	1	2	2	2	3	4	3	2	11	19
06-Feb-15	0	1	2	3	1	1	1	1	5	10
07-Feb-15	1	1	2	3	2	3	3	2	9	17
08-Feb-15	2	2	2	2	1	2	3	3	9	17
09-Feb-15	3	2	1	1	2	2	2	3	8	16
10-Feb-15	0	2	1	1	1	1	2	3	5	11
11-Feb-15	1	3	2	2	2	1	0	1	6	12
12-Feb-15	2	2	1	1	2	1	2	2	6	13
13-Feb-15	0	0	1	1	1	1	1	1	2	6
14-Feb-15	0	1	1	1	0	0	0	1	2	4
15-Feb-15	1	2	2	2	3	2	2	2	8	16
16-Feb-15	1	1	1	2	2	2	3	4	9	16
17-Feb-15	3	3	2	3	3	3	5	4	20	26
18-Feb-15	5	3	3	3	2	2	3	3	17	24
19-Feb-15	3	2	2	2	1	2	3	2	9	17
20-Feb-15	1	2	2	2	2	1	1	2	6	13
21-Feb-15	2	1	1	1	1	2	2	3	6	13
22-Feb-15	3	2	1	2	2	1	1	3	8	15
23-Feb-15	3	2	3	3	3	4	4	4	19	26
24-Feb-15	5	4	3	3	2	1	1	3	17	22
25-Feb-15	1	1	3	2	3	3	3	0	9	16
26-Feb-15	2	1	1	2	1	0	1	1	4	9
27-Feb-15	1	1	1	2	1	2	1	2	5	11
28-Feb-15	1	2	2	2	2	3	4	4	13	20
01-Mar-15	5	4	4	3	1	2	3	3	20	25
02-Mar-15	3	3	4	4	3	4	3	3	20	27
03-Mar-15	3	3	2	2	1	2	3	4	12	20
04-Mar-15	2	2	2	4	4	1	2	3	13	20
05-Mar-15	1	1	1	2	2	3	2	2	7	14
06-Mar-15	1	2	3	2	1	2	3	4	11	18
07-Mar-15	3	3	3	3	3	4	4	4	20	27
08-Mar-15	2	2	2	3	3	3	2	1	10	18
09-Mar-15	3	2	1	0	1	1	1	1	5	10
10-Mar-15	1	1	2	1	1	0	1	0	3	7
11-Mar-15	0	3	2	2	2	2	3	1	8	15

12-Mar-15	1	3	2	2	2	2	1	0	6	13
13-Mar-15	1	0	1	3	4	1	1	1	7	12
14-Mar-15	1	2	2	2	2	0	1	3	6	13
15-Mar-15	3	2	2	2	2	2	3	2	9	18
16-Mar-15	2	3	4	3	3	3	2	1	13	21
17-Mar-15	2	5	5	6	7	7	5	7	81	44
18-Mar-15	5	4	3	4	6	5	5	4	40	36
19-Mar-15	4	3	3	4	4	3	3	4	21	28
20-Mar-15	4	3	4	3	3	3	4	5	24	29
21-Mar-15	4	2	2	3	3	2	2	2	12	20
22-Mar-15	2	3	5	5	3	1	2	1	18	22
23-Mar-15	3	3	2	3	5	3	3	4	20	26
24-Mar-15	1	1	1	3	3	4	2	2	10	17
25-Mar-15	2	2	2	4	4	3	4	2	16	23
26-Mar-15	3	2	2	1	2	2	2	4	10	18
27-Mar-15	3	2	2	2	3	2	1	2	9	17
28-Mar-15	1	2	3	2	2	3	2	3	10	18
29-Mar-15	3	3	2	2	2	2	2	2	9	18
30-Mar-15	2	1	1	2	0	1	1	2	4	10
31-Mar-15	1	1	2	3	3	3	3	2	10	18
01-Apr-15	1	1	2	2	1	3	3	3	9	16
02-Apr-15	1	2	2	2	2	2	3	4	10	18
03-Apr-15	3	3	2	3	3	3	2	3	13	22
04-Apr-15	3	2	2	3	3	4	3	2	14	22
05-Apr-15	2	1	1	1	1	2	2	3	6	13
06-Apr-15	2	1	1	1	1	1	1	1	4	9
07-Apr-15	2	2	2	1	1	1	2	1	5	12
08-Apr-15	2	0	1	1	1	1	2	1	4	9
09-Apr-15	2	2	3	3	2	2	3	3	11	20
10-Apr-15	4	4	4	3	4	3	3	2	20	27
11-Apr-15	4	3	2	2	2	4	3	1	14	21
12-Apr-15	0	1	1	1	1	1	2	1	3	8
13-Apr-15	2	2	2	1	1	2	2	1	6	13
14-Apr-15	0	1	2	2	3	4	5	4	17	21
15-Apr-15	2	3	2	4	4	4	5	3	22	27
16-Apr-15	4	3	3	4	3	3	5	5	26	30
17-Apr-15	4	3	3	3	2	3	3	2	15	23
18-Apr-15	2	1	3	3	2	3	4	3	13	21
19-Apr-15	2	1	1	2	1	2	3	3	8	15
20-Apr-15	3	2	2	2	2	2	3	4	12	20
21-Apr-15	3	3	3	4	4	4	3	3	20	27



22-Apr-15	2	2	3	3	2	2	2	3	10	19
23-Apr-15	1	2	1	2	1	1	1	2	5	11
24-Apr-15	1	2	1	2	0	1	1	0	3	8
25-Apr-15	0	0	1	1	0	1	1	1	2	5
26-Apr-15	1	1	1	1	1	1	1	1	3	8
27-Apr-15	0	1	2	2	1	2	2	2	5	12
28-Apr-15	2	1	2	2	2	2	2	1	6	14
29-Apr-15	1	1	1	1	2	2	1	1	4	10
30-Apr-15	3	1	1	1	1	1	2	1	5	11
01-May-15	1	2	1	1	1	2	2	2	5	12
02-May-15	2	2	1	2	2	2	3	3	9	17
03-May-15	3	2	2	2	1	2	2	1	7	15
04-May-15	1	1	2	2	2	2	2	1	6	13
05-May-15	1	1	1	2	2	2	2	2	6	13
06-May-15	3	2	3	4	4	5	5	2	24	28
07-May-15	2	2	2	2	2	3	2	2	8	17
08-May-15	2	2	2	2	1	1	1	1	5	12
09-May-15	1	1	1	3	2	3	3	3	10	17
10-May-15	1	2	2	3	3	1	3	2	9	17
11-May-15	3	3	2	2	3	2	2	4	13	21
12-May-15	2	2	2	3	3	3	3	3	12	21
13-May-15	4	5	5	4	3	4	4	4	31	33
14-May-15	2	2	2	2	2	1	2	2	7	15
15-May-15	1	2	2	2	2	1	2	2	6	14
16-May-15	1	2	1	1	2	1	1	2	5	11
17-May-15	2	2	1	1	2	2	2	1	6	13
18-May-15	2	2	2	3	3	2	3	4	13	21
19-May-15	5	3	2	2	2	2	2	1	13	19
20-May-15	2	3	2	1	2	2	1	0	6	13
21-May-15	1	1	0	1	1	1	1	1	3	7
22-May-15	1	2	0	1	1	0	0	0	2	5
23-May-15	0	1	1	2	1	1	2	1	4	9
24-May-15	2	2	1	1	1	1	1	1	4	10
25-May-15	0	1	1	1	1	0	1	1	2	6
26-May-15	1	2	2	1	2	3	2	1	7	14
27-May-15	1	2	1	1	3	2	1	2	6	13
28-May-15	2	3	1	2	2	2	2	1	7	15
29-May-15	1	3	1	2	2	2	2	2	7	15
30-May-15	1	2	1	1	2	1	1	2	5	11
31-May-15	1	1	1	1	1	2	2	2	5	11
01-Jun-15	3	2	1	2	1	1	2	1	6	13

02-Jun-15	2	2	0	1	1	1	2	1	4	10
03-Jun-15	2	2	1	2	1	1	2	1	5	12
04-Jun-15	1	2	1	1	1	1	1	0	3	8
05-Jun-15	0	1	1	1	1	1	1	1	3	7
06-Jun-15	1	2	1	2	2	1	0	1	4	10
07-Jun-15	1	2	2	2	2	2	3	3	9	17
08-Jun-15	3	5	6	5	3	4	3	4	34	33
09-Jun-15	3	3	3	2	3	3	3	2	13	22
10-Jun-15	3	2	3	3	2	2	2	2	10	19
11-Jun-15	2	2	2	2	2	3	2	1	8	16
12-Jun-15	1	2	1	1	3	2	2	2	7	14
13-Jun-15	3	2	3	3	1	2	2	2	10	18
14-Jun-15	4	2	3	4	3	3	2	3	16	24
15-Jun-15	2	2	2	3	3	3	3	3	12	21
16-Jun-15	3	2	2	1	2	3	3	2	10	18
17-Jun-15	3	3	2	2	3	3	1	1	10	18
18-Jun-15	2	1	1	2	2	3	2	1	7	14
19-Jun-15	2	1	1	1	1	0	1	0	3	7
20-Jun-15	1	1	1	1	0	1	1	1	3	7
21-Jun-15	1	1	1	1	1	4	3	3	9	15
22-Jun-15	1	3	4	3	5	5	8	5	56	34
23-Jun-15	6	5	5	4	4	3	4	4	37	35
24-Jun-15	3	2	3	2	3	3			9	16
25-Jun-15									0	0
26-Jun-15					1	1	1	2	2	5
27-Jun-15	2	3	2	2	2	2	2	2	8	17
28-Jun-15	3	3	3	2	3	2	3	2	12	21
29-Jun-15	2	2	2	2	2	2	1	0	6	13
30-Jun-15	1	2	2	1	1	1	2	3	6	13
01-Jul-15	2	2	1	2	2	2	1	0	5	12
02-Jul-15	1	2	2	1	1	0	0	0	3	7
03-Jul-15	1	1	1	1	0	1	0	0	2	5
04-Jul-15	1	2	2	2	3	3	4	4	14	21
05-Jul-15	4	4	2	3	2	3	3	3	16	24
06-Jul-15	3	3	2	2	1	1	3	2	9	17
07-Jul-15	2	2	1	2	1	1	2	2	6	13
08-Jul-15	0	1	1	2	2	2	2	1	5	11
09-Jul-15	1	2	1	1	1	1	2	1	4	10
10-Jul-15	1	2	1	1	0	2	2	5	10	14
11-Jul-15	4	3	3	3	2	2	3	3	15	23
12-Jul-15	2	3	2	3	2	2	3	3	11	20

13-Jul-15	4	4	4	3	3	3	5	3	24	29
14-Jul-15	3	2	2	2	2	2	3	2	9	18
15-Jul-15	1	2	1	2	3	2	1	2	7	14
16-Jul-15	3	2	2	2	2	2	2	1	8	16
17-Jul-15	1	2	1	2	1	1	0	0	3	8
18-Jul-15	1	1	1	1	1	1	2	1	4	9
19-Jul-15	1	1	2	1	0	1	0	0	2	6
20-Jul-15	0	0	1	1	1	1	1	1	2	6
21-Jul-15	3	3	3	2	2	2	2	2	10	19
22-Jul-15	2	2	1	1	2	3	2	2	7	15
23-Jul-15	3	3	3	3	3	2	3	3	14	23
24-Jul-15	2	2	1	2	2	2	2	3	8	16
25-Jul-15	2	2	3	3	2	1	2	3	10	18
26-Jul-15	3	2	1	2	1	2	2	2	7	15
27-Jul-15	2	2	2	3	2	2	2	2	8	17
28-Jul-15	2	2	2	3	2	1	2	1	7	15
29-Jul-15	1	1	2	2	2	2	2	1	6	13
30-Jul-15	2	2	1	2	2	3	4	5	15	21
31-Jul-15	3	2	2	2	3	4	3	3	14	22
01-Aug-15	3	2	1	2	2	3	3	2	10	18
02-Aug-15	3	2	2	1	3	2	2	2	9	17
03-Aug-15	2	3	2	1	2	2	1	2	7	15
04-Aug-15	1	2	2	1	2	1	2	4	8	15
05-Aug-15	2	2	1	2	2	2	1	2	6	14
06-Aug-15	2	2	2	3	3	2	2	2	9	18
07-Aug-15	2	3	4	3	4	4	3	2	18	25
08-Aug-15	2	2	2	3	3	1	3	3	11	19
09-Aug-15	2	2	2	3	2	3	2	3	10	19
10-Aug-15	3	2	3	2	2	2	3	2	10	19
11-Aug-15	3	3	2	2	1	1	2	2	8	16
12-Aug-15	2	2	2	1	2	3	3	3	10	18
13-Aug-15	3	4	2	2	2	1	1	1	9	16
14-Aug-15	1	1	1	2	1	1	1	2	4	10
15-Aug-15	3	2	4	5	5	4	3	3	25	29
16-Aug-15	4	3	5	4	3	4	3	4	25	30
17-Aug-15	3	3	3	3	4	4	4	2	19	26
18-Aug-15	3	3	3	1	1	2	1	2	9	16
19-Aug-15	4	3	3	2	3	3	3	3	16	24
20-Aug-15	2	3	2	3	4	3	2	3	14	22
21-Aug-15	1	2	2	1	2	1	1	1	5	11
22-Aug-15	2	1	2	3	3	2	3	2	10	18

23-Aug-15	3	3	4	3	4	3	4	2	19	26
24-Aug-15	2	2	2	3	2	1	2	1	7	15
25-Aug-15	2	2	1	2	1	2	3	2	7	15
26-Aug-15	3	3	2	4	3	5	5	5	28	30
27-Aug-15	4	5	4	4	3	4	4	6	35	34
28-Aug-15	5	3	2	2	4	5	5	4	28	30
29-Aug-15	3	2	2	3	2	3	3	2	11	20
30-Aug-15	1	2	1	1	1	2	2	2	5	12
31-Aug-15	2	1	2	2	2	2	2	2	7	15
01-Sep-15	2	1	1	1	1	1	1	3	5	11
02-Sep-15	2	2	2	1	2	3	3	3	10	18
03-Sep-15	2	2	2	2	1	2	2	3	8	16
04-Sep-15	3	4	4	3	3	2	3	3	17	25
05-Sep-15	2	2	3	2	3	5	4	2	17	23
06-Sep-15	2	2	2	2	4	2	5	3	16	22
07-Sep-15	2	2	2	2	4	5	5	5	25	27
08-Sep-15	6	4	3	2	3	2	2	4	23	26
09-Sep-15	4	5	4	4	4	4	5	5	35	35
10-Sep-15	3	1	2	1	2	4	5	4	17	22
11-Sep-15	3	3	6	6	5	6	3	3	44	35
12-Sep-15	4	2	4	3					10	13
13-Sep-15									0	0
14-Sep-15					1	5	5	3	14	14
15-Sep-15	4	3							5	7
16-Sep-15									0	0
17-Sep-15									0	0
18-Sep-15			4	2	2	2	3	3	10	16
19-Sep-15	3	4	4	3	2	0	2	3	14	21
20-Sep-15	3	4	6	5	4	5	3	3	34	33
21-Sep-15	2	2	1	3	2	2	1	2	7	15
22-Sep-15	3	2	3	2	3	2	2	2	10	19
23-Sep-15	1	2	3	3	3	4	4	2	15	22
24-Sep-15	2	2	2	1	1	2	3	3	8	16
25-Sep-15	1	2	2	2	3	2	1	2	7	15
26-Sep-15	1	1	1	1	1	2	2	2	5	11
27-Sep-15	1	1	2	1	1	1	1	2	4	10
28-Sep-15	1	1	2	1	1	1	2	2	5	11
29-Sep-15	2	2	2	1	1	1	1	1	5	11
30-Sep-15	1	0	1	1	2	1	1	1	3	8
01-Oct-15	1	1	1	2	3	4	4	5	17	21
02-Oct-15	2	2	3	2	2	2	3	2	9	18

03-Oct-15	2	2	2	1	2	3	2	3	9	17
04-Oct-15	3	3	3	2	3	2	3	5	17	24
05-Oct-15	4	3	3	4	4	2	3	3	19	26
06-Oct-15	3	3	3	1	3	4	5	5	23	27
07-Oct-15	4	4	4	5	4	6	6	5	46	38
08-Oct-15	3	5	5	4	4	5	5	4	36	35
09-Oct-15	3	2	2	3	4	4	5	4	22	27
10-Oct-15	2	2	3	1	2	4	2	2	10	18
11-Oct-15	3	2	1	2	2	3	4	4	14	21
12-Oct-15	1	2	2	3	2	5	5	4	20	24
13-Oct-15	2	3	3	4	2	4	4	5	22	27
14-Oct-15	3	4	3	3	3	3	4	2	17	25
15-Oct-15	2	2	1	2	2	2	3	3	9	17
16-Oct-15	2	2	1	1	2	1	1	1	5	11
17-Oct-15	2	3	2	2	3	2	4	2	12	20
18-Oct-15	3	2	3	4	3	3	3	3	16	24
19-Oct-15	0	1	1	2	1	1	1	2	4	9
20-Oct-15	1	1	2	2	2	3	4	3	11	18
21-Oct-15	1	2	2	4	4	2	2	2	12	19
22-Oct-15	1	1	2	2	1	2	3	2	7	14
23-Oct-15	2	1	1	2	2	2	2	3	7	15
24-Oct-15	2	2	2	1	1	1	4	3	9	16
25-Oct-15	2	1	2	2	3	2	1	1	7	14
26-Oct-15	1	0	1	2	1	0	0	0	2	5
27-Oct-15	0	0	1	1	1	0	1	3	3	7
28-Oct-15	0	1	1	2	0	1	1	0	2	6
29-Oct-15	1	0	1	2	1	0	1	3	4	9
30-Oct-15	2	1	1	2	2	3	2	3	8	16
31-Oct-15	0	0	1	2	2	2	2	3	6	12
01-Nov-15	1	2	2	1	2	2	3	2	7	15
02-Nov-15	1	0	1	1	3	3	1	2	6	12
03-Nov-15	3	3	5	4	4	4	5	4	29	32
04-Nov-15	4	5	4	3	5	3	3	3	26	30
05-Nov-15	3	1	3	3	3	4	3	4	17	24
06-Nov-15	4	2	2	2	2	2	5	4	17	23
07-Nov-15	4	5	5	4	3	3	4	2	27	30
08-Nov-15	2	1	1	2	4	4	5	5	21	24
09-Nov-15	4	2	3	3	3	4	5	5	25	29
10-Nov-15	4	3	3	5	5	4	4	4	29	32
11-Nov-15	4	2	3	2	4	5	4	2	21	26

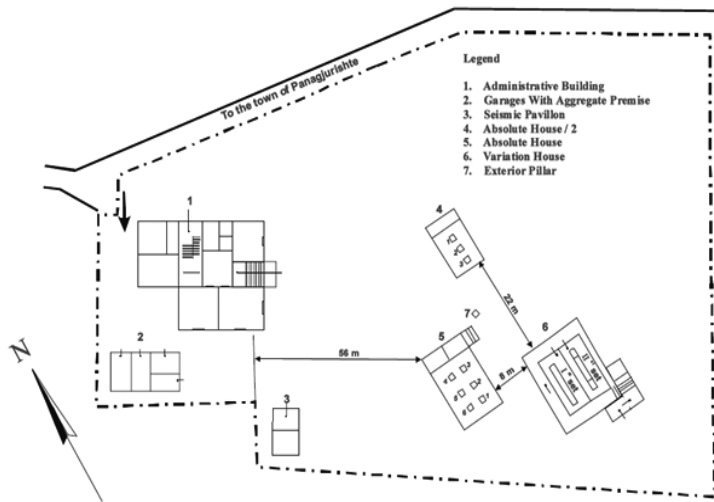
12-Nov-15	1	1	1	1	1	2	1	1	4	9
13-Nov-15	1	1	1	2	4	4	4	4	16	21
14-Nov-15	3	1	2	2	3	1	2	2	8	16
15-Nov-15	2	2	1	2	1	2	3	3	8	16
16-Nov-15	3	2	2	3	3	2	3	3	12	21
17-Nov-15	1	2	1	2	1	3	3	2	8	15
18-Nov-15	1	3	2	2	2	3	5	4	16	22
19-Nov-15	3	2	1	3	1	1	1	1	7	13
20-Nov-15	1	1	3	2	0	1	0	1	4	9
21-Nov-15	2	1	0	1	0	0	1	1	2	6
22-Nov-15	1	1	1	1	1	1	1	1	3	8
23-Nov-15	1	1	1	1	1	0	0	0	2	5
24-Nov-15	1	0	1	1	0	0	0	0	1	3
25-Nov-15	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
26-Nov-15	0	0	1	1	0	0	2	2	3	6
27-Nov-15	3	3	2	2	2	2	2	2	9	18
28-Nov-15	2	1	1	2	2	2	3	3	8	16
29-Nov-15	1	1	2	2	3	2	3	4	11	18
30-Nov-15	3	2	4	3	2	1	3	3	13	21
01-Dec-15	2	2	1	2	4	4	3	4	15	22
02-Dec-15	2	2	2	1	3	2	2	2	8	16
03-Dec-15	1	1	1	1	1	1	1	2	4	9
04-Dec-15	1	1	1	1	1	1	1	2	4	9
05-Dec-15	2	1	3	3	3	5	4	3	18	24
06-Dec-15	2	3	2	4	4	4	4	4	21	27
07-Dec-15	3	3	2	3	4	4	4	2	18	25
08-Dec-15	3	2	2	3	3	1	2	3	11	19
09-Dec-15	2	1	0	1	2	3	4	2	9	15
10-Dec-15	3	4	3	3	3	4	4	4	21	28
11-Dec-15	4	3	2	3	3	5	4	4	23	28
12-Dec-15	2	2	2	2	2	3	3	2	9	18
13-Dec-15	2	2	2	2	2	1	1	1	6	13
14-Dec-15	2	2	1	1	4	5	5	5	24	25
15-Dec-15	4	3	2	2	3	4	3	3	16	24
16-Dec-15	3	2	1	1	0	0	1	1	4	9
17-Dec-15	1	1	1	1	2	2	4	2	8	14
18-Dec-15	2	1	1	1	1	0	1	3	5	10
19-Dec-15	1	1	1	1	1	4	5	5	17	19
20-Dec-15	4	5	5	3	5	6	6	6	53	40
21-Dec-15	6	4	4	3	2	2	2	3	23	26

22-Dec-15	3	2	3	4	3	1	3	2	13	21
23-Dec-15	2	2	1	2	3	2	3	4	11	19
24-Dec-15	2	2	3	2	2	2	3	2	9	18
25-Dec-15	3	2	2	2	2	2	2	2	8	17
26-Dec-15	2	2	2	2	4	4	3	5	18	24
27-Dec-15	3	2	2	2	3	3	3	2	11	20
28-Dec-15	1	1	2	2	2	1	0	2	5	11
29-Dec-15	2	0	2	1	2	2	3	3	8	15
30-Dec-15	0	0	1	1	1	1	1	2	3	7
31-Dec-15	4	3	3	5	5	6	5	4	39	35

**Definitive daily mean values of the Declination (D), Inclination (I), Horizontal (X and Y), and Vertical (Z) field components.**

Presently, daily mean values are obtained from the hourly means (HMs) which in turn comes from the minute mean values (MMVs), based on the digital recordings of the three-component fluxgate magnetometer FGE. The baseline of this magnetometer is determined from absolute measurements with a DI-flux theodolite and an Overhauser proton magnetometer.

Positions of the Variation house where the three-component fluxgate magnetometer FGE is installed and the Absolute house where absolute geomagnetic measurements are performed are given in the Fig. 1.

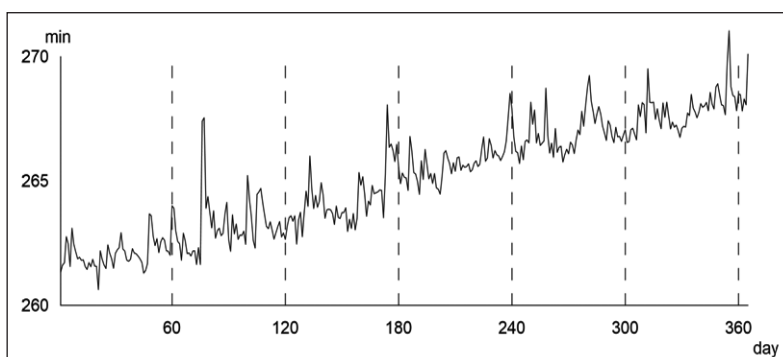


**Fig. 1.** Ground plan of the Panagjurishte observatory (after Kostov and Nozharov, 1987)

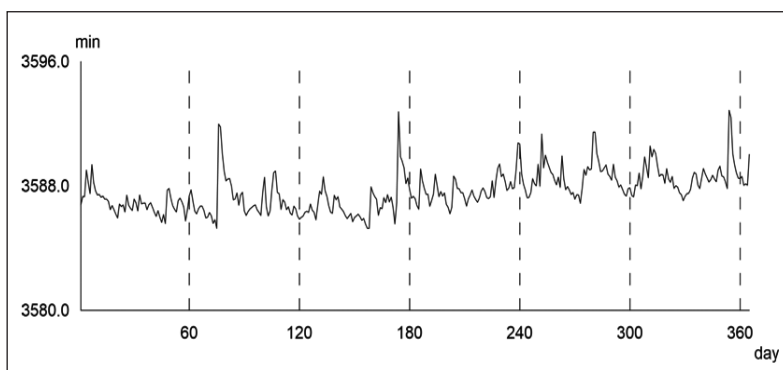


Before calculating of MMVs, inspection and verification of the reported data is performed. The reported data (available in near real time) are usually used in applications where the reliable representation of higher-frequency magnetic field variations is more important rather than absolute levels or secular variation. This concerns, e.g. the forecast of magnetic activity, radio-wave propagation, or space weather. In the case of reported data it is not possible to verify them prior to dissemination. Careful monitoring of the automatically transmitted data and the present-day computer technologies enable us to improve the quality of data and reduce the number of gaps in the records. After the quality control procedures have been applied to the 2015 reported data, we obtained the definitive minute mean values and calculated the HMVs and DMVs. Due to technical problems there are gaps in the data records in February and March.

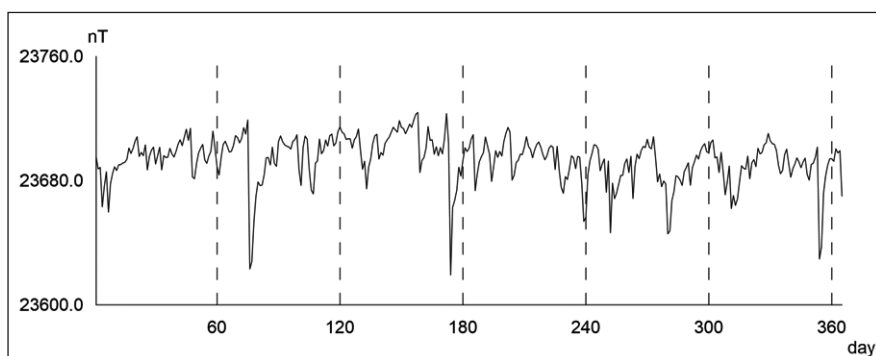
Daily mean values of the Declination (D), Inclination (I), Horizontal (X and Y), and Vertical (Z) field components for 2014 are plotted in the next figures:



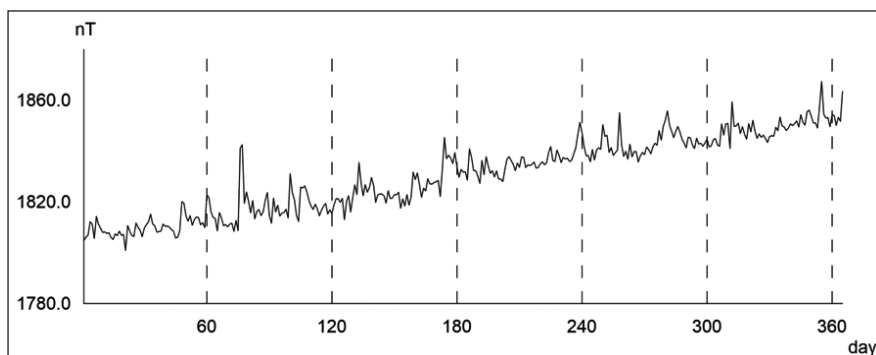
**Fig. 2.** Plot of the daily mean values of the **Declination (D)** registered in PAG observatory in 2015.



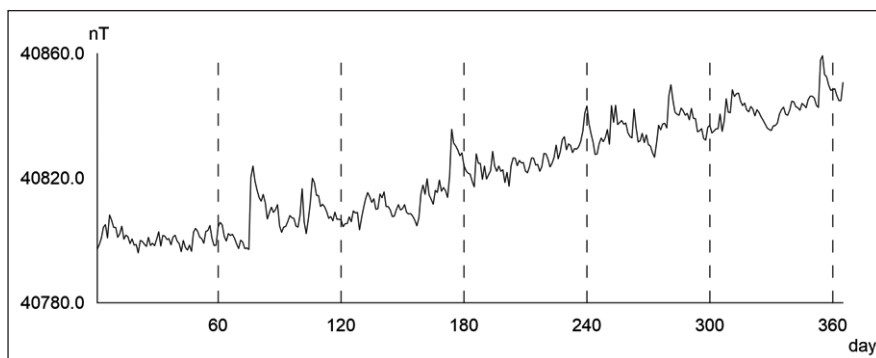
**Fig. 3.** Plot of the daily mean values of the **Inclination (I)** registered in PAG observatory in 2015.



**Fig. 4.** Plot of the daily mean values of the **North geomagnetic field component (X)** registered in PAG observatory in 2015.



**Fig. 5.** Plot of the daily mean values of the **East geomagnetic field component (Y)** registered in PAG observatory in 2015.



**Fig. 6.** Plot of the daily mean values of the **Vertical geomagnetic field component (Z)** registered in PAG observatory in 2015

## Conclusions

Continuous registration of the geomagnetic field components gives the sum of all field contributions from the internal and external to the Earth sources. A straightforward separation of the individual contributions is impossible and many scientific studies deal with different aspects of this problem (Mandea nad Korte, 2010). Approximate description of the strength of different external variations however, are provided by geomagnetic indices. A quantitative measure of 2015 local geomagnetic activity in the form of 3 hour *K*-index is published here, based upon the range of fluctuations in the PAG observatory records. Table 1 shows that 2015 has disturbed geomagnetic field with 67 disturbed days. The most active period are recorded in September, October, November and December each of them having at least 7 days with recorded geomagnetic storm. The most strong events during 2015 are two – between 17-23 March with largest  $K=7$  and 22-23 June when  $K=8$  was reached. The observed activity is quite reasonable because 2015 is in the middle of the 24<sup>th</sup> Solar cycle. with 6 days having  $K\text{-index} \geq 5$  and 1 with  $K=6$ . Annual variations of the geomagnetic field components are plotted in form of daily mean values. Data are checked and verified according to IAGA requirements (Jankowski and Sucksdorff, 1996).

## References

- Buchvarov, I., 2006. Field and observatory geomagnetic measurements in Bulgaria. in Rasson and Delipetrov (eds.) *Geomagnetics for Aeronautical Safety*, Springer, p. 61-62.
- Jankowski, J., Sucksdorff, C., 1996. *Guide for magnetic measurements and observatory practice.*, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Warsaw, Poland.
- Kostov, K. and P. Nozharov. Absolute magnetic measurements in Bulgaria 1787-1997, Sofia, 1987, pp. 72.
- Mandea, M., Korte, M. (eds), 2010. *Geomagnetic observation and models*, IAGA Special Sopron Book Series 5, Springer.
- Sucksdorff, C., Pirjola, R. and Häkkinen, L., 1991. Computer production of *K*-values based on linear elimination, *Geophysical Transactions*, 36, 333-345.

## Годишен доклад за наблюдаваната геомагнитна активност в Обсерватория Панагюрище през 2015

М. Методиев, П. Трифонова

**Резюме:** Понастоящем, в ерата на интернет комуникациите, записите от геомагнитните обсерватории се предоставят на заинтересованите потребители почти в реално време, докато обработените времеви серии (окончателни данни) са обект на много проверки и се разпространяват с месеци закъснение. Статията представя дефини-

тивните геомагнитни данни, получени в Обсерватория Панагюрище през 2015 г., дадени под формата на локални геомагнитни индекси и графики на среднодневните стойности на компонентите на магнитното поле. Изчислените индекси показват, че 2015 г. има доста смутено геомагнитно поле, достигащо  $K = 8$ . Това е очаквано и разбираемо поради факта, че годината се намира в средата на 24-ия Слънчев цикъл, когато Слънцето е в най-активния си период.

## SEISMICITY ON THE TERRITORY OF BULGARIA AND THE ADJACENT LANDS RECORDED BY NOTSSI IN 2019

*D. Dragomirov, E. Oynakov, V. Buchakchiev, Y. Milkov*

National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, BAS, Akad G.Bonchev street, bl. 3, Sofia, Bulgaria, e-mail: drago.n.dragomirov@gmail.com, emil.ilievmg@gmail.com, valioka12@gmail.com, jori@abv.bg

DOI: 10.34975/bgj-2020.43.5

**Abstract.** A map of epicenters of 129 earthquakes with magnitude  $M \geq 2.5$  that occurred during 2019 in Bulgaria and surroundings (sector outlined by latitude =  $41^\circ$ -  $44.5^\circ$  N and longitude =  $22^\circ$ -  $29^\circ$  E) registered by NOTSSI is presented. Expert generalized analysis is proposed. Catalog of earthquakes is applied.

**Key words:** Bulgaria, seismicity

The Balkan peninsula is one of the active regions in the Alpine-Himalayan seismic belt. High activity is observed in Western Turkey, Greece, Vranča region – Romania, Bulgaria, Northern Macedonia, Albania, Serbia. The depth distribution is very characteristic. There are two highly active levels in the range of 20-40 km and 90-110 km and a less active one in 50-70 km.

Bulgaria is an earthquake prone country. Over the past centuries, Bulgaria has experienced strong earthquakes. Some of the European strongest earthquakes during the 20th century have been occurred in Bulgaria. At the beginning of the 20th century, from 1901 to 1928, five strong earthquakes with magnitude larger than or equal to 7.0 occurred on the territory of Bulgaria – 30.03.1901  $M_s = 7.2$  Shabla earthquake; 04.04.1904 Kresna earthquakes with  $M_s$  magnitudes 7.1 and 7.8; 14.6.1913  $M_s = 7.0$  G.Oryahovitsa earthquake and two earthquakes near the city of Plovdiv in 1928 - 14.04 with magnitude  $M_s = 6.8$  and 18.04 with magnitude  $M_s = 7.0$ .

Strong seismic impact on the territory of Northern Bulgaria have the intermediate earthquakes in Vranča – Romania region. The strongest being the one in 1944 with magnitude of 7.7 and some may remember the one in 1977 with magnitude of 7.4 caused a lot of deaths and destructions.

The present study contains generalized information and analysis of the data about the seismic events recorded by the National Operative Telemetric System for Seismological Information (NOTSSI) during 2018. Seismic data is gathered in real time by 26 Bulgarian stations and a number of stations from neighbouring countries which increases the accuracy of hypocentral locations. Between 2005 and 2010 almost all stations are modernized and equipped with broadband seismometers. A number of stations also are equipped with accelerometers of type RefTek 131A-02/3 of the company “Refraction Technology”. The data from the digitizers DAS 130-01 are collected through the RTPD (Real time protocol demon) module and the data from foreign stations and from Quanterra digital systems are collected with the sl2rptd module.

Data are transferred to the National seismological center in the Geophysical Institute, BAS in real time. Then they are archived in PASSCAL format and additionally in the widely used miniSEED format. The data are processed automatically (relevant signals are recognized and the main parameters of the earthquake are evaluated) by the program Seismic Network Data Processor (SNDP) (Christoskov et al., 2012). The data are later processed manually by an on-duty seismologist and corrections are made if required. At present the body P-wave magnitude  $M_p$  is evaluated by:

$$M_p = \log \left( \frac{A}{T} \right)_{\max} + \sigma_{BB}(\Delta) + s_j \quad (1)$$

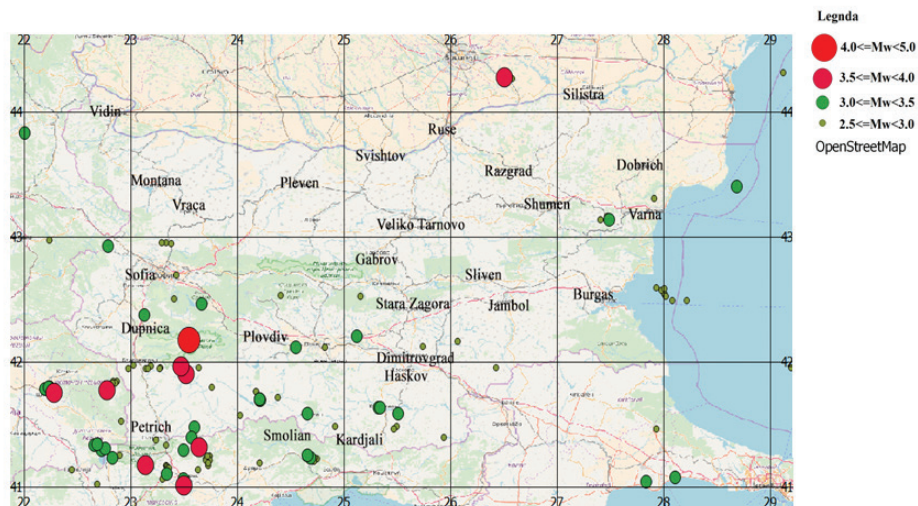
where  $\left( \frac{A}{T} \right)_{\max} = \frac{V_{\max}}{2\pi}$ ,  $A$  is the amplitude in  $\mu\text{m}$ ,  $T$  is a period in s, and  $V_{\max}$  is the peak ground velocity in  $\mu\text{m/s}$  of P-phase recorded on the broadband seismograph vertical-component at epicentral distances less than  $10^\circ$ ;  $\sigma_{BB}(\Delta)$  is the calibration function; and  $s_j$  is the  $j$  station magnitude correction.

In the present study  $M_p$  is transformed into the more reliable and more widely used  $M_w$  magnitude, which would allow the creation of a uniform catalogue for earthquakes, needed for reliable evaluation of the seismic hazard on the territory of the country and surroundings.  $M_p$  is transformed into  $M_w$  through the formula (D. Solakov et al., 2018):

$$M_w = 0.93 * M_p + 0.31 \quad (2)$$

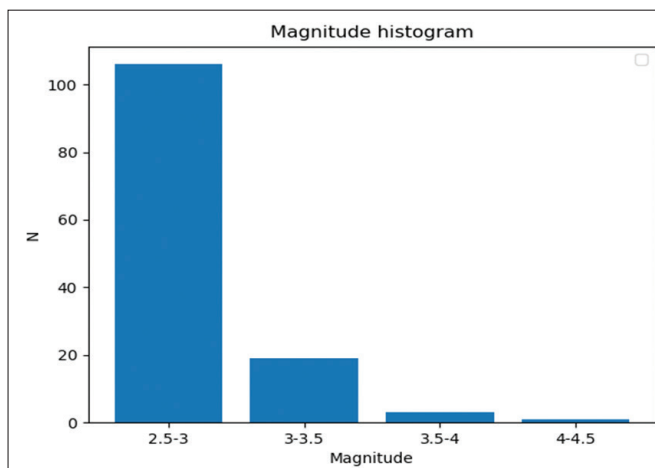
The high sensitivity of the seismographs allows recording and processing of a great number of local and regional earthquakes. Different magnitude's lower thresholds for reliable determination of local and regional earthquakes are established:  $M_w = 2.5$  for the territory of Bulgaria,  $M_w = 3.0$  for the central part of the Balkans,  $M_w = 5.0$  for regional events. The accuracy of the epicenter location is different; except on the distance it depends also on the epicenter position with respect to the recording network. The parameters of seismic events occurring at a distance more than 100-150 km outside the territory of Bulgaria should be accepted only informatively and cannot be used for reliable seismotectonic investigation.

After comprehensive analysis of the digital records and application of the above mentioned calculation procedures it is established that 129 of all registered earthquakes are on the territory of Bulgaria and surroundings outlined by space window  $41^{\circ} - 44.5^{\circ}$  N and  $22^{\circ} - 29^{\circ}$  E. In the Fig. 1 are plotted the earthquake epicenters using different magnitude levels.



**Fig. 1.** The number of the events in the magnitude.

The number of the events in the magnitude interval  $M_w = 2.5-3$  is 106, in  $M_w = 3.1-3.5$  - 19, in  $M_w = 3.6-4$  - 3, in  $M_w = 4.1-4.5$  - 1 earthquakes (as shown in Fig. 2). Fig. 3 shows that the data fit well with theoretical expectations, meaning that all incoming earthquakes have been detected by the network.



**Fig. 2.** The number of the events in the magnitude.



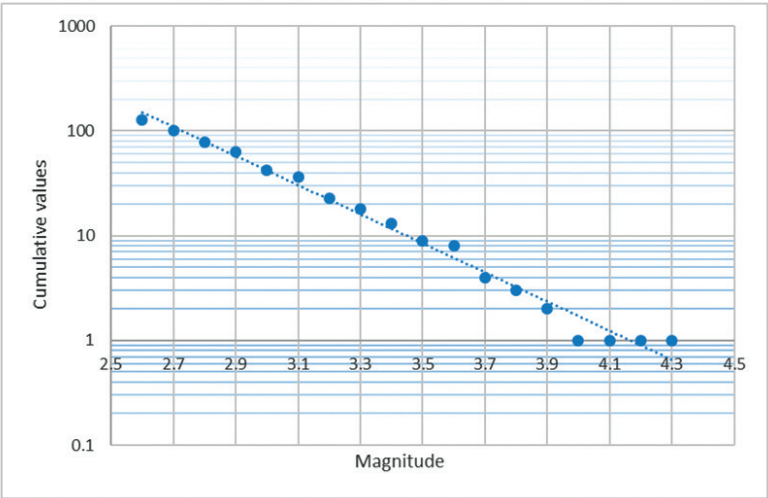


Fig. 3. The data fit well with theoretical expectations

Throughout the year 18 earthquakes in total were felt on the territory of Bulgaria from local and regional sources. The strongest event outside Bulgaria during the studied period occurred in the region of Tirana (Albania) with magnitude  $M_w = 6.4$ . Maximum intensity on the territory of Bulgaria is  $I_{\max} = 3.5$ . As a whole, events with  $M_w < 3.0$  which occur outside Bulgaria are difficult to be localized by the national seismological system.

Table 1. List of earthquakes with  $M \geq 2.5$  in Bulgaria and adjacent lands during 2019

Date	Time	Latitude [N°]	Longitude [E°]	Depth [km]	Magnitude [Mw]
7.1.2019	03:23:21	42.97	22.24	2	3.0
25.1.2019	18:02:27	41.94	23.14	20	2.8
6.2.2019	03:42:30	42.49	28.08	20	2.6
6.2.2019	03:45:21	42.49	28.22	20	2.7
6.2.2019	03:51:01	42.54	28.01	10	2.9
6.2.2019	03:57:24	42.59	27.93	16	2.9
6.2.2019	04:41:42	42.54	28.01	18	2.7
6.2.2019	05:15:27	41.52	22.91	13	3.4
6.2.2019	05:46:00	42.57	27.98	19	2.6
6.2.2019	07:59:44	42.52	28.02	12	2.9
6.2.2019	08:29:10	42.58	28.01	16	2.6
6.2.2019	09:47:20	41.22	24.75	11	2.7
9.2.2019	20:59:18	41.23	24.73	9	3.4
9.2.2019	22:05:28	41.23	24.70	9	3.1

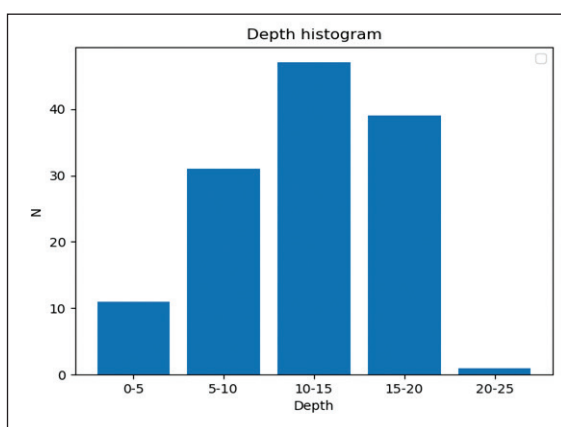
10.2.2019	14:20:44	41.21	23.14	13	2.7
10.2.2019	14:22:04	41.21	23.14	15	2.9
11.2.2019	01:46:11	41.20	24.72	15	3.1
18.2.2019	07:05:07	41.24	23.74	11	2.9
18.2.2019	07:13:41	41.24	23.74	11	2.6
22.2.2019	17:45:27	41.93	23.53	12	2.9
27.2.2019	09:13:35	41.22	23.73	15	3.3
27.2.2019	14:44:49	41.17	23.73	6	3.0
27.2.2019	15:53:49	41.22	23.71	11	3.1
27.2.2019	16:41:19	41.21	23.74	13	3.9
28.2.2019	00:05:15	41.21	23.71	17	2.7
28.2.2019	20:35:18	41.19	23.73	10	2.8
1.3.2019	20:35:19	41.24	23.72	15	2.8
6.3.2019	06:56:53	42.76	29.22	15	3.5
9.3.2019	23:32:59	42.52	25.16	14	2.7
13.3.2019	18:56:43	41.11	23.35	11	2.9
15.3.2019	03:26:55	41.71	24.38	13	2.9
15.3.2019	10:45:14	41.48	24.92	10	2.6
15.3.2019	16:46:34	43.3	27.91	17	3.1
19.3.2019	03:30:33	41.13	23.34	11	3.6
20.3.2019	10:39:39	44.31	29.12	10	2.8
25.3.2019	00:27:53	41.95	23.28	20	3.2
26.3.2019	00:27:54	41.94	23.27	17	2.9
26.3.2019	22:25:20	41.94	22.98	18	2.7
27.3.2019	11:53:55	41.17	23.33	7	2.6
28.3.2019	13:01:37	41.16	23.34	10	2.9
28.3.2019	20:28:03	41.16	23.34	11	2.6
1.4.2019	04:45:56	41.15	23.35	10	2.9
2.4.2019	20:04:13	41.57	24.03	20	2.8
3.4.2019	01:04:52	44.26	26.58	4	3.0
3.4.2019	14:48:38	42.95	23.33	16	2.9
11.4.2019	19:22:47	41.06	23.30	4	2.8
13.4.2019	11:05:24	41.96	23.19	11	2.8
14.4.2019	08:36:00	43.16	27.48	3	2.7
18.4.2019	10:50:57	41.13	23.63	7	2.7
18.4.2019	11:02:56	41.13	22.45	10	2.6
25.4.2019	01:11:53	41.02	22.69	16	3.2
30.4.2019	18:22:35	43.16	27.47	5	3.6
2.5.2019	13:08:36	42.50	23.41	18	2.7
4.5.2019	12:36:06	42.48	23.66	19	2.6
15.5.2019	06:15:12	41.95	23.64	18	2.9

18.5.2019	03:32:59	41.76	24.18	20	2.6
19.5.2019	03:32:59	41.76	24.18	18	2.6
21.5.2019	06:53:35	41.97	23.03	9	2.6
24.5.2019	08:48:13	42.12	25.74	17	3.3
24.5.2019	17:29:44	41.81	22.81	11	3.3
27.5.2019	01:51:40	41.84	22.87	12	2.9
28.5.2019	14:57:52	41.33	23.33	15	3.1
28.5.2019	15:39:44	41.37	23.24	11	3.1
2.6.2019	13:09:09	41.95	29.20	7	3.7
6.6.2019	03:45:50	41.46	27.93	17	3.1
9.6.2019	02:26:50	41.79	23.76	10	3.3
25.6.2019	13:23:59	41.15	23.36	6	2.9
10.7.2019	09:48:05	42.16	26.07	2	2.6
12.7.2019	07:06:52	41.84	22.84	13	2.8
12.7.2019	19:01:31	41.48	25.50	2	2.6
15.7.2019	13:50:19	41.83	22.86	8	3.2
16.7.2019	19:17:30	41.36	22.71	8	3.4
20.7.2019	21:04:30	41.94	23.16	16	2.6
21.7.2019	04:30:14	41.29	22.74	15	2.7
23.7.2019	17:09:13	42.95	23.29	17	2.8
24.7.2019	14:29:32	41.19	24.21	20	2.8
26.7.2019	20:58:21	41.46	25.47	15	2.6
4.8.2019	14:11:45	42.69	23.43	20	2.6
6.8.2019	17:56:56	42.53	24.41	20	3.2
8.8.2019	08:49:51	42.11	24.82	7	2.6
9.8.2019	11:44:01	41.39	25.94	8	2.9
10.8.2019	06:39:40	41.95	26.43	20	3.6
14.8.2019	09:25:02	41.23	24.64	20	2.6
15.8.2019	06:35:59	43.13	27.41	2	3.0
16.8.2019	12:04:45	41.83	22.83	20	2.6
22.8.2019	08:44:44	41.25	22.90	11	2.8
2.9.2019	15:27:56	42.94	23.38	14	2.8
7.9.2019	19:02:09	41.23	22.83	20	2.7
7.9.2019	19:38:15	43.13	27.49	2	2.6
16.9.2019	00:05:48	41.58	24.66	12	2.9
19.9.2019	22:33:36	42.20	25.12	12	3.0
22.9.2019	10:14:19	41.63	25.33	12	2.7
22.9.2019	12:13:22	41.63	25.34	13	3.6
24.9.2019	10:39:55	41.29	22.73	16	2.9

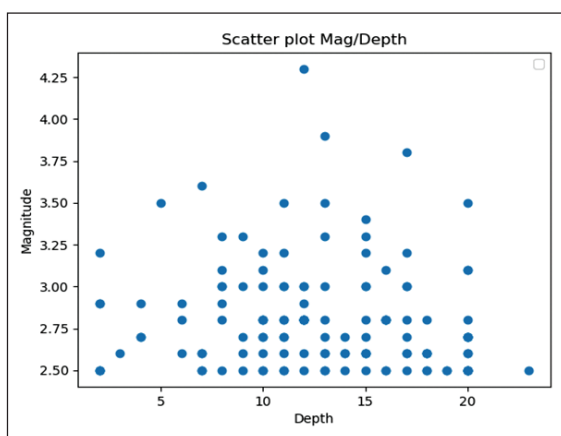
26.9.2019	22:02:20	41.07	28.11	12	3.1
26.9.2019	23:48:10	41.04	27.84	13	2.6
2.10.2019	02:18:06	41.29	23.50	13	3.1
2.10.2019	03:33:32	41.30	22.76	12	2.9
3.10.2019	21:42:46	42.11	24.55	18	2.6
9.10.2019	21:29:51	42.92	22.79	4	2.8
13.10.2019	23:27:28	42.46	23.67	9	2.8
14.10.2019	07:48:26	41.33	22.66	2	3.3
14.10.2019	19:40:01	41.34	22.69	8	3.1
21.10.2019	12:21:39	41.70	24.21	13	2.7
22.10.2019	13:36:00	41.78	22.20	20	2.8
23.10.2019	21:16:43	41.23	24.69	12	3.1
28.10.2019	10:20:29	41.69	24.21	16	2.9
28.10.2019	10:30:28	41.69	24.22	17	2.7
28.10.2019	11:53:48	41.70	24.21	10	2.7
28.10.2019	22:46:50	41.79	22.24	8	3.0
30.10.2019	15:50:43	41.79	22.23	10	3.2
31.10.2019	11:04:31	41.10	23.34	7	2.7
16.11.2019	11:51:27	41.47	23.60	12	2.6
18.11.2019	04:49:38	42.37	23.13	14	2.7
21.11.2019	07:00:46	43.83	22.01	6	2.7
25.11.2019	21:09:00	41.25	24.66	10	3.1
28.11.2019	03:20:49	41.58	25.51	14	2.6
28.11.2019	11:37:50	43.40	28.69	15	3.4
30.11.2019	14:36:14	41.06	23.50	20	2.9
5.12.2019	22:08:33	41.39	23.57	13	2.6
8.12.2019	19:45:50	41.17	23.14	9	2.7
8.12.2019	22:26:30	41.90	23.52	15	2.7
11.12.2019	20:25:52	41.31	23.64	17	2.6
12.12.2019	00:35:19	44.27	26.51	23	2.6
12.12.2019	04:46:15	41.01	23.50	8	2.6
21.12.2019	04:43:32	41.77	22.78	8	3.1
28.12.2019	12:05:41	41.75	22.28	15	2.7
29.12.2019	17:36:52	41.96	23.47	17	3.8
30.12.2019	18:01:40	42.17	23.55	12	4.3

As usual, the largest concentration of the epicenters in the other regions of Bulgarian territory during 2019 is marked in the southwestern part of the investigated region (presented in Fig. 1 and Table 1). In 2019 only 1 event of  $M_w \geq 4.0$  occurred in this region. Two are the felt earthquakes, which occurred in seismogenic zones on the territory of the country, with maximum intensity  $I_{max} = 4.5$  (MSK-64). These events were on the 30.04.2019 –  $M_w = 3.6$  and on the 30.12.2019 –  $M_w = 4.3$ .

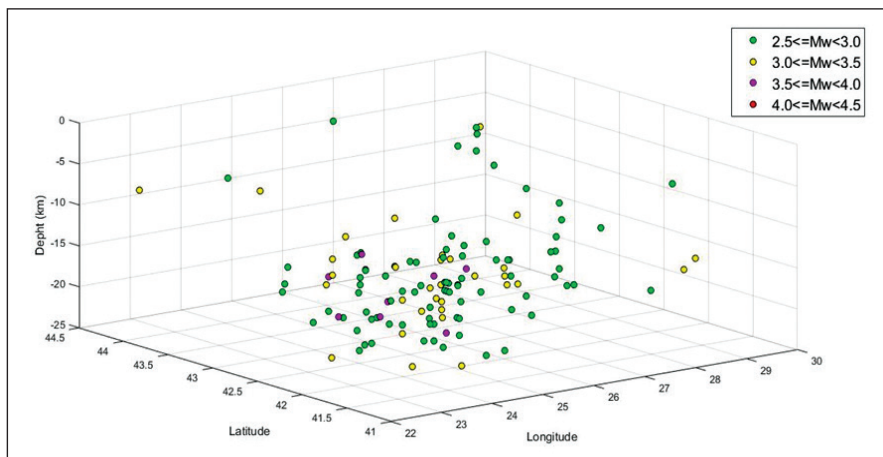
A detailed analysis of seismicity in the individual seismic zones is hard to be fulfilled because of the insufficient quantity of events and the narrow magnitude range of the earthquakes. The joint statistics of all the events in Fig.1 characterize predominantly the seismicity parameters of the southwestern part of the territory under investigation.



**Fig. 4.** The distribution of the number of events according to depth

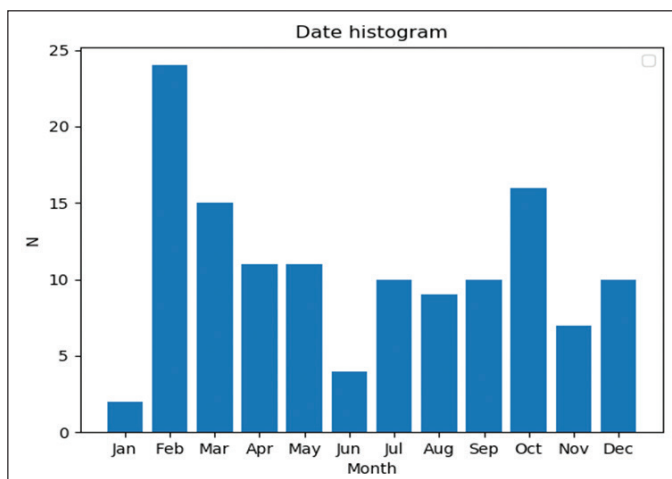


**Fig. 5.** The distribution of the number of events according to magnitude

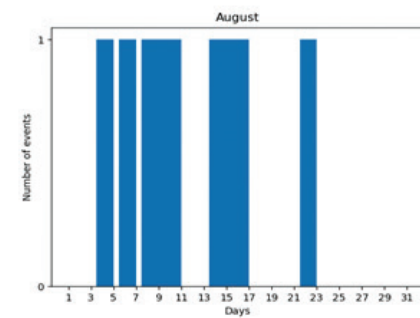
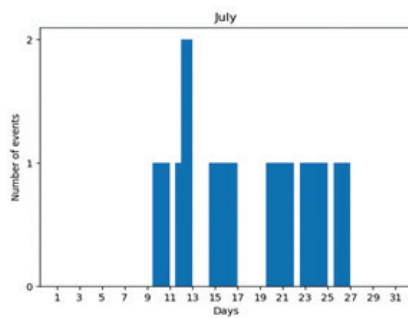
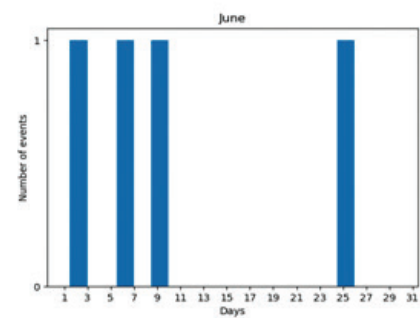
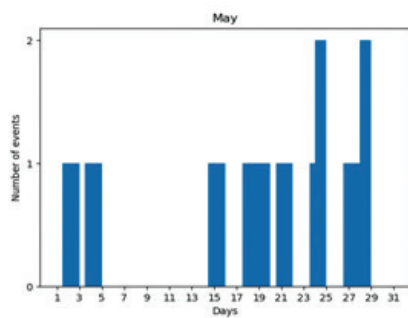
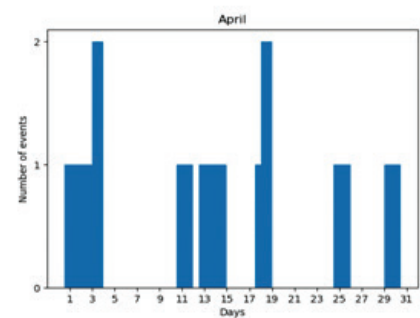
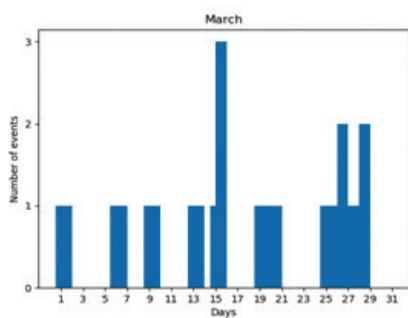
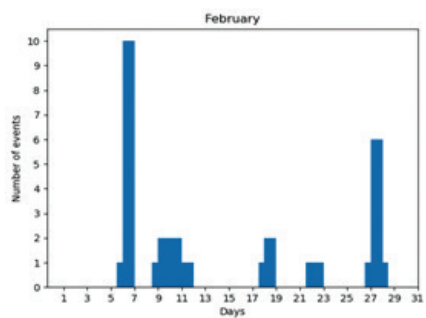
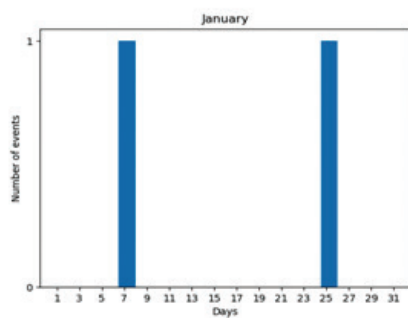


**Fig. 6.** The distribution of depth according to location

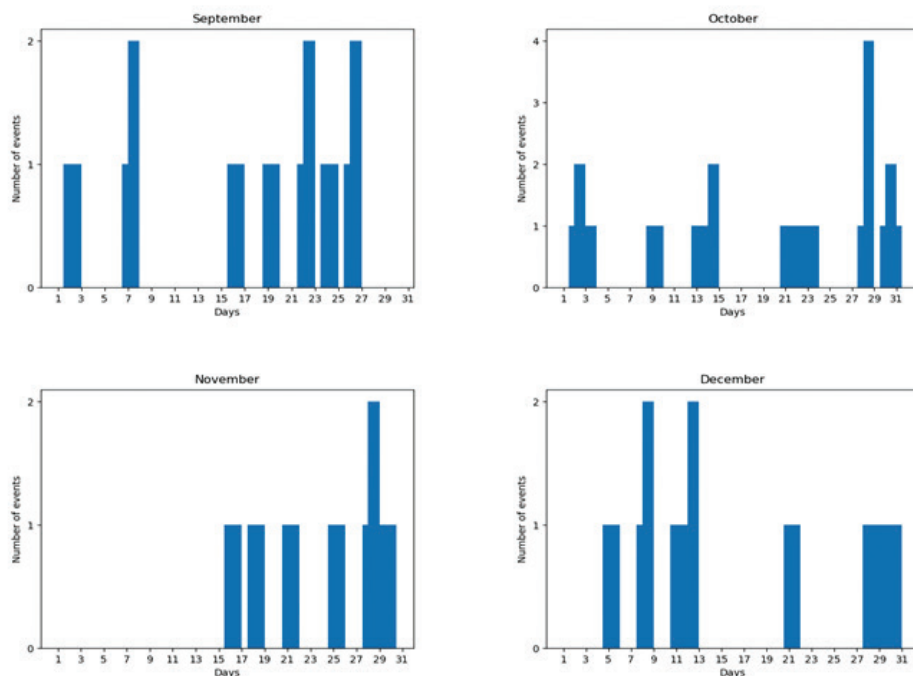
The graph of the depth distribution in Fig. 4, Fig. 5 Fig. 6 shows that the majority of events occur in range 5-20 km depth. Fig.6 does not show correlation between magnitude and depth, as the majority of the events occurred in the 5-20 km depth range. The number of events does not decrease smoothly with increase of the depth. In the same time the number of events in the interval 10-15 km is the largest. The magnitude distribution of the events in depth (Fig. 6) permits to note some differentiation of depth „floors“ with the increase of magnitude - the maximums can be traced out for the depth interval from 5 to 20 km. The stronger events with magnitude  $M_w \geq 3.5$  have depth in the range 10-20 km.



**Fig. 7.** The distribution of the number of events per month







**Fig. 8.** The distribution of seismicity in time according to the number of events per month

Fig. 7, 8 illustrates the distribution of seismicity in time according to the number of events per months. The highest amount of earthquakes is displayed in February, when 24 earthquakes occurred, and it is associated with seismic activity in South-Western Bulgaria – Bulgaria-Greece border and Western Black Sea. The lowest earthquake quantity is in January, when only 2 events with magnitude larger than 2.5 occurred. Fig. 7 shows that there is no definite distribution of the earthquakes throughout the months.

The figures below show the daily distribution of the number of earthquakes/day for each month. We can see that the distribution is not spread out equally and while in some days 10 earthquakes may occur, like the first week of February, there are periods, like in January, May, June, July, November, where for periods of 10-15 days no events occur on the territory of Bulgaria.

**Acknowledgements:** The authors express their gratitude towards the seismologists who have worked in NOTSSI for the period 01.01.2019 - 31.12.2019.

## References

- Christoskov, L., L. Dimitrova, D. Solakov, 2011b. Digital broadband seismometers of NOTSSI for practical magnitude determinations of P waves. BGS. v.XXXVIII, N1-4/2011, ISSN 1311-753X, 62-72.
- Solakov, D., S. Simeonova, P. Raykova, I. Aleksandrova. Empirical relations converting Md and Mp magnitudes applied in Bulgarian seismological routine practice to moment and magnitude. *Comptes rendus de l'Acad'emie bulgare des Sciences*, 71, 8, 2018, DOI:DOI:10.7546/CRABS.2018.08.09, 1076-1085. SJR:0.21, ISI IF:0.27

## Сеизмичност на територията на България и прилежащите земи по данни от НОТССИ през 2019 г.

Д. Драгомиров, Е. Ойнаков, В. Бучакчиев, Й. Милков

**Резюме:** Представена е карта с епицентрите на 129 земетресения, с магнитуд  $M \geq 2.5$  случили се през 2019 г. в България и околностите (сектор ограничен от географска ширина  $\phi = 41^\circ - 44.5^\circ N$  и географска дължина  $\lambda = 22^\circ - 29^\circ E$ ) регистрирани от Националната Оперативна Телеметрична Система за Сеизмологична Информация (НОТССИ). Експертен, обобщен анализ е представен. Приложен е каталог със земетресения.

**Ключови думи:** България, сеизмичност

**Благодарности:** Авторите изразяват своите благодарности към сеизмолозите, които са работили в НОТССИ за периода 01.01.2019 – 31.12.2019.

## ESTIMATION OF EARTHQUAKE SOURCE PARAMETERS USING P AND S-WAVES SPECTRA – CASE STUDY THE 2012 SEISMIC CLUSTER IN SOFIA SEISMOGENIC ZONE

*P. Raykova*

National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia  
1113, Bulgaria, e-mail: plamena.raikova@gmail.com

DOI: 10.34975/bgj-2020.43.6

**Abstract:** Spectral analysis of seismic waves is one of the most important origin of information for the earthquake sources. In this study are presented P- and S-waves spectra of the  $M_w 5.6$  Sofia 2012 earthquake seismic sequence. Earthquake source parameters (seismic moment, source radius, stress drop) are estimated applying Brune model. The model has been used extensively and it has been shown that it is in a good agreement with observations from many different tectonic regions and for a large range of magnitudes. The database is compiled using digital data from the Bulgarian Seismological Network - NOTSSI (National Operative Telemetric System for Seismological Information). Displacement spectra are generated for P- and S- waves to estimate some source parameters, such as seismic moment, stress drop, source radius and moment magnitude. The source parameters are estimated for 6 earthquakes: for the main event with moment magnitude  $M_w 5.6$  and for five aftershocks with magnitude  $M_w$  in interval  $3.4 \div 4.5$ . The stress drop values estimated for P - waves are within the expected range for moderate earthquakes while for the S - waves the stress drop values are several times higher than the expected ones. The strongest aftershocks are characterized with lower than the main event stress drop values.

**Key words:** spectra, stress drop, source radius, seismic moment, Sofia seismogenic zone

### 1. Introduction

Seismology is the science that studies the seismic waves and what they tell us about the structure of the Earth and the physics of the earthquakes. It is the primary means by which scientists learn about Earth's deep interior, where direct observations

are impossible, and has provided many of the most important discoveries regarding the nature of our planet. It is also directly concerned with understanding the physical processes that cause earthquakes and seeking ways to reduce their destructive impacts on humanity.

The effects of earthquakes are function of a number of random factors ranging within broad limits, which should be adequately modelled on the basis of physical considerations, and the available seismic data. Modelling of space-time and energy distribution of earthquakes is a major aspect of modern seismological research. Examination of the space - time distribution of earthquakes is of fundamental importance for understanding the physics of the earthquake generation process. Another important aspect related to seismicity is spectral analysis of seismic waves. This analysis provides information of fundamental importance for parameters characterizing the earthquake source process. Earthquake parameters (seismic moment, source radius, stress drop) are estimated applying Brune model. The model has been used extensively and it has been shown that it gives a good agreement with observations from many different tectonic regions and for a large range of magnitudes.

In the present study are presented the spectra of P- and S-waves for earthquakes from the 2012 seismic cluster (main earthquake - aftershock).

A formal definition of seismic clusters is still lacking despite of the conception that the earthquake clustering is an essential aspect of seismicity that provides key information on earthquake dynamics (Zaliapin and Ben-Zion, 2013).

Aftershocks are defined as seismicity above the background activity following a main shock (Liu and Stein, 2011). Aftershocks occur after the main event and their frequency decays over time, typically following a pattern known as the Omori's law, which later is modified by Utsu (1961) and is known as modified Omori's law. The power-law decay represented by the modified Omori relation is an example of temporal self-similarity of the earthquake source process. The duration of aftershock sequences may last months, a few years, or even longer for earthquakes within stable continental interiors (Stein and Liu, 2009). Some authors recognize that the main causes of aftershocks include main shock-induced changes of frictional properties of the fault zone and stress perturbations (e.g. Liu and Stein, 2011).

In our study the source parameters of aftershock sequences of the May 22, 2012 earthquake with moment magnitude  $M_w 5.6$  ( $T_0=00:00:32$ ,  $\varphi=42.58$ ,  $\lambda=23.02$  and  $h=14$  km) are examined. The 2012  $M_w 5.6$  earthquake occurred in Sofia seismogenic zone after a long quiescence (of about 95 years) for moderate events. Moreover, a reduced number of small earthquakes have also been registered in the recent past. The 2012 earthquake is located in the vicinity of the city of Pernik at about 25 km south west of the city of Sofia. The quake was followed by intensive aftershock activity. A detailed analysis of the space - time distribution of aftershocks is presented in Solakov et. al. 2016. The 2012  $M_w 5.6$  earthquake was largely felt on the territory of Bulgaria and neighboring countries: northern Greece, northern Macedonia, eastern Serbia and southern Romania. No casualties and severe injuries have been reported. Predominantly moderate damages were observed in the epicentral area (in the cities of Pernik, Radomir and Sofia).

## 2. Method and Data

### 2.1 Method

Spectral analysis of seismic waves is one of the most important origin of information for the earthquake sources. The earthquake source parameters are computed following Brune's theory by using the corner frequency and the low frequency asymptote. The Brune model predicts the source displacement spectrum  $S(f)$ , which depends on  $M_0$  - the seismic moment,  $\rho$  - density,  $v$  - velocity at the source (P or S-velocity depending on spectrum), and  $f_0$  - corner frequency.

**The seismic moment  $M_0$**  (in N\*m) is a direct measure of the tectonic size. The scalar seismic moment  $M_0$  is defined by the equation:

$$M_0 = \mu SD, \quad (1)$$

where  $\mu$  is the shear modulus of the rocks involved in the earthquake (in pascals (Pa), i.e. newton per square meter),  $S$  - is the area of the rupture along the geologic fault where the earthquake occurred (in square meters), and  $D$  is the average slip (displacement offset between the two sides of the fault). The seismic moment can be determined by moment tensor inversion or spectral analysis. It is the most objective static measure of earthquake size and is used to determine moment magnitude.

**Stress drop  $\sigma$**  is the average difference between initial and final stress along a fault after an earthquake. For large, shallow earthquakes,  $\Delta\sigma$  vary from about 1 to 10 MPa or from 10 to 100 bars with  $M_0$  variations from  $10^{18}$  to  $10^{23}$  Nm (Kanamori and Anderson, 1975; Kanamori and Brodsky, 2004). It has been observed that earthquakes near plate boundaries (interplate events) generally have been observed to have somewhat lower stress drops than those that occur in the interior of plates (intraplate events) (e.g., Kanamori and Anderson, 1975; Kanamori and Allen, 1986). In average  $\Delta\sigma$  for interplate quakes is about 3 MPa (30 bars) while for intraplate events it is about 6 MPa (60 bars) (Allmann and Shearer, 2007).

For a circular fault in a whole space, Eshelby (1957) obtained:

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{r^3}, \quad (2)$$

where  $r$  is the fault radius (in m or km) and  $M_0$  is seismic moment.

The first quantitative model for estimating stress drop was derived by Brune (1970), who assumed a simple kinematic model for a circular fault with effectively infinite rupture velocity and showed that the expected high-frequency spectral falloff rate is  $\omega^{-2}$  and that the corner frequency is inversely proportional to the source radius. This result, together with several other proposed rupture models, predicts that the fault radius varies as:

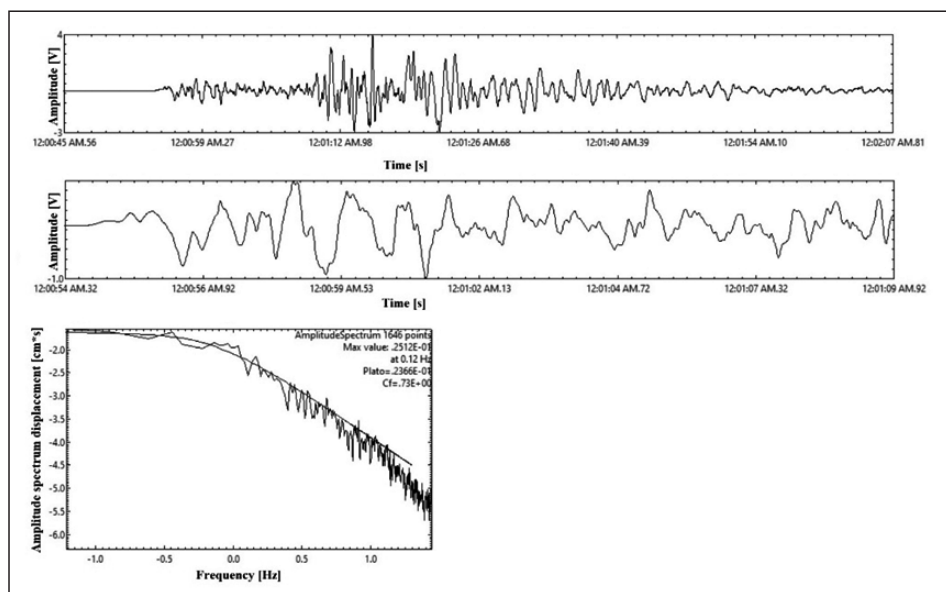
$$r = \frac{k\beta}{f_c}, \quad (3)$$

where  $r$  is the fault radius (in m or km),  $f_c$  is the observed corner frequency (in Hz) and  $k$  is a constant that depends upon the specific theoretical model.

To estimate the spectral parameters of the earthquake, it is necessary to transform the signal. The next figure presents an example of transformation of amplitude-time signal into amplitude-frequency and generated displacement spectra using Fast Fourier Transformation (FFT). In the figure 1 is presented: a) a time window of the P-wave signal from seismic station VTS; b) a time window of several seconds of the signal that are used for spectra generation; c) displacement spectra of P-wave.

The amplitude of seismic pulses in a perfectly elastic environment is controlled by the reflection and transmission of energy at the different boundaries. Seismic waves attenuate with time, the amplitudes of the waves are changed as they pass through different layers of the earth.

We study the distance effect on the low frequency spectral amplitude of the P and S waves using quality factor  $Q$  and near surface attenuation  $\kappa$ . In the study, we fixed  $Q = 400$  (Malagnini et al., 2000) and  $\kappa = 0.035$  (Margaris and Boore, 1998).



**Fig. 1.** Example of P-wave displacement spectra.

In the study the parameters: seismic moment  $M_0$ ; stress drop  $\Delta\sigma$ ; and source radius  $r$  are calculated using the following relationships.

The seismic moment for P-wave ( $M_{0p}$ ) is calculated as:

$$M_{0p} = \frac{\rho \cdot 4\pi \cdot \Omega_p \cdot R \cdot v_p^2}{R_{\theta\phi}(P)}, \quad (4)$$

where  $\rho$  – density in  $\text{g/cm}^3$ ,  $\Omega_p$  – spectral level in  $\text{nm*s}$ ,  $v_p$  – velocity of P-wave in  $\text{km/s}$ ,  $R$  – distance in  $\text{km}$ ,  $R_{\theta\phi}(P)$  – radiation pattern.

The average correction for radiation pattern varies between 0.55 and 0.85 as presented in the literature. According to Aki and Richards, the average is 0.52 and 0.63 for P and S-waves, respectively. (Aki and Richards, 2002).

The seismic moment for S-wave ( $M_{0s}$ ) is calculated as:

$$M_{0s} = \frac{\rho \cdot 4\pi \cdot \Omega_s \cdot R \cdot v_s^2}{R_{\theta\phi}(S)}, \quad (5)$$

where  $\rho$  – density in  $\text{g/cm}^3$ ,  $\Omega_s$  – spectral level in  $\text{nm}^*\text{s}$ , which is determined by the spectra of wave, and its value is determined by Z, N, E – components  $\left(\Omega_s = \sqrt{\Omega_Z^2 + \Omega_N^2 + \Omega_E^2}\right)$ ,  $R_{\theta\phi}(S)$  – radiation pattern, which for seismic moment for S-wave is 0.63, and  $v_s$  is velocity of S-wave in  $\text{km/s}$ .

The following formulas are used to determine the source radius and stress drop:

$$r_p = \frac{v_p \cdot 3.36}{2\pi f_0}, \quad (6)$$

where  $v_p$  is P-wave velocity, and  $f_0$  is corner frequency in Hz.

For S-wave, the source radius is determined in an identical approach:

$$r_s = \frac{v_s \cdot 2.34}{2\pi f_0}, \quad (7)$$

where  $v_s$  is S-wave velocity, and  $f_0$  is corner frequency in Hz.

The stress drops for P- and S-waves are calculated using the following relationships (Eshelby, 1957):

$$\Delta\sigma_p = \frac{7}{16} \frac{M_{0p}}{r_p^3}, \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_s = \frac{7}{16} \frac{M_{0s}}{r_s^3}, \quad (9)$$

where  $r_p$  and  $r_s$  are the radius for P- and S-waves.

## 2.2 Input data

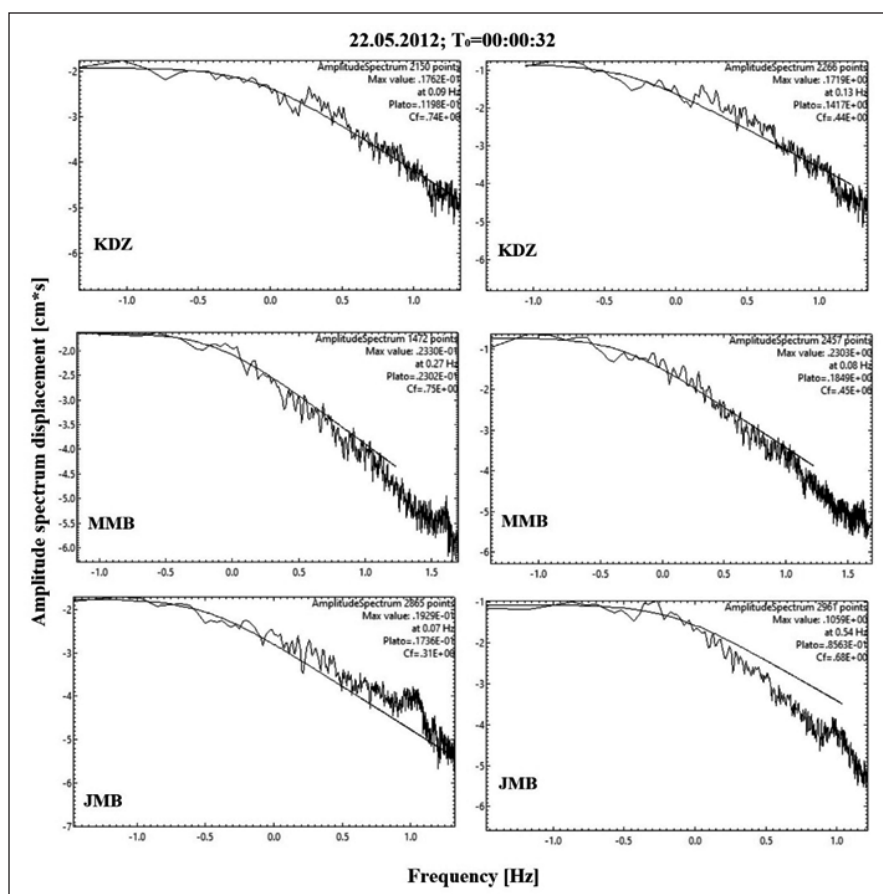
In the present study 218 digital records from 6 earthquakes (recorded at the stations of Bulgarian Seismological Network - NOTSSI) in the magnitude range  $M_w=3.4 - 5.6$  are analyzed. Spectra are generated on the base of records at the stations at a distance less than 200 km.

### 3. Results

The results of the present study are presented in Fig. 2 - 3 and Tab. 1. Results of spectral analysis for the main event is presented in Fig. 2 and spectra of five of the strongest aftershocks are presented in Fig. 3.

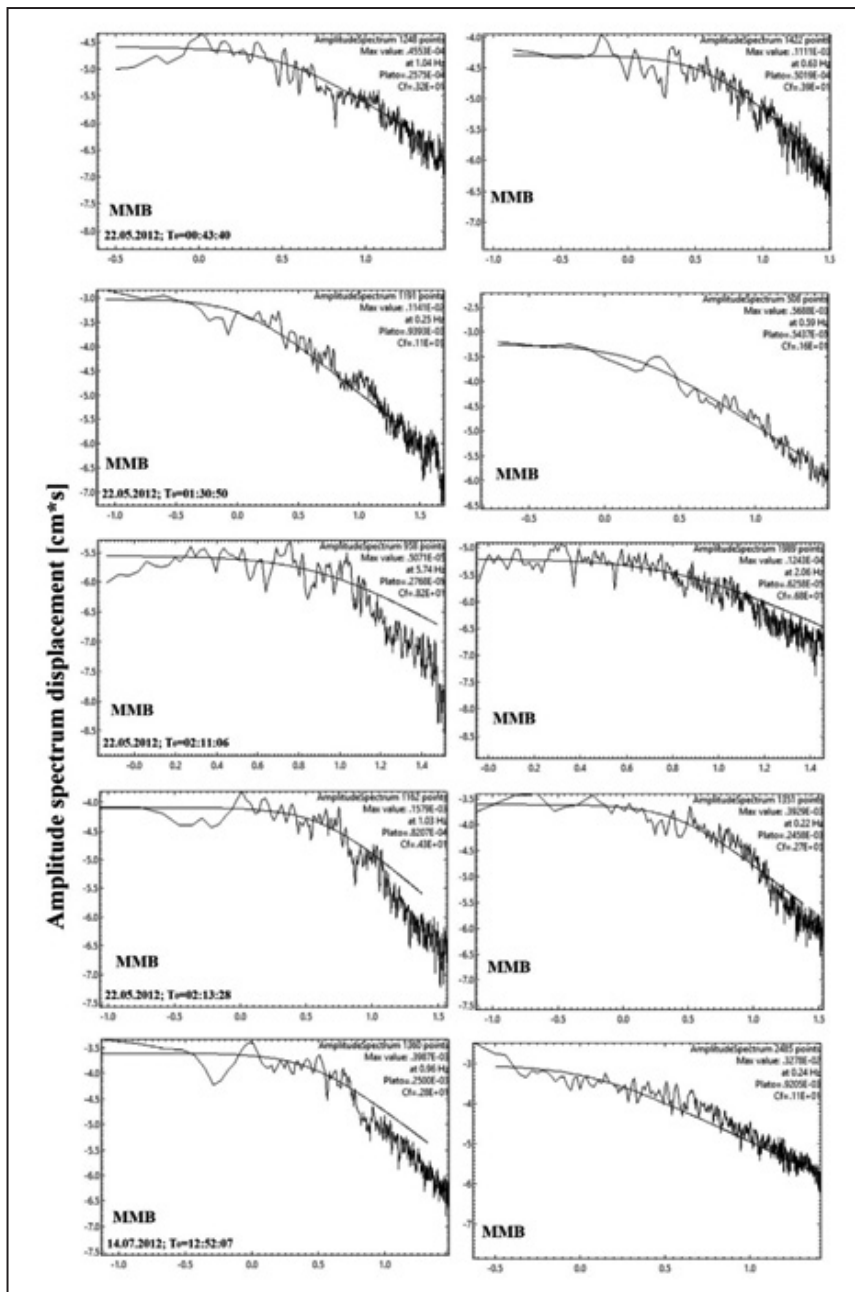
The source parameters are estimated for 6 earthquakes: for the main event with magnitude  $M_w$  5.6 and for five aftershocks with magnitude  $M_w$  in the interval  $3.4 \div 4.5$ .

The spectra for the main event with  $M_w$  5.6 are generated on the base of the records at 13 stations. Displacement spectra for P and S waves based on records at 3 stations are presented in the Fig. 2. In the figure 3 are presented spectra for five of the strongest aftershocks. Presented displacement spectra for aftershocks both for P and S waves are based on records at the nearest station.



**Fig. 2.** Displacement spectra for P (the left column) and S wave for the 2012 Sofia earthquake ( $M_w$  5.6).





**Fig. 3.** Displacement spectra for P (the left column) and S wave for five of the strongest aftershocks.

In table 1 are presented source parameters for the main shock and for 5 of the strongest aftershocks.

**Tab. 1.** Seismic source parameters of the 2012 seismic cluster that is located near the city of Pernik (Sofia seismogenic zone).

Date	$M_w$	Number of stations	$M_{0p}$ [N*m]	$\Delta\sigma_p$ [bar]	$r_p$ [km]	$M_{0s}$ [N*m]	$\Delta\sigma_s$ [bar]	$r_s$ [km]
22.05.2012	5.6	13	4.61E+17	52.99	3.53	2.13E+18	276.72	3.54
22.05.2012.	3.7	13	6.10E+14	18.95	0.53	4.68E+14	31.13	0.41
22.05.2012	4.5	11	1.57E+16	40.47	1.24	9.24E+16	21.73	2.36
22.05.2012	3.4	7	4.67E+13	52.28	0.17	5.50E+13	37.14	0.21
22.05.2012	4.0	13	2.08E+15	47.71	0.53	2.24E+15	44.95	0.61
14.07.2012	4.2	13	3.12E+15	74.48	0.61	5.44E+15	97.23	0.82

The results (based on P - wave and S - wave spectra) show that the stress drop for the main  $M_w$ 5.6 earthquake is about 53 bars for the P-wave and approximately 280 bars for the S - wave. The stress drop values estimated for P - waves are within the expected range for moderate earthquakes while for the S - waves are several times higher than the expected ones.

The stress drop average values for the aftershocks are between 19 bars and 97 bars. The aftershocks are characterized with lower stress drop values than those for the main event.

Source radius for the main shock is 3.5 km. Results for the aftershocks source radius are between 0.2 km and 2.4 km.

For aftershocks, seismic moments are in the range  $4.67 \times 10^{13} \leq M_0 \leq 9.24 \times 10^{16}$  (Nm) and the corresponding moment magnitudes,  $M_w$ , are from 3.0 to 4.6.

## 4. Conclusions

- For 2012  $M_w$ 5.6 earthquake the stress drop (about 53 bars) estimated using P-waves is within the expected range for moderate earthquakes (from 10 to 100 bars), while for S-waves (approximately 280 bars) it is about 3 times higher than the expected one;
- The stress drop values estimated for P and S waves for aftershocks are within the expected range for moderate earthquakes. The stress drop values are between 19 bars and 97 bars.
- Source radius for the main shock is about 3.5 km. Estimates of the aftershock source radius are between 0.2 km and 2.4 km.

## References

- Aki, K., P. G. Richards, 2002. Quantitative seismology. Second Edition, ISBN 0-935702-96-2, University Science Books, Sausalito, 704 pp.
- Allmann, B. P., P. M. Shearer, 2007. Spatial and temporal stress drop variations. *J. Geophys. Res.*, VOL. 112, B04305, doi:10.1029/2006JB004395
- Brune, J., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009.
- Brune, J., 1971. Correction (to Brune (1970)), *J. Geophys. Res.* 76, 5002.
- Eshelby, J. D., 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. In: *Proc. R. Soc. Lond. A* 241, 376-396.
- Kanamori, H. and Anderson, D. L., 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 65, 1073-1095.
- Kanamori, H. and C. Allen, 1986. Earthquake repeat time and average stress drop, in *Earthquake Source Mechanics*, *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 37, edited by S. Das, J. Boatwright, and C. H. Scholz, pp. 227-2352.
- Kanamori, H., Brodsky, E. E., 2004. The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics* 67, 1429-1496.
- Liu, M., Stein, S., 2011. Aftershocks. In: Gupta, H. (Ed.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. H. Springer, Dordrecht. The Netherlands, pp. 192-194.
- Malagnini, L., R. B. Herrmann and K. Koch, 2000. Regional ground motion scaling in Central Europe. *Bull. Seism. Soc. Am.* 90, 1052-1061.
- Margaris, N. and D. M. Boore, 1998. Determination of  $\sigma$  and  $\kappa_0$  from response spectra of large earthquakes in Greece. *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 170-182.
- Solakov D., S. Simeonova, P. Raykova, I. Aleksandrova, M. Popova, V. Protopopova, 2016. Seismological Analysis of the 2012  $M_w$  5.6 Earthquake in Sofia Seismic Zone. *Comptes rendus de l'Acad'emie bulgare des Sciences*, 69, 1, 67-74
- Stein, S. and Liu M., 2009. Long aftershock sequences within continents and implications for earthquake hazard assessment. *Nature*, 462, 87-89.
- Utsu, T., 1961. A statistical study of the occurrence of aftershocks. *Geophysical Magazine*, 30, 521-605.
- Zaliapin, I. and Ben-Zion, Y., 2013. Earthquake clusters in Southern California I: Identification and Stability. *J. GEOPHYS. RES., Solid Earth*, 118, 6, 2847-2864.

## Оценка огнищните параметри на земетресения, използвайки спектри на Р и S-вълни—анализиран е сеизмичният клъстер, реализиран през 2012 г. в сеизмогенна зона София

Пл. Райкова

**Резюме:** Спектралният анализ на сеизмичните вълни е един от основните източници на информация за земетресенията. Представени са спектрите на Р- и S-вълни за земетресения от сеизмичния клъстер (главно събитие с магнитуд  $M_w$  5.6 - афтершо-

ци) от 2012 г. Оценката на огнищните параметри е базирана на модела на Brune. Моделът се широко използван в сеизмологичните изследвания и е установено, че той е в добро съответствие с наблюденията от различни тектонски региони и е приложим за голям магнитуден диапазон. Проведеното изследване се основава на цифрови данни от Българската сеизмологична мрежа - NOTSSI (Национална оперативна телеметрична система за сеизмологична информация). Генерирани са спектри на преместване за P- и S- вълни, с цел да се определят някои от параметрите на сеизмичния източник, такива като сеизмичен момент, свалено напрежение и радиус. Определени са параметрите на 6 земетресения: на главното събитие с магнитуд по сеизмичен момент  $M_w$  5.6 и на пет афтершока с магнитуд  $M_w$  в интервала  $3.4 \div 4.5$ . За главното събитие стойностите на сваленото напрежение, изчислено за P - вълна, са в рамките на очаквания диапазон за умерено силно земетресение, докато за S – вълна стойностите на сваленото напрежение са няколко пъти по-високи от очакваните. Установено е, че афтершоците се характеризират с по-ниска стойност на сваленото напрежение в сравнение с основното събитие.

## SHORT-TERM PREDICTION OF THE IONOSPHERIC CRITICAL FREQUENCIES OVER BULGARIA

*R. Bojilova<sup>1</sup>, P. Mukhtarov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography - Bulgarian Academy of Sciences, str. Acad. G. Bonchev, bl. 3, Sofia, 1113, Bulgaria, e-mail: rbojilova@geophys.bas.bg; engpjm@abv.bg

DOI: 10.34975/bgj-2020.43.7

**Abstract.** An empirical model has been developed for short-term forecasting of ionospheric critical frequencies over Bulgaria, taking into account the variations in solar and geomagnetic activity. The model is based on data from the vertical sounding of the ionosphere over Bulgaria for the period 1995-2014 and designed to prepare real-time forecasts for the propagation of radio waves during ionospheric reflection on the territory of Bulgaria.

**Key words:** ionosphere, critical frequency, geomagnetic storm, solar activity.

### Introduction

Forecasting of the critical frequencies of the ionosphere is a scientific and practical activity related to implementation of long-distance radio communications using ionospheric reflection of the radio waves. The critical frequencies of the ionosphere –  $f_oF_2$  (maximum frequency at which the reflection from the ionosphere is observed in vertical propagation) and  $MUF3000$  (maximum frequency of reflection in oblique propagation at a distance of 3000km) are connected with the maximum value of the electron concentration in the ionosphere and the shape of its altitude profile.

Knowing these critical frequencies allows determining the operating frequencies of radio receivers and radio transmitters when making a radio communication at a given distance. The ionospheric electron concentration, respectively the critical frequencies depend on the diurnal time, the season, the level of the solar and geomagnetic activity.

The task of short-term prediction is to determine the most probable values of the critical frequencies for a future period of time of the interval 1-3 days, taking into account the forecast values of solar and geomagnetic activity, represented by heliophysics.

Short-term ionospheric prediction has been a priority topic of the section “Physics of the ionosphere” at the National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences since its creation.

A team from the section participates in the international scientific project COST 251 with a developed autocorrelation model for short-term prediction (Kutiev et al, 1999, Muhtarov et al, 1998). The tradition of providing ionospheric forecasts to the Ministry of Defense of the Republic of Bulgaria is long-standing.

This paper presents the newest empirical model for predicting of the ionospheric critical frequencies, developed in the section “Physics of the ionosphere”.

## Data

The geomagnetic activity, described by the planetary Kp-index, and solar activity, described by F10.7 is provided from: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>. The foF2 and MUF3000 values are derived from the ionosonde station Sofia - SQ143 (42.4°N, 23.2°E) that belongs to the National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences for the period of 1995-2014.

Detailed research (Mukhtarov et al, 2018) shows that for the purposes of short-term forecasting it is appropriate to use modified values of both the critical frequencies and the quantities characterizing the solar and geomagnetic activity. In this modification, the steady (undisturbed) state is removed from all quantities.

The task of prediction is to determine the deviation from this steady state. The steady state itself is determined on the basis of a sufficiently long time interval before the moment of forecasting, assuming that for this time interval there are measured values of the critical frequencies and the indices of solar and geomagnetic activity.

$$\begin{aligned} rfoF2(t) &= \frac{foF2(t) - foF2_{med}(UT)}{foF2_{med}(UT)}, \\ rMUF3000(t) &= \frac{MUF3000(t) - MUF3000_{med}(UT)}{MUF3000_{med}(UT)}. \end{aligned} \quad (1)$$

The relative values of the critical frequencies in (1) are calculated from the measured value at the given moment  $t$  and the median, calculated on the basis of the values during the same hour of the day in the 15 previous days.

The relative value of the index of solar activity (F10.7) is determined in a similar way:

$$rF10.7(t) = \frac{F10.7(t) - F10.7_m}{F10.7_m}. \quad (2)$$

With index  $m$  is denoted average value of 10.7 for the previous 15 days.

The modification of the index of geomagnetic activity  $Kp$  is reduced to the subtraction of the average value of  $Kp$  for the previous 15 days:

$$Kp_f(t) = Kp(t) - Kp_m. \quad (3)$$

The modified index of geomagnetic activity is subjected to additional processing related to the fact that the ionosphere reacts to disturbances of geomagnetic origin as an inert system, due to the inertia of the processes of heating neutral gases in polar latitudes under the action of the solar wind (Andonov et al, 2011):

$$Kp_i(t_n) = \left( \exp\left(\frac{1}{T}\right) - 1 \right) \sum_{k=0}^{n-1} Kp_f(t_k) \exp\left(-\frac{t_n - t_k}{T}\right). \quad (4)$$

The time constant of delay  $T$  depends on the season and is determined in the synthesis of the model.

## Model functions

The main dependences of the relative deviation (formally denoted by  $F$ ) of the critical frequencies of the day time, solar and geomagnetic activity can be represented as:

$$\Phi = \Phi_{UT}(UT) \Phi_{sol}(F10.7_{rel}) \Phi_g(K_{pi}). \quad (5)$$

Each of the three unknown functions is assumed to be continuous, so it can be represented by the partial sum of its decomposition in order. Obviously, the periodic dependence on the diurnal time is represented by its Fourier decomposition, and the aperiodic dependences on the solar and geomagnetic activity are presented by Taylor decomposition. The study of the functional dependence of the relative deviations from the geomagnetic activity shows that it is expedient to use a third degree polynomial, which means that the partial sum of the Taylor order can be limited to the third degree. The dependence on solar activity turned out to be close to the linear one, but a second degree polynomial will be accepted (Mukhtarov, Bojilova 2017).

Under these assumptions, the three functions take the following form:

$$\begin{aligned} \Phi_{UT} = & a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{24} UT\right) + a_2 \sin\left(\frac{2\pi}{24} UT\right) + \\ & + a_3 \cos\left(\frac{2\pi}{12} UT\right) + a_4 \sin\left(\frac{2\pi}{12} UT\right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Phi_s = b_0 + b_1 F10.7_{rel}(t - t_s) + b_2 F10.7_{rel}^2(t - t_s) \quad (7)$$

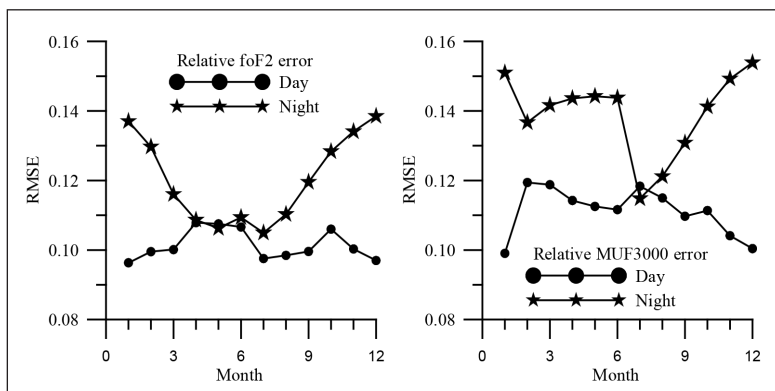
$$\Phi_g = c_0 + c_1 K_{piT1}(t) + c_2 K_{piT1}^2(t) + c_3 K_{piT1}^3(t) + c_4 K_{piT2}(t - t_{g2}) + c_5 K_{piT2}^2(t - t_{g2}) + c_6 K_{piT2}^3(t - t_{g2}) \quad (8)$$

In accordance with the study of the global ionosphere response (Mukhtarov et al., 2013), it is assumed that there are two types of ionosphere responses to geomagnetic disturbances with two different time constants denoted by  $T1$  and  $T2$ , respectively. Two additional time delays have been introduced. The delay  $t_s$  reflect the delay of variations in the electron concentration with variations in solar activity. The delay  $t_{g2}$  reflects the additional delay of the negative reactions of the electron concentration during geomagnetic disturbances, related to the time required to transport the heated air from polar to mid latitudes.

The model is described by a total of 193 constants, which are different for  $foF2$  and  $rMUF3000$  and for each calendar month of the year. Separately calculated the constants of the model for day and night conditions. They are determined by the method of least squares, which minimizes the standard deviation of the model values from the data.

## Results

Fig. 1 shows the seasonal course of root mean square errors (RMSE) of the model relative deviations of  $foF2$  and  $MUF3000$  separately in day and night conditions. The error in daytime conditions for both critical frequencies is about 11%. For nighttime condition varies from 11% to 16%. Under nighttime conditions, larger deviations of the model from the data are obtained, which is due to the greater instability of the night ionosphere, which is dominated by recombination processes related to the dynamics of neutral gases, which is determined by internally atmospheric processes. Deviations increase during the winter season compared to the summer season due to the greater instability of the neutral atmosphere during the winter season.

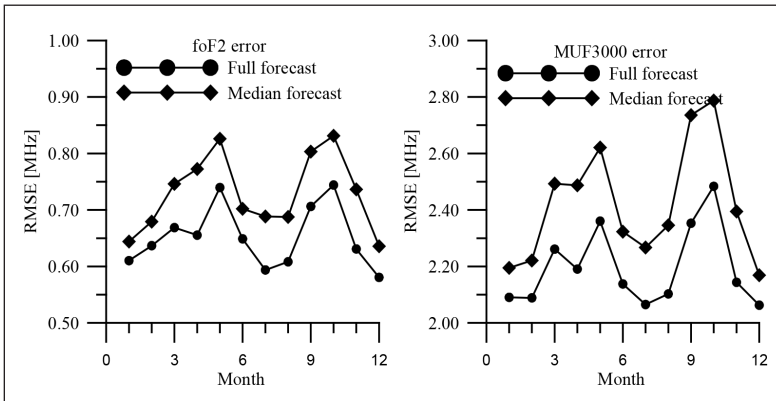


**Fig. 1.** Seasonal course of RMSE of the model relative  $foF2$  and  $MUF3000$  presented separately for day (circles) and night (stars) conditions.

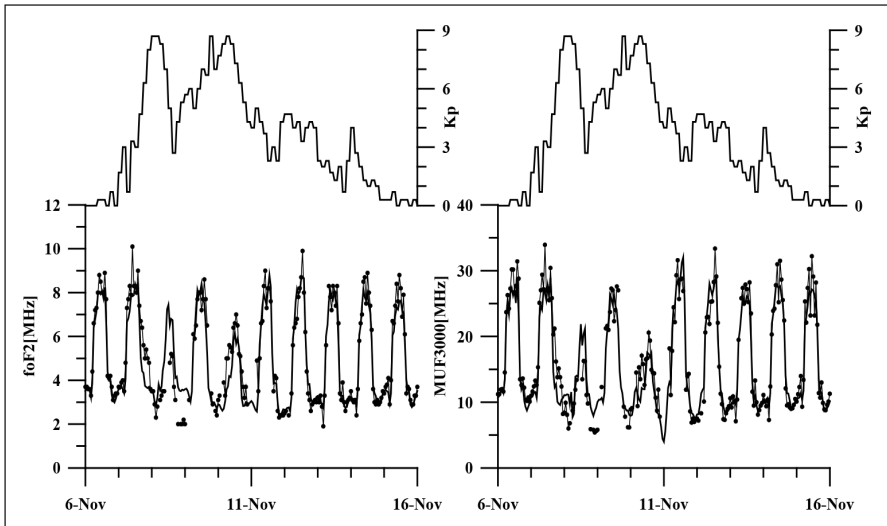


In real prediction mode, the critical frequency values are calculated as follows from (1):

$$\begin{aligned} foF2(t) &= foF2_{med}(UT)(1 + foF2_{rel}(t)), \\ MUF3000(t) &= MUF3000_{med}(UT)(1 + MUF3000_{rel}(t)). \end{aligned} \quad (9)$$



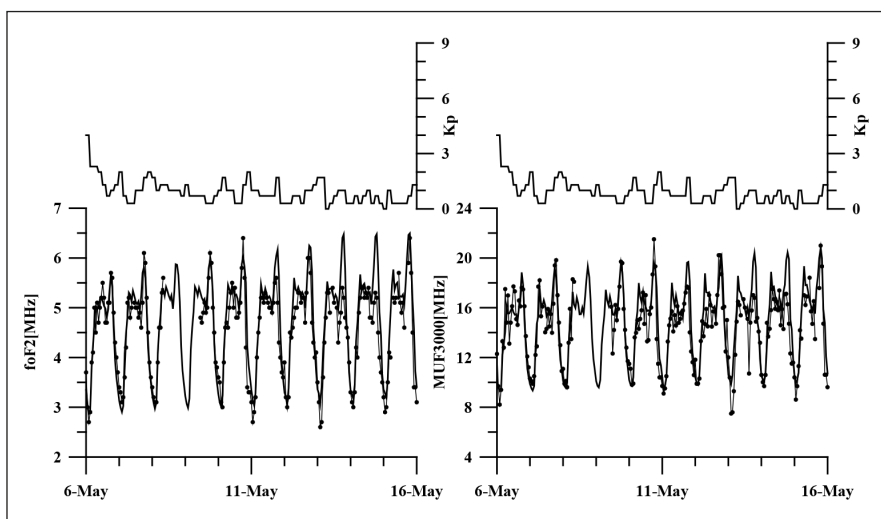
**Fig. 2.** Seasonal course of RMSE of the model for foF2 and MUF3000 values when forecasting only by the medians (circles) and by the full model (diamonds).



**Fig. 3.** Comparison between data (marked with circles) and the model in conditions of strong geomagnetic storm in November 2004.

Fig. 2 shows the seasonal course of RMSE of the model for  $foF2$  and  $MUF3000$ . For comparison, the prediction error is shown only on the basis of medians (relative values depending on the variations of solar and geomagnetic activity take zero values). The seasonal course in both types of forecasting has peaks during the equinox months. The fact that these increases also exist when predicted only by medians shows that they are due to the unstable course of the critical frequencies during the seasonal edistribution of the ionosphere in the equinox months.

Fig. 3 shows comparison of the hourly values of the data and the model during a strong geomagnetic disturbance in November 2004. For comparison, Fig. 4 presents a completely quiet period in May 2008.



**Fig. 4.** Comparison between data (marked with circles) and the model during in quiet conditions in May 2008.

## Conclusions

The model for short-term prediction of the ionospheric critical frequencies  $foF2$  and  $MUF3000$  presented in the this study is designed for automatic and in real-time preparation of forecasts for the propagation of radio waves over Bulgaria to be used in the implementation of radio communication through ionospheric reflection. The model is based on measured values of the critical frequencies for a 15-days period before the current day and on forecasts of solar and geomagnetic activity indices.

The measured values of the critical frequencies can be data from the vertical sounding of the ionosphere or from their reconstruction according to the data of Total Electron Content TEC data (Rumiana Bojilova and Plamen Mukhtarov, article in press).

Forecasts of solar and geomagnetic activity are available online from Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration (<https://www.swpc.noaa.gov/>).

The presented model is developed on the basis of data from vertical sounding of the ionosphere over Bulgaria for the period 1995-2014. The root mean square error (RMSE) when forecasting  $f_oF2$  is 0.65 MHz and when predicting  $MUF3000$  is 2.2 MHz, which allows calculation of specific radio paths in the territory of Bulgaria with sufficient accuracy.

**Acknowledgments.** The present work is supported by the Bulgarian Ministry of Education and Science under the National Research Programme “Young scientists and postdoctoral students” approved by DCM № 577/ 17.08.2018. The presentation of the results is financed by Contract No D01-282/17.12.2019 - Project “National Geoinformation Center (NGIC)” funded by the National Roadmap for Scientific Infrastructure 2017-2023 of Bulgaria.

## References

- Kutiev, I., Muhtarov, P., Cander, L. R. & Levy, M. F. (1999). Short-term prediction of ionospheric parameters based on auto-correlation analysis. *Annals of Geophysics*, 42(1).
- Muhtarov, P., Cander, L., Levy, M. & Kutiev, I. (1998, March). Application of the geomagnetically correlated statistical model to short-term forecast of  $f_oF2$ . In 2nd COST 251 Workshop, European Cooperation in the field of Science and Technological Research (COST), Side, Turkey (pp. 30-31).
- Mukhtarov, P., Andonov, B., Pancheva, D. (2018). Empirical model of TEC response to geomagnetic and solar forcing over Balkan Peninsula. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 167, 80-95.
- Andonov, B., Mukhtarov, P., Pancheva, D. (2011). Empirical model of the TEC response to the geomagnetic activity over the North American region. *Advances in Space Research*, 48(6), 1041-1048.
- Mukhtarov, P., Bojilova, R. (2017). „INFLUENCE OF SOLAR AND GEOMAGNETIC ACTIVITY ON THE IONOSPHERE OVER BULGARIA“, *Comptes rendus de l'Acad'emie bulgare des Sciences*, Tome 70, No 9, 1289-1296.
- Mukhtarov, P., Andonov, B. & Pancheva, D. (2013). Global empirical model of TEC response to geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(10), 6666-6685.
- Rumiana Bojilova, Plamen Mukhtarov “RECONSTRUCTION OF IONOSPHERIC CRITICAL FREQUENCIES BASED ON THE TOTAL ELECTRON CONTENT OVER BULGARIA”, *Comptes rendus de l'Acad'emie bulgare des Sciences* (in press)

## **Краткосрочно прогнозиране на йоносферните критични честоти над България**

Р. Божилова, П. Мухтаров

**Резюме:** Разработен е емпиричен модел за краткосрочно прогнозиране на йоносферните критични честоти над България с отчитане на вариациите в слънчевата и геомагнитна активност. Моделът се базира на данни от вертикалния сондаж на йоносферата над България за периода 1995-2014 г. и е предназначен за изготвяне в реално време на прогнози за разпространението на радиовълните при йоносферно отражение в границите на България.

## ULF GEOMAGNETIC OBSERVATION AT PANAGJURISHTE, BULGARIA AS A TOOL FOR INVESTIGATION OF THE MAGNETOSPHERE-IONOSPHERE-LITHOSPHERE SYSTEM

*M. Chamati*

National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences, ul. Acad. G. Bonchev, bl 3, Sofia 1113, Bulgaria, e-mail: mchamati@geophys.bas.bg

DOI: 10.34975/bgj-2020.43.8

**Abstract.** A tri-axial search-coil magnetometer system, a part of SEGMA Array (South European Geomagnetic Array), operates since 2003 at the Geomagnetic Observatory Panagjurishte, Bulgaria. It is designated to measure and collect data for the Earth's magnetic field variations, specific geomagnetic events and long-term study of ULF signals. These observations provide information on the dynamical processes in the Earth's magnetosphere, geomagnetic micro-pulsations, fluctuations and storms. Here, we obtained results related to three powerful geomagnetic storms recorded by the search-coil magnetometer during the years 2017-2018. Furthermore, we presented the dynamical spectra in the ULF range of each storm.

**Key words:** ULF variations, search-coil magnetometer, geomagnetic storm, Panagjurishte.

### Introduction

The study of the ULF spectrum (0.001-10 Hz) of the Earth's magnetic field, its local fractal structures, spectral and polarization characteristics are important for the identification of the causes of the associated disturbances. In the last two decades, the analysis of the ULF spectrum of magnetic field is particularly relevant, as it is believed that ULF emissions are likely to be generated directly from the area of preparation of geodynamic processes (Fraser-Smith, 2009; Molchanov et al., 2011). In most of all reported cases of such emissions, recorded by ground-based measurements, these are signals that are not of lithospheric origin, but are related to the interaction of the solar wind with the Earth's magnetosphere. These processes, which have a magnetospheric origin, are recorded on the Earth and together with the ionospheric and local ones, form the electromagnetic

noise at a given point of recording (McPherron, 2005). Signals of lithospheric origin are difficult to identify against the background of general electromagnetic noise. For this reason, different authors use different methods to analyze these ULF emissions, both classical and non-traditional: the direct search method (Ismaguilov et al., 2003; Kopytenko et al., 2001, 1993; Li et al., 2019, 2013; Prattes et al., 2011) polarization method, determination of principal components and singular spectral analysis (Serita et al., 2005), Power spectrum analysis, monofractal and multifractal analysis (Gotoh et al., 2003; Ida et al., 2012, 2005; Varotsos et al., 2009, 2003), DFA (detrended fluctuation analysis) (Chamati et al., 2011, 2009; Chamati, M., 2018; Chamati and Botev, 2019; Nenovski et al., 2013) and classical statistical methods (Fidani, 2019, 2018; Zhang et al., 2013).

The preparation of geodynamic processes in the lithosphere is not well understood from an electromagnetic point of view. To gain insight the variations of the magnetic field measured in the ground layer, a comprehensive study of the complex of physical phenomena arising in the preparation of geodynamic processes is necessary.

## **Geomagnetic variations**

The geomagnetic variations can be generally classified as variations of external and internal origin. The time variations of external origins include two main types: regular and irregular. The regular variations are classified as daily (Solar-quiet and Lunar-magnetic) and long-term (Solar cycle). The irregular variations include pulsations, storms and substorms. The time variations of internal origins are mainly due to sources in deep interior of the Earth. They are known as long-term variations (secular, jerks) and generally occur on time scales longer than few years. The short-term variations originate in the sources external to the Earth and they occur in time scales less than one year. ULF pulsations (continues and irregular) and their manifestation in the Earth's magnetic field variations are important to the study dynamical processes in magnetosphere (Bleier et al., 2009; Li et al., 2013; McPherron, 2005; Prattes et al., 2011). Many studies suggest a lithospheric source of some of the short time variations that are lasting from few seconds to few days. The variations, recorded on the ground and related to anthropogenic activities, are also a part of the general geomagnetic noise.

## **Measuring instrument and data set**

On May 2003, as a part of South European Geomagnetic Array (Italy, Hungary, Bulgaria), at Geomagnetic Observatory Panagjurishte a three-axial search coil magnetometer was installed. Thanks to the cooperation between University of L'Aquila, Italy and National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgaria, the acquisition system and communication equipment were fully upgraded in 2016. The timing is provided via GPS. The station allows to conduct studies on the longitudinal propagation of ULF signal. It provides real time measurements at a sampling period of 0.01s. For the needs of our research we use filtered data at sampling period 1s. In Table1 basic characteristics of the induction magnetometer which is located at Panagjurishte Geomagnetic Observatory are presented.

**Table 1.** Characteristics of the induction magnetometer at Panagjurishte, Bulgaria

Characteristics of induction magnetometer at Panagjurishte, Bulgaria	
Frequency band:	5 mHz – 20 Hz
Sensitivity:	10 mV/nT – 100 mV/nT
Intrinsic noise:	$0.05 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz
Temperature drift:	0.001%/C
Linearity:	0.006%
Axes misalignment:	< 0.1 degrees
Output signal:	+/- 10 V (+/-1000 or 100 nT)
Dimensions:	80x80x80 cm
Power supply:	12 V
Current absorption:	300 mA
Thermal range:	-40 °C/+50°C

Table 2 presents the geographic and geomagnetic coordinates of the measuring instrument.

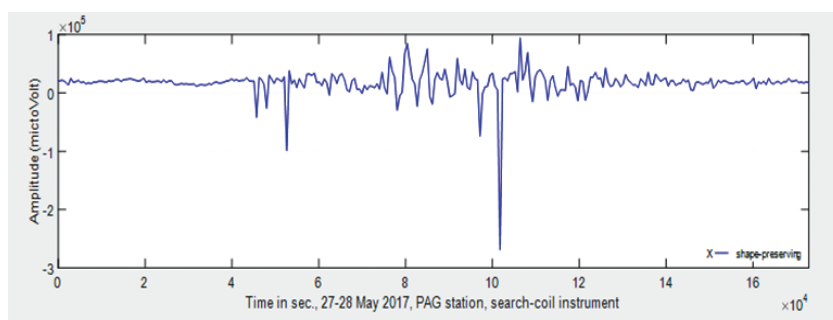
**Table 2.** Location of the measuring instrument

Station	Geographic Coordinates	Corr. Geomagnetic Coordinates	L
Panagjurishte, Bulgaria	42.51 N	37.02 N	1.6
COD: PAG	24.18 E	97.24 E	(Corrected geomagnetic coordinates (CGM) and L values refer to the year 2006 and altitude of 120 km and are computed from a geomagnetic field model provided by: <a href="http://modelweb.gsfc.nasa.gov/models/cgm">http://modelweb.gsfc.nasa.gov/models/cgm</a> )

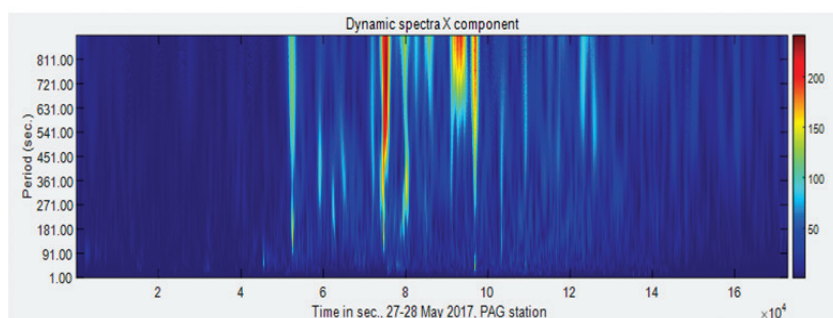
## Results

As a demonstration of some of the many opportunities that research of ULF geomagnetic spectrum provides, here are presented three different cases: two geomagnetic storms and the set of three subsequent days with high geomagnetic activity recorded at Geomagnetic Observatory Panagjurishte, Bulgaria. Case one: the geomagnetic storm that occurs on 27-28 May 2017. The  $K_p$  index reaches a value 6.5 for the hours between 22:00 (UT) on 27 of May and 03:00 (UT) on 28 of May 2017 according to the prognostic data information (calculated from data on the parameters of the solar wind) which is updated every day on the internet page of National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgaria ([http://data.niggg.bas.bg/kp\\_for/kp\\_mod\\_bg.php](http://data.niggg.bas.bg/kp_for/kp_mod_bg.php)). On Figure 1 a shape-preserving Piecewise cubic Hermite interpolation (PCHIP) of the

ULF signal for the X (north-south) component of the geomagnetic field variations, which allows to emphasize the changes in the signal that originally recorded at resolution 1s is presented. Here are clearly visible rising disturbances in the signal and its maxima in time interval 22:00 (UT) on 27 of May till 03:00 (UT) on 28 of May 2017. On Figure 2 the dynamic spectra of the ULF signal, its period scales and energy spectrum are presented. Disturbances are observed over all time scales between 1Hz and 1mHz as most of the energy of the process is concentrated within time scale 180-900 seconds during the storm.



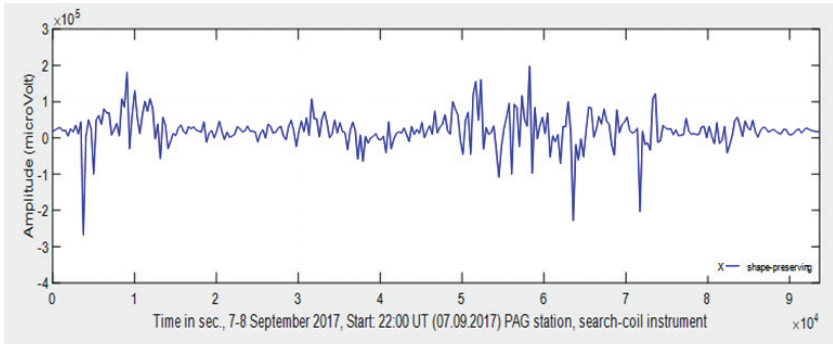
**Fig. 1.** Shape-preserved signal in seconds, 27-28 May 2017, X component



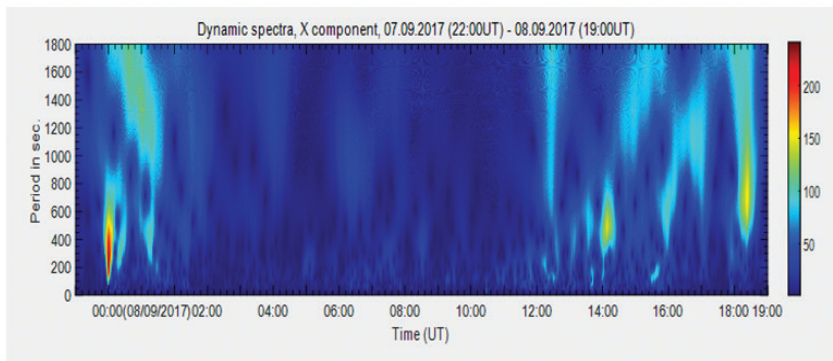
**Fig. 2.** Dynamic spectra, X component, 27-28 May 2017, PAG station, time in seconds.

Case two: the powerful geomagnetic storm which occurred at 7-8 September 2017. It begins about 23:00 (UT) and about 02:00 (UT)  $Dst_{min} = -142$  nT (Blagoveshchensky and Sergeeva, 2018). During the storm at the Geomagnetic Observatory Panagjurishte the local K index reaches the value 7. The shape preserved signal for the X component of geomagnetic field variations is presented on Figure 3 and its dynamic spectra are presented on Figure 4 (Fig.4 is previously presented in (Chamati, M., 2018)). Here are observed powerful disturbances, including continuous ULF pulsations, during the whole period in all time scales. These storms are studied in detail in (Chamati, M., 2018).





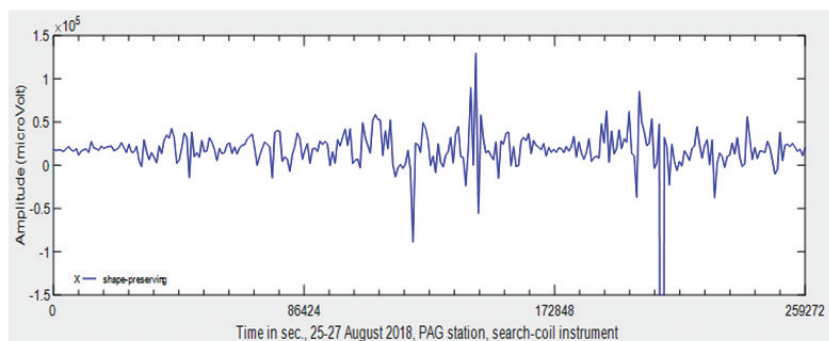
**Fig. 3.** Shape-preserved signal in seconds, 7-8 September 2017, X component



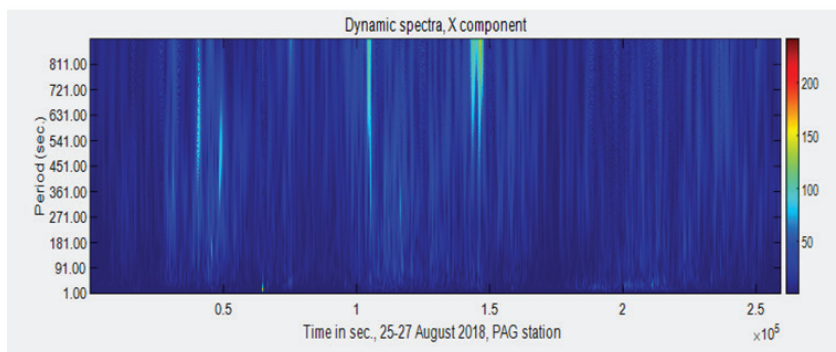
**Fig. 4.** Dynamic spectra X component, 7-8 September 2017, PAG station

Case three: the geomagnetic storm that occurs at 26 August 2018. During the morning hours at same day, Dst index reaches the value -169nT at high latitudes (Kleimenova et al., 2019). Here are recorded and observed geomagnetic disturbances and pulsations which appear in time period 25-27 August 2018. Figure 5 presents shape-preserved signal in seconds for the X component of geomagnetic field variation at PAG station. The disturbances with high amplitudes are clearly visible at 26 August 2018. The calculated  $K_p$  index varies between 4 and 6.5 for the hours between 19:00 (UT) at 25 August and 22:00 (UT) at 27 August 2018 ([http://data.niggg.bas.bg/kp\\_for/kp\\_mod\\_bg.php](http://data.niggg.bas.bg/kp_for/kp_mod_bg.php)). The  $K_p$  value is 7.

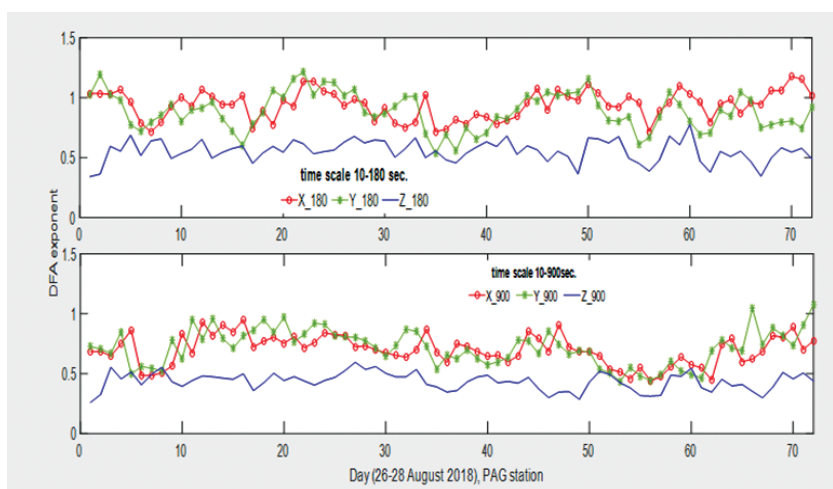
Figure 6 depicts dynamic spectra obtained for the X component. Relatively lower-energy disturbances are observed in the ULF spectrum of geomagnetic field variations at Panagjurishte, Bulgaria than high geomagnetic latitudes. Its maxima appear during the storm at 26 August 2018 with periods 450-900sec. For the other time scales the signal is significantly disturbed. Detrended fluctuation analysis (DFA) (Peng et al., 1995) is applied to data for X, Y and Z components for the time period 25-27 August. The DFA



**Fig. 5.** Shape-preserved signal in seconds, 25-27 August 2018, X-component



**Fig. 6.** Dynamic spectra X component, 25-27 August 2018, PAG station



**Fig. 7.** DFA exponent, X, Y, Z components in time scales (10-180 sec) - top panel and (10-900sec) - bottom panel

exponent is calculated for two time scales: 10-180 sec and 10-900 sec. for each geomagnetic component. The behavior of the DFA exponent is presented on Figure 7. The time scale 10-180 sec. shows enhanced dynamic and unstable changes in the behavior of the DFA exponent compared to time scale 10-900 sec.

## Conclusion

Using the data for the X component of the geomagnetic field variations, collected by the search-coil magnetometer at Panagjurishte, Bulgaria, we investigate three significant and powerful geomagnetic storms during 2017-2018. These storms have occurred at 27-28 May 2017, 7-8 September 2018 and 26 August 2018. For the first one we found that during the storm most of the energy of the process is concentrated in the time scale 180-900 seconds and all of the analyzed time scales are disturbed. For the second one powerful disturbances, including continuous ULF pulsations are observed, during the whole presented time period in all time scales. The third storm provides information that lower-energy disturbances are observed in the ULF spectrum of geomagnetic field variations at Panagjurishte, Bulgaria than high geomagnetic latitudes. The maxima of ULF spectra appear in the time scale 450-900 sec. DFA analysis shows that scaling exponent has enhanced dynamic and unstable changes in its behavior in time scale 10-180 sec. compared to time scale 10-900 sec.

**Acknowledgments.** This work is supported by Contract No D01-282/17.12.2019 (Project “National Geoinformation Center (NGIC)” financed by the National Roadmap for Scientific Infrastructure 2017-2023.

## References

- Blagoveshchensky, D. V., Sergeeva, M. A., 2018. Impact of geomagnetic storm of September 7-8, 2017 on ionosphere and HF propagation: A multi-instrument study. *Advances in Space Research*. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07.016>
- Bleier, T., Dunson, C., Maniscalco, M., Bryant, N., Bambery, R., Freund, F., 2009. Investigation of ULF magnetic pulsations, air conductivity changes, and infra red signatures associated with the 30 October Alum Rock M5.4 earthquake. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 585-603. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-585-2009>
- Chamati, M., 2018. Geomagnetic disturbances observed at Panagyuriste (PAG) station, Bulgaria on 7-8th of September 2017 during the geomagnetic storm., in: *Proceedings of the IX National Geophysical Conference*. Presented at the IX National Geophysical Conference, Sofia, Bulgaria, pp. 10-16.
- Chamati, M., Botev, E., 2019. Nonlinear Analysis of Geomagnetic Variations Data from Panagyuriste Geomagnetic Observatory, Bulgaria. Presented at the 10th Congress of the Balkan Geophysical Society. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902631>
- Chamati, M., Nenovski, P., Vellante, M., Villante, U., Schwingenschuh, K., Boudjada, M., Westergom, V., 2011. Application of DFA method to magnetic field data, in: *Complex Research of*

- Earthquake's Forecasting Possibilities, Seismicity and Climate Change Correlations, 13-16 September 2011, Tbilisi, Georgia, pp. 72-79.
- Chamati, M., Nenovski, P., Vellante, M., Villante, U., Schwingenschuh, K., Boudjada, M., Wesztergom, V., 2009. Application of DFA method to magnetic field data from SEGMA array. *Bulgarian Geophysical Journal* 35, 3-16.
- Fidani, C., 2019. Probability, causality and false alarms using correlations between strong earthquakes and NOAA high energy electron bursts. *Annals of Geophysics* 62. <https://doi.org/10.4401/ag-7957>
- Fidani, C., 2018. Improving earthquake forecasting by correlations between strong earthquakes and NOAA electron bursts. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 29, 117–130. <https://doi.org/10.3319/TAO.2017.10.06.01>
- Fraser-Smith, A. C., 2009. The ultralow frequency magnetic fields associated with and preceding earthquakes., in: *Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*. Transworld Research Network, pp. 1-20.
- Gotoh, K., Hayakawa, M., Smirnova, N., 2003. Fractal analysis of the ULF geomagnetic data obtained at Izu Peninsula, Japan in relation to the nearby earthquake swarm of June–August 2000. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 3, 229-236. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-229-2003>
- Ida, Y., Hayakawa, M., Adalev, A., Gotoh, K., 2005. Multifractal analysis for the ULF geomagnetic data during the 1993 Guam earthquake. *Nonlin. Processes Geophys.* 12, 157-162. <https://doi.org/10.5194/npg-12-157-2005>
- Ida, Y., Yang, D., Li, Q., Sun, H., Hayakawa, M., 2012. Fractal analysis of ULF electromagnetic emissions in possible association with earthquakes in China. *Nonlinear Processes in Geophysics* 19, 577–583. <https://doi.org/10.5194/npg-19-577-2012>
- Ismaguilov, V. S., Kopytenko, Yu. A., Hattori, K., Hayakawa, M., 2003. Variations of phase velocity and gradient values of ULF geomagnetic disturbances connected with the Izu strong earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 3, 211–215. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-211-2003>
- Kleimenova, N. G., Gromova, L. I., Gromov, S. V., Malysheva, L. M., 2019. The Magnetic Storm of August 25–26, 2018: Dayside High Latitude Geomagnetic Variations and Pulsations. *Geomagn. Aeron.* 59, 660–667. <https://doi.org/10.1134/S0016793219060070>
- Kopytenko, Y., Ismagilov, V., Hayakawa, M., Smirnova, N., Troyan, V., Peterson, T., 2001. Investigation of the ULF electromagnetic phenomena related to earthquakes: contemporary achievements and the perspectives. *Ann. Geophys.* 44. <https://doi.org/10.4401/ag-3599>
- Kopytenko, Yu. A., Matiashvili, T. G., Voronov, P. M., Kopytenko, E. A., Molchanov, O. A., 1993. Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 77, 85–95. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(93\)90035-8](https://doi.org/10.1016/0031-9201(93)90035-8)
- Li, M., Lu, J., Parrot, M., Tan, H., Chang, Y., Zhang, X., Wang, Y., 2013. Review of unprecedented ULF electromagnetic anomalous emissions possibly related to the Wenchuan MS = 8.0 earthquake, on 12 May 2008. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 279–286. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-279-2013>
- Li, M., Lu, J., Zhang, X., Shen, X., 2019. Indications of Ground-based Electromagnetic Observations to A Possible Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Electromagnetic Coupling before the 12 May 2008 Wenchuan MS 8.0 Earthquake. *Atmosphere* 10, 355. <https://doi.org/10.3390/atmos10070355>
- McPherron, R. L., 2005. Magnetic Pulsations: Their Sources and Relation to Solar Wind and Geomagnetic Activity. *Surv Geophys* 26, 545–592. <https://doi.org/10.1007/s10712-005-1758-7>

- Molchanov, O. A., Hayakawa, M., Rafalsky, V. A., 2011. Penetration Characteristics of Electromagnetic Emissions from an Underground Seismic Source into the Atmosphere, Ionosphere, and Magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 100, PP. 1691-1712. <https://doi.org/199510.1029/94JA02524>
- Nenovski, P., Chamati, M., Villante, U., Lauretis, M. D., Francia, P., 2013. Scaling characteristics of SEGMA magnetic field data around the Mw 6.3 Aquila earthquake. *Acta Geophys.* 61, 311-337. <https://doi.org/10.2478/s11600-012-0081-1>
- Peng, C.-K., Havlin, S., Stanley, H. E., Goldberger, A. L., 1995. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos* 5, 82. <https://doi.org/10.1063/1.166141>
- Prattes, G., Schwingenschuh, K., Eichelberger, H. U., Magnes, W., Boudjada, M., Stachel, M., Villante, M., Villante, U., Wesztergom, V., Nenovski, P., 2011. Ultra Low Frequency (ULF) European multi station magnetic field analysis before and during the 2009 earthquake at L'Aquila regarding regional geotechnical information. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 1959-1968. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1959-2011>
- Serita, A., Hattori, K., Yoshino, C., Hayakawa, M., Isezaki, N., 2005. Principal component analysis and singular spectrum analysis of ULF geomagnetic data associated with earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 5, 685-689. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-685-2005>
- Varotsos, P. A., Sarlis, N. V., Skordas, E. S., 2009. Detrended fluctuation analysis of the magnetic and electric field variations that precede rupture. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Non-linear Science* 19, 023114. <https://doi.org/10.1063/1.3130931>
- Varotsos, P. A., Sarlis, N. V., Skordas, E. S., 2003. Long-range correlations in the electric signals that precede rupture: Further investigations. *Phys. Rev. E* 67, 021109. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.67.021109>
- Zhang, X., Fidani, C., Huang, J., Shen, X., Zeren, Z., Qian, J., 2013. Burst increases of precipitating electrons recorded by the DEMETER satellite before strong earthquakes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 197-209. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-197-2013>

## **Наблюдения в ULF спектъра на земното магнитно поле в Панагюрище, България, като инструмент за изследване на системата магнитосфера-йоносфера-литосфера**

М. Шамати

**Резюме.** В геомагнитна обсерватория „Панагюрище“, като част от магнитометричната мрежа SEGMA (South European Geomagnetic Array), от 2003 година оперира трикомпонентен индукционен магнитометър – единствен по рода си у нас. Тази система регистрира вариациите на земното магнитно поле в ULF спектъра и предоставя полезна информация за динамичните процеси в магнитосферата на Земята, микропулсации, флукутации, геомагнини бури и специфични магнитосферни-йоносферни-литосферни събития. Получени са резултати, свързани с три геомагнитни бури за периода 2017-2018 година, които отразяват локалните смущения в геомагнитното поле. Представени са динамичните спектри в ULF диапазон за всяко едно събитие и са определени времевите скали на смущенията.

## ГЕОМАГНИТНО ПОЛЕ, ГЕОМАГНИТНИ ИЗМЕРВАНИЯ И МОДЕЛИ, КАРТОГРАФИРАНЕ НА ПОЛЕТО

*Иван Бъчваров*

Департамент Геофизика, Национален институт по геофизика, геодезия и география на БАН,  
ул. Акад. Георги Бончев, бл. 3, София 1113, [ivan.buchvarov@yahoo.com](mailto:ivan.buchvarov@yahoo.com)

DOI: 10.34975/bgj-2020.43.9

**Резюме.** Дадено е кратко описание на земното магнитно поле (ЗМП). Описан е процесът на обработката на измерените на полето стойности до нанасянето им върху топографската основа. Направен е обзор на геомагнитните измервания в страната, както и изчислените модели на ЗМП в течение на годините, и е дадена кратка характеристика на изменението на деклинацията на територията на България.

**Ключови думи:** ГМО Панагюрище, геомагнитно поле, геомагнитни измервания, деклинация, България.

### Земно магнитно поле

*Земното магнитно поле* (ЗМП) или още *геомагнитното поле*, измерено върху земната повърхност и околното пространство се поражда от два източника: 1) вътрешен – от електрически токове, протичащи в течното ядро на Земята, т.н. „*магнитно динамо*“ и 2) външен – от електрически токове, протичащи в земната йоносфера, породени от взаимодействието на слънчевия вятър, състоящ се от различни елементарни частички, и магнитното поле на Слънцето и полето, пораждащо от магнитното динамо. Полето, произтичащо от вътрешността на Земята, се нарича условно „*постоянно земно магнитно поле*“ и представлява около 95% от общия интензитет на ЗМП. Полето, произтичащо от токовете в земната йоносфера, пак условно, се нарича „*променливо земно магнитно поле*“.

ЗМП е функция както на пространството, така и на времето. Постоянното ЗМП се изменя плавно във времето с периоди от порядъка на десетки, стотици и хиляди години, като това изменение в различни точки на земната повърхност е различно,

но за къси периоди от време (1 – 2 години) може да се приеме еднакво за територии от порядъка на нашата страна. Изменението му в пространството от точка в точка по земната повърхност в даден момент обаче може да бъде и много рязко.

Променливото ЗМП обратно – във времето то се изменя бързо, с периоди от порядъка на месеци до части от секундата, докато в пространството изменението му във времето, видът и стойностите на това изменение, обикновено остава почти едно и също за територии от порядъка на нашата страна. Основната вариация (период на изменение) е 1 денонощие (24 часа). Това е т.н. „*спокоен денонощен ход*“, дължащ се на слънчевия вятър при „*спокойно*“ Слънце. Вариациите с по-висока честота се появяват при засилена слънчева активност, при която се създават резки промени в слънчевия вятър, което от своя страна предизвиква в околоземното пространство и върху Земята т.н. „*геомагнитни бури*“ и други геомагнитни явления (Методиев и Трифонова, 2015).

ЗМП е векторно поле. Прието е векторът на това поле – *тоталният интензитет* – в дадена точка  $s$  от земната повърхност да се бележи със символа  $\vec{F}$ . Компонентите на  $\vec{F}$  са:  $X$  – лежаща в плоскостта на географския меридиан и тангенциалната плоскост (хоризонталната равнина) към земната повърхност, насочена на север,  $Y$  – лежаща в същата тангенциална плоскост, насочена на изток и  $Z$  – насочена към центъра на Земята. Освен тези компоненти са въведени още и следните величини на ЗМП:  $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$  – *хоризонтална компонента*, лежаща в хоризонталната равнина, посочена по-горе,  $I = \arctg(Z / H)$  – *инклинация* – ъгълът, сключен между хоризонталната равнина и  $\vec{F}$  и  $D = \arccos(X / H)$  – *деклинация* – ъгълът, сключен между плоскостта на географския меридиан и хоризонталната компонента  $H$ . Всички тези величини се наричат *елементи на земното магнитно поле*“ (ЕЗМП).

Съгласно казаното до тук, абсолютната моментна стойност на даден ЕЗМП, която общо за всички елементи ще означим със символа  $E_s(t)$ , в момент  $t$  в дадена точка от земната повърхност  $s$  може да се представи като сума от две компоненти (съставлящи) с формулата:

$$E_s(t) = \bar{E}_s(t) + \delta E_s(t), \quad (1)$$

където с  $\bar{E}_s(t)$  е означена постоянната съставляща на даден ЕЗМП в момент  $t$  в т.  $s$ , дължаща се на токовете от вътрешността на Земята, а с  $\delta E_s(t)$  – вариацията, наложена върху това поле от променливата съставляща на този ЕЗМП в същия момент  $t$  в същата т.  $s$ , дължаща се на токовете в йоносферата..

## Геомагнитни измервания и модели

### Генерална геомагнитна снимка

При някои изследвания на геомагнитното поле, а и за решаването на различни приложни задачи, е необходимо да се изчертават (построяват) карти на постоянната съставляща  $\bar{E}_s(t)$  на даден ЕЗМП върху определени участъци от зем-



ната повърхност за фиксиран момент, който ще означим с  $t_0$ , наречен „*епоха*“. Директно тази съставляща не може да се измери. След много теоретични и експериментални изследвания обаче е установено, че с много голяма точност тя е равна на т.н. „*средногодишна стойност*“, която ще означим със същия символ  $\bar{E}_s(t)$ , на дадения ЕЗМП.

Под „*средногодишна стойност*“ се разбира осреднената стойност на ЕЗМП за 1 година, центрирана към средата на интервала за осредняване:

$$\bar{E}_s(t_0) = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{T}{2}}^{t_0 + \frac{T}{2}} E_s(\tau) d\tau, \quad (1)$$

където  $T = 1$  година, а  $t_0$  е средата на периода на осредняване.  $E_s(\tau)$  и  $\bar{E}_s(t_0)$  са дефинирани горе.

На практика изчисляването на  $\bar{E}_s(t_0)$  става, като предварително изчислени „*средночасови стойности*“ на дадения ЕЗМП се осреднят за определената година. Това може да се направи само в геомагнитна обсерватория, където има непрекъснати наблюдения и записи на стойностите на ЕЗМП.

Прието е картите на средногодишните стойности на даден ЕЗМП да се построяват за години, кратни на 5 – например 1995, 2000 и т.н., като стойностите се центрират към 1 юли на съответната година, т.е. средногодишната стойност е получена при осредняване на стойностите на този ЕЗМП за времето (интервала) от 01.01. до 31.12. на тази година – епоха. Върху картите обикновено се изписва текстът (например за деклинацията): „**Деклинация на ЗМП на територията на Р. България, епоха 1990.5**“. Точката и петицата след годината означават, че средногодишните стойности са центрирани към 01.07.1990 г. В някои случаи средногодишните стойности на ЕЗМП се изчисляват и за интервала от 01.07 предната година до 31.06 на годината – епоха. Тогава текстът върху картата е (например) „**Деклинация на ЗМП на територията на Р. България, епоха 1990.0**“, като нулата след годината означава, че средногодишните стойности са центрирани към 01.01.1990 г.

Описаните горе карти на ЕЗМП за определена епоха се изработват, като обикновено екипи от дадена геомагнитна обсерватория провежда полеви измервания (снимка) върху набелязаната за картографиране територия. Такава снимка ще наречем „*генерална геомагнитна снимка*“. Понеже в отделните точки на измерване се разполага със стойност на даден ЕЗМП само в един момент  $t$  (моментът на измерването), за да се определи средногодишната стойност за избраната епоха  $t_0$  в тези точки, се използват данни от близка до картографирувания участък геомагнитна обсерватория, където са известни и средногодишната стойност на елемента за епохата на картата, и стойността му в момента на измерването. За удобство такава обсерватория по-нататък ще наричаме „*референтна*“. У нас като референтна се ползва Геомагнитна обсерватория – Панагюрище (ГМО Панагюрище).



Измерените в момента  $t$  стойности се „привеждат“ към епоха по следната формула:

$$\bar{E}_s(t_0) = \bar{E}_o(t_0) - E_o(t) + E_s(t), \quad (2)$$

където  $\bar{E}_s(t_0)$  и  $\bar{E}_o(t_0)$  са съответно търсената средногодишна стойност на измервания в т.  $s$  елемент на ЗМП и в обсерваторията, по която се привеждат измерванията, в момент  $t_0$  (епохата), а  $E_s(t)$  и  $E_o(t)$  – измереният елемент в т.  $s$  и в обсерваторията в момент  $t$  (Бъчваров и Чолаков, 1994).

Предпоставка да се използва тази формула е, че изменението на постоянно-геомагнитно поле за къси периоди от време (1 – 2 години) за големи територии остава почти едно и също, както и фактът, че изменението на променливото геомагнитно поле също за големи територии също е еднакво, както споменахме по-горе.

След като средногодишните стойности на дадения ЕЗМП са изчислени по горната формула, самото изчертаване на картата става по избран от картографа метод. За удобство по-нататък тези карти ще наричаме „основни“.

### **Секуларни измервания, актуализиране на основните карти**

Организирането и провеждането на „генерална геомагнитна снимка“ даже с модерната в момента апаратура и за територия, малка като нашата страна, освен че е скъпо мероприятие, отнема и много време. Поради това, за поддържането на картите на ЕЗМП актуални, понеже, както казахме, геомагнитното поле се изменя във времето, през определени периоди (обикновено 5 години) се провеждат измервания върху малък, но достатъчен, брой точки по земната повърхност, наречени „секуларни станции“ (на английски „repeat stations“), съвпадащи с точки от мрежата на генералната геомагнитна снимка. Подборът на секуларните станции се прави така, че те да покриват равномерно картографираната територия и гъстотата им да бъде такава, че в общи линии да отразяват поведението на полето там. Самите измервания се наричат „секуларни измервания“. Те се привеждат към годината на провеждане на измерванията пак по формула (2), като за епоха вместо  $t_0$  се поставя годината на секуларните измервания, която ще отбележим с  $t_{sm}$ :

$$\bar{E}_{sec}(t_{sm}) = \bar{E}_o(t_{sm}) - E_o(t) + E_{sec}(t), \quad (3)$$

където  $\bar{E}_{sec}(t_{sm})$  е търсената средногодишна стойност в секуларната станция  $sec$  за епохата  $t_{sm}$ ,  $\bar{E}_o(t_{sm})$  е средногодишната стойност в референтната обсерватория за епохата  $t_{sm}$ ,  $E_o(t)$  е моментната стойност на ЕЗМП в обсерваторията в момента на измерване  $t$ , а  $E_{sec}(t)$  е моментната стойност на ЕЗМП в секуларната станция в същия момент.

По данните от измерванията в секуларните станции се определят годишните изменения (вариации) на средногодишните стойности на дадения ЕЗМП в тях:

$$\Delta \bar{E}_{sec} = [\bar{E}_{sec}(t_{sm}) - \bar{E}_{sec}(t_0)] / \Delta t_{sm}, \quad (4)$$

където  $\Delta \bar{E}_{sec}$  е търсената годишна вариация (изменението за една година) на средногодишните стойности на дадения ЕЗМП в секуларната станция,  $\bar{E}_{sec}(t_{sm})$  е средногодишната стойност в секуларната станция за епохата на провеждане на секуларните измервания  $t_{sm}$ ,  $\bar{E}_{sec}(t_0)$  е средногодишната стойност за епохата на основната карта на ЕЗМП в секуларната станция, а  $\Delta t_{sm} = t_{sm} - t_0$  е броят години, изминали между епохата на основната карта  $t_0$  и епохата на секуларните измервания  $t_{sm}$ .

По изчислените годишни вариации  $\Delta \bar{E}_{sec}$  на средногодишните стойности се построяват карти за картографираната територия на т.н. „изопори“ – пространственото разпределение на годишните вариации на ЕЗМП върху нея.

За привеждането на данните от епохата на основните геомагнитни карти в епохата на секуларните измервания за точките от земната повърхност, различни от точките на секуларните измервания, се използват картите с изопорите, като то се извършва по формулата:

$$\bar{E}_s(t_{sm}) = \bar{E}_s(t_0) + \Delta t_{sm} \Delta \bar{E}_s \quad (5)$$

където  $\bar{E}_s(t_{sm})$  е търсената средногодишна стойност за епохата  $t_{sm}$  в т.  $s$ ,  $\bar{E}_s(t_0)$  е стойността, отчетена от картата епоха  $t_0$  (основната карта) в тази т.  $s$ , а  $\Delta \bar{E}_s$  е отчетената от картата с изопорите стойност на годишната вариация на дадения ЕЗМП в същата точка.  $\Delta t_{sm}$  е дефинирано горе. За точките от земната повърхност, които не попадат върху някоя изопора, стойността на  $\Delta \bar{E}_s$  обикновено се определя чрез линейна интерполация от картата с изопорите.

Ще отбележим, че горната формула може с достатъчно голяма точност да се използва за моменти, близки до  $t_{sm}$  (от порядъка на няколко години), като вместо  $\Delta t_{sm}$  се постави интервалът от време (броят години), изминал от епохата на основната карта до желанния момент.

## Обзор на геомагнитните измервания в България

### Геомагнитни снимки

Първите геомагнитни измервания на територията на България са проведени по време на Руско – турските войни: 1787–1791 и 1828–1832 г. (Костов и Ножаров, 1987). Измерена е само деклинацията  $D$ . По-късно, през 1858 г., д-р Крайл, директор на Централната метеорологична и магнитна служба във Виена, извършва няколко измервания на  $D$ ,  $H$  и  $Z$ . През 90-те години на 19 в. професорът от руски произход Бахметьев, работещ в Софийския университет, измерва вариациите на  $D$  около София, Петрохан и Берковица, а през 1911 г. специалисти от Института Карнеги правят измервания на  $D$ ,  $H$  и  $I$  около София, Бургас, Нова Загора и Пловдив.

Първите геомагнитни измервания на територията на нашата страна, имащи характер на генерална геомагнитна снимка, са извършени от проф. Кирил Попов през 1917–1920 г. Върху 76 точки от земната повърхнина са измерени ЕЗМП: деклинация  $D$ , хоризонтален интензитет  $H$  и инклинация  $I$ . Измерванията са редуцирани към епоха 1921.0 чрез Магнитна обсерватория Пола на Адриатическото крайбрежие (Бъчваров и др., 1984).

Следващите измервания са извършени от Христо Калфин в периода 1937–1947 г. Деклинацията  $D$  е измерена в 750 точки, а измерванията са редуцирани към епоха 1940.0 по данните на МО Панагюрище.

От 1958 до 1961 г. под ръководството на К. Костов са измерени отново  $D$ ,  $H$  и  $I$  в 342 точки от земната повърхност. Малко по-късно, през 1968 и 1969 г., южно от  $\varphi=42^{\circ}40'$  са измерени още 104 точки, за да се уточнят локалните геомагнитни аномалии в южните райони на страната. Измерванията са редуцирани по МО Панагюрище и секуларната мрежа към епохи: 1960.0, 1965.0 и 1970.0.

Последната генерална геомагнитна снимка на България е направена в периода 1978–1980 год. от екип на ГМО – Панагюрище и Военно-географската служба към Министерството на отбраната. Върху 473 равномерно разпределени станции, най-общо съвпадащи с геодезически точки от Държавната геодезическа мрежа на България и от Геодезическата мрежа с местно предназначение, са измерени геомагнитните елементи: тотален интензитет  $F$ , деклинация  $D$  и хоризонтален интензитет  $H$ . Използвани са магнитен теодолит „Schulze-545“, три QHM и два протонни магнитометъра РМР-2А. Всяка от станциите е изследвана за наличие на локални смутители. На свободните от смутители станции са правени по една серия измервания, включваща две измервания на деклинацията от двама наблюдатели, три измервания на хоризонталния интензитет с трите QHM и две измервания на тоталния интензитет – с двата протонни магнитометъра. През 1980 год. са измерени само секуларните и станциите I-ви клас. Те са използвани за привеждане на измерванията от 1978 и 1979 год. в епоха 1980.0.

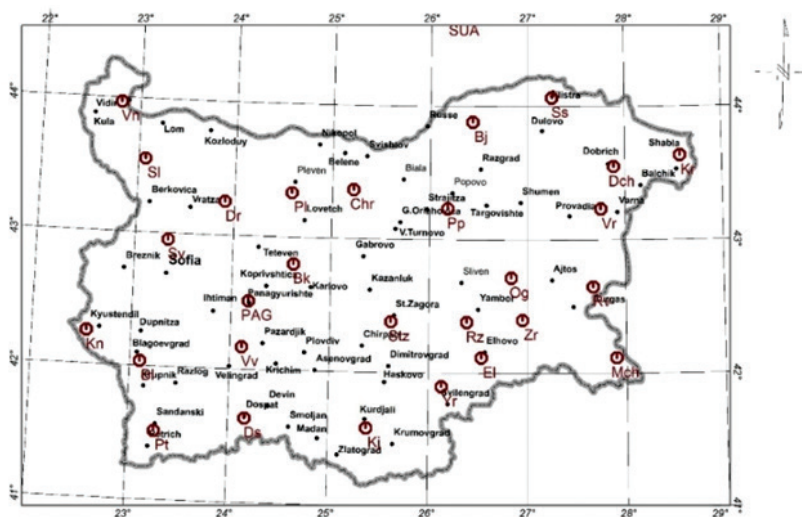
През 2018 година Военно-географската служба на Министерство на отбраната в сътрудничество със специалисти от Геомагнитната служба на НИГГГ-БАН започна нова генерална геомагнитна снимка на територията на България. Страната е разделена на четири части и всяка година се измерва по една от тях. Полевите измервания се обработват по данни на ГМО Панагюрище и се привеждат към годината на измерване (Трифенова, Методиев и Бъчваров, 2019).

### **Секуларни измервания**

Секуларната геомагнитна мрежа в България се създава през 1934 година и понастоящем се състои от 27 точки, разположението на които е показано на Фиг. 1 (Методиев и Трифенова, 20156)

– Секуларни измервания 1990 год.

През 1990 год. са проведени измервания върху 13 секуларни станции и 9 станции I-ви клас, като тези измервания са извършени с апаратурата, използвана и през



**Фиг. 1.** Разположение на секуларните станции на територията на България

последната генерална снимка 1978–1980 год. Ориентирането на станиците е извършено само по геодезичен път с използване на координатите от геодезични точки от Държавната геодезична мрежа на България.

Данните от проведените измервания на елементите на геомагнитното поле на територията на България за епоха 1990.0 са събрани в каталог.

– Секуларни измервания 2007–2012 год.

През периода 2007–2012 год. е извършено обследване и преизмерване на секуларните и първокласни станции от геомагнитната мрежа на България. При изпълнението на задачата е установено, че част от станциите са унищожени или около тях магнитното поле е смутено, вследствие наличие на изкуствени смутители, някои станции от секуларната мрежа, техните резервни и станциите I-ви клас. В процеса на работа са избрани нови такива на подходящи места, като съответно на тях са извършени и измерванията на елементите на земното магнитно поле.

С резултатите от последните секуларни измервания е направен модел на секуларните вариации на деклинацията за целите на използването ѝ при съставянето на регионалните топографски карти (Методиев, 2014).

## Геомагнитни модели

Най-общо, моделите на геомагнитното поле се разделят на глобални и регионални. Публикуваните глобални модели използват различни стратегии. Най-често се разчита на сферичния хармоничен анализ с моделиране на всички налични данни или чрез моделиране на източниците поотделно. Независимо от това, кой от

начините е предпочетен, стотиците километри между сателитите в ниска орбита и кристалинните източници водят до замъгляващ ефект. По този начин, един сателит, летящ на 350 км. височина може да даде хоризонтална разделителна способност от не-повече от 350 км. На обратно, гъстите наземни и аеромагнитни данни са близки до източниците и осигуряват разделителна способност в рамките на няколко километра. За съжаление обаче, те страдат от неравномерно разпределение на точките по земната повърхност, което налага интерполация и използване на синтетични данни, и съответно привнасяне на грешни честотни сигнали и артефакти.

Тези проблеми се преодоляват частично с регионалните модели, които са предназначени за обработка на гъсти мрежи от данни на различни височини. Глобални модели са разработвани и в миналото, но единствено след 1980 г., когато се получават данните от сателитната мисия MAGSAT става възможно удовлетворяването на уравнението на Лаплас. Те се базират на сферични сплайнове, wavelets или други типове локални сферични функции.

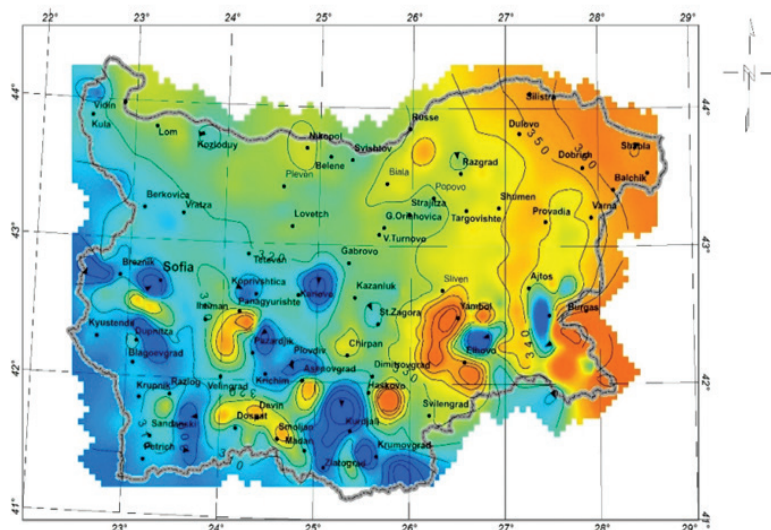
Обикновено, регионалните модели се базират на по-голям набор и количество от данни, за съответния регион, в сравнение с глобалните модели и поради тази причина са по-точни (Мандеа и Корте, 2010). В допълнение, регионалните модели са способни да представят дължини на вълните, по-къси от тези на глобалните модели, с което изобразяват не само източниците в ядрото, но и по-големи смутители в кората.

Различните методи за описване на полето могат да се класифицират най-общо като графични и аналитични. Графичните методи могат да бъдат ръчно начертани или цифрови карти, докато аналитичните методи се базират на площни полиноми, метод на еквивалентен диполен източник, както и на математически разложения като например анализа по сферични хармоници. Често, след като бъде създаден аналитичен модел се създава вторичен модел под формата на контурна карта. Вторичният модел в много от случаите се явява и краен резултат, като аналитичния модел бива използван само като средство за достигане до този краен резултат.

Първите модели на геомагнитното поле за територията на България са направени за епохи 1960.0, 1965.0, 1970.0 (Бъчваров и Костов, 1981) и 1980.0 (Бъчваров и Чолаков, 1980). Благодарение на това, са направени и редица анализи на аномалното поле за територията на страната (като напр. Бъчваров & Чолаков, 1995), които служат за отделяне и интерпретация на основните структурно-тектонски единици в строежа на земната кора.

Последният аналитичен модел на ЕЗМП на територията на страната е направен за епоха 2015.0 посредством моделиране на полето с полином от втора степен на географските координати (Методиев и Трифонова, 2017). Няколко години след това този модел е актуализиран с помощта на изопорни карти от секуларните измервания и е съставен възможно най-актуален модел на ЕЗМП – за епоха 2020.0 (Методиев и Трифонова, 2020). На фиг. 2 е показано пространственото изменение на деклинацията за територията на страната, съгласно получените моделни стойности за 2020.0.

Характерни места с големи магнитни аномалии, са териториите на Рило-Родопския масив, Витоша, Манастирските възвишения, около гр. Бургас и др. (Методиев и Трифонова, 2016).



Фиг. 2. Модел на деклинацията –  $D$  на територията на България за епоха 2020.0 (Методиев и Трифонова, 2020).

## Картографиране на земното магнитно поле

Картите на средногодишните стойности на деклинацията –  $\bar{D}$  – у нас е прието да се изработват в М 1 : 200 000. До епоха 1990.0 те бяха изчертавани само на ръка, а след това вече и с помощта на персонален компютър.

Върху картния лист с елементарна топографска основа са нанесени изолиниите на  $\bar{D}$  които в случая се наричат „изогони“. Геомагнитното поле в Северна България е спокойно и там изолиниите се изменят плавно. В Южна България обаче, поради многото магмени скали на повърхността на Земята, особено в планините, то е смутено. По тази причина в много райони не е възможно да бъдат прекарани изолинии.

Стандартният начин за прилагане на картата на средногодишните стойности на деклинацията върху топографските картни листове, при положение, че се ползва карта, центрирана към 01.01 за съответната епоха, е, както следва:

В **рамковото поле** на картния лист се дава формулата, по която се пресмята моментната стойност на деклинацията  $D_s(t)$ :

$$D_s(t) = \bar{D}_s(y_{t_0}) + (\Delta_{y_t} + \Delta_{m_t}/12) \Delta D_s + V(m_t, h), \quad (4)$$

където

$\bar{D}_s(y_{t_0})$  е средногодишната стойност на деклинацията, отчетена от картата за съответната епоха, **поставена като число в рамковото поле**;

$\Delta_{y_t} = y_t - y_{t_0}$ , където  $y_t$  е годината, в която се търси моментната стойност, а  $y_{t_0}$  е годината на епохата на картата (**дадено**);

$\Delta_{m_t} = m_t$ , където  $m_t$  е номерът на месеца за годината  $y_t$ , в която се търси моментната стойност, при положение че е центрирана към 01.01 на съответната година (напр. 1990.0);

$\Delta D_s$  е ъгловият коефициент на екстраполиращата линейна функция, също **поставен като число в рамковото поле** в ,/год. (минути на година; взет е от картата с изопорите);

$V(m_t, h)$  се взима от Табл. 1. в минути, която също е **поставена в рамковото поле**.

### Пример:

Нека картата на средногодишните стойности на деклинацията да е за епоха 2010.0 и нека стойността за дадения картен лист да е  $4^{\circ}43' = 283'$ . Нека също ъгловият коефициент на екстраполиращата линейна функция е  $2.3'/\text{год.}$  и моментът, за който търсим абсолютната стойност на деклинацията, да е май 2015 г. Нека часът да е 14.

**Тогава:**

$$\bar{D}_s(t_0) = 283';$$

$$\Delta_{y_t} = y_t - y_{t_0} = 2015 - 2010 = 5 \text{ год.};$$

$$\Delta_{m_t} / 12 = m_t / 12 = 5 / 12 = 0.42 \text{ год. (основната карта е центрирана към 01.01.2010);}$$

$$\Delta D_s = 2.3' / \text{год.};$$

$$V(5.14) = 3.5'$$

и за  $D_s(t)$  получаваме:

$$D_s(2015 \text{ г., месец май, 14 ч.}) = 283 + (5 + 0.42) \times 2.3 + 3.5 = 300' = 5^{\circ}00'$$

**Таблица 1.** Осреднени денонощни разлики в Геомагнитна обсерватория – Панагюрище. Размерността на вариацията е в минути [.]

мес. час.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1-2	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
2-3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
3-4	0	0	0	1	2	2	2	2	1	0	0	0
4-5	-1	0	0	2	4	4	4	3	2	0	-1	0
5-6	0	0	1	3	4	5	4	4	3	1	0	0



6-7	0	1	2	4	4	5	5	5	4	2	1	0
7-8	1	2	3	4	3	4	4	4	3	3	2	1
8-9	1	1	3	3	1	2	2	1	1	2	2	1
9-10	0	0	0	0	-2	-1	-1	-2	-2	0	0	0
10-11	-1	-1	-2	-3	-4	-3	-3	-4	-3	-2	-2	-1
11-12	-2	-2	-4	-5	-5	-4	-4	-5	-4	-4	-3	-2
12-13	-2	-2	-4	-5	-5	-5	-5	-5	-4	-4	-2	-1
13-14	-1	-2	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-2	-1
14-15	-1	-1	-2	-3	-3	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1
15-16	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1
16-17	0	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	0	0
17-18	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0
18-19	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	1	1
19-20	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
20-21	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	2	1
21-22	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	2	2
22-23	1	2	1	1	1	0	0	1	1	1	2	1
23-24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

## Литература

- Костов К. и П. Нождаров, 1987. Абсолютни магнитни измервания в България 1787–1997, София.
- Мандеа М., Корте М. (ред.), 2010. Геомагнитни наблюдения и модели, IAGA Special Sopron Book Series 5, Springer (на англ. ез).
- Бъчваров, И. & Костов, К., 1981. Представяне на геомагнитното поле в България епоха 1960.0, 1965.0, 1970.0 с полином от втора степен на географските координати. Бълг. геоф. сп., Том VII, pp. 51–62 (на руски ез.)
- Бъчваров, И., Костов К., Чолаков И., Георгиев Х. и Чекърджиков Л. и др. Изводи за точността на абсолютните геомагнитни снимки на територията на НРБ, проведени през 1958 – 1961 г. и 1978 – 1980 г. Бълг. геоф. сп., том X, 3, 1984, 117–125.
- Бъчваров, И. & Чолаков, И., 1980. Нормално геомагнитно поле на територията на България – 1980.0. Бълг. геоф. сп., Том XVII, pp. 77–88.
- Бъчваров, И., Ил. Чолаков 1994. Геомагнитно поле на територията на България – епоха 1990.0. Бълг. геоф. сп., XX, 4, 58–65.
- Бъчваров, И. & Чолаков, И., 1995. Аномално геомагнитно поле на територията на България – 1980.0., Бълг. геоф. сп., Том XXI, pp. 59–72.
- Методиев, М., 2014. Моделиране на секуларната вариация на деклинацията за целите на регионалното топографско картографиране, Бълг. геоф. сп., том 40, стр. 76–84 (на англ. ез).



- Методиев М., П. Трифонова, 2015а. Геомагнитна активност за последния слънчев цикъл, записан в обсерватория Панагюрище, Сборник от 7-ма Национална геофизична конференция, София, 2015 г. (на англ. ез).  
[http://www.bggg.eu/Conferencia\\_2015/SESSIONS\\_pdf/Session%201%20-%20Geophysics%20of%20the%20Earth%20Interior/S1-P3.pdf](http://www.bggg.eu/Conferencia_2015/SESSIONS_pdf/Session%201%20-%20Geophysics%20of%20the%20Earth%20Interior/S1-P3.pdf)
- Методиев, М., П. Трифонова, 2015б. Декомпозиране на данни от геомагнитни секуларни станции за България, Сборник на 26-та асамблея на IUGG), Прага, Чехия (на англ. ез.).
- Методиев, М., П. Трифонова, (2016). Геофизичен анализ на региона на Източните Родопи, Доклади на БАН том 69, № 5, 615–621.
- Методиев, М. и Трифонова, П., 2017. Българско геомагнитно референтно поле (BulGRF) за 2015 .0 и модел за прогнозиране на секуларните вариации до 2020 г., *Annales Geophysicae*, 35, 5, стр. 1085–1092, DOI 10.5194 / angeo-35-1085-2017 (на англ. ез).
- Методиев, М., Трифонова П. 2020. Стойности на елементите на Земното магнитно поле на българската територия за епоха 2020.0. Сборник с доклади на SGEM, 20, 1.2, 2020, ISSN: 1314-2704, DOI: 10.5593 / sgem2020 / 1.2 / s05.069, 543-550 (на англ. ез).
- Трифонова, П., Методиев, М. и Бъчваров, И. 2019. Цифрови записи на данни от геомагнитната обсерватория Панагюрище - налични за период от 60 години. Бълг. геоф. сп., том 42, стр. 46-61. <https://doi.org/10.34975/BGJ-2019.42.5> (на англ. ез).

## **GEOMAGNETIC FIELD, GEOMAGNETIC MEASUREMENTS AND MODELS, FIELD MAPPING**

Ivan Buchvarov

**Abstract:** A brief description of the Earth's magnetic field (EMS) is given. The process of processing of the values measured in the field until their application on the topographic base is described. An overview of the geomagnetic measurements in the country is made, as well as the calculated models of EMS over the years and a brief description of the declination on the territory of Bulgaria is given.

## ОЦЕНКА ОГНИЩНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ ОТ РОЕВ ТИП

*Пл. Райкова*

Национален институт по геофизика, геодезия и география – БАН, София 1113, ул. Акад.  
Г. Бончев, бл. 3; [plamena.raikova@gmail](mailto:plamena.raikova@gmail)

DOI: 10.34975/bgj-2020.43.10

**Резюме:** Спектралният анализ на сеизмичните вълни е един от основните източници на информация за земетресенията. Представени са спектрите на Р- и S-вълни за земетресения от роев тип: поредицата от месец април 2009 година в района на град Кърджали, и поредица реализирана през 2014 г., в близост до град Пловдив. Проведеното изследване се основава на цифрови данни от Българската сеизмологична мрежа - НОТССИ. Генерирани са спектри по преместване за Р- и S- вълни, с цел да се определят някои от параметрите на сеизмичния източник, като сеизмичен момент, свалено напрежение и радиус на източника. Оценката на огнищните параметри е базирана на модела на Brune. Определени са параметрите на 10 земетресения: 5 от събитията от поредицата в района на град Кърджали и 5 от събитията от поредицата в района на град Пловдив, с магнитуд в интервала  $2.7 \div 4.1$ . Получените стойности за свалено напрежение са в рамките на очаквания диапазон. При поредицата от 2009 г. се наблюдават по ниски стойности на свалено напрежение, в сравнение с поредицата от 2014 г.

**Ключови думи:** роев тип сеизмичност, свалено напрежение, радиус на източника, сеизмичен момент

## Въведение

Земетресението е уникално природно явление, определящо се от голям брой фактори, които не могат да бъдат непосредствено наблюдавани и трудно се контролират. За сеизмично застрашените области (каквато е и територията на България) земетресенията са неделима част от околната среда. Няма друго природно явление с така силно изявен дуализъм, каквото е земетресението – изключително полезно

за изучаване на планетата Земя (сеизмичните вълни, породени от земетресенията са източник на информация за вътрешния строеж на Земята) и катастрофално от социално - икономическа гледна точка.

Ефектите от земетресенията са функция на редица фактори, вариращи в широки граници, които могат да бъдат адекватно моделирани въз основа на физически съображения и налични сеизмологични наблюдения.

Сеизмологичните данни добре се описват с Поасонов процес, ако от тях се изключат поредиците от земетресения - сеизмичните клъстери. Поасоновото разпределение, като модел на сеизмичния процес, не отчита възможността земетресенията да се генерират в групи. Такива групи (или клъстери) от земетресения са фор-афтершоковите поредици и роевата сеизмичност (сеизмични роеве).

Фор-афтершоковите и роевете поредици представляват основна част от процеса на генериране на земетресения, поради което те са често третиран проблем в сеизмологичните изследвания. В много изследвания е доказано, че ако не се отчита наличието на поредиците, оказващи съществено влияние върху разпределението на земетресенията в пространство и времето, може да се достигне до некоректни резултати и изводи за сеизмичния процес.

Форшоковите събития са група земетресения, предхождащи по-силното главно събитие. Ако този клъстер може да бъде разпознат преди да се реализира главно-то земетресение, то тази група би се превърнала в полезен инструмент за прогнозиране на силни земетресения.

Афтершоковите поредици са тези групи от земетресения, които се реализират непосредствено след главното събитие и постепенно затихват във времето. Една от феноменалните характеристики на афтершоковия процес е намаляване на броя афтершоците във времето по обратен степенен закон, докато повечето от физичните процеси затихват експоненциално във времето.

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

Изучаването на пространствено-времево и енергийно разпределение на земетресенията е основен аспект от съвременните сеизмологични изследвания.

Друг аспект, свързан със сеизмологичните изследвания, е спектралният анализ на сеизмичните вълни. Спектралният анализ на сеизмичните вълни е основен източник на информация за земетръсното огнище и средата на разпространение. Спектърът на сеизмичните вълни може да се използва за оценка на параметрите на сеизмичния източник. За изследване спектралните характеристики на земетресенията най-често се използва моделът на Brune (Brune, 1970).

В настоящото изследване са генерирани спектри на Р и S-вълни и са оценени огнищните параметри на събитията от два сеизмични роя. Единият, продължил по-малко от месец, е наблюдаван през април 2009 година в района на град Кърджа-

ли, който е част от сеизмогенна зона Източни Родопи. Втората поредица е реализирана през месеците януари-февруари 2014 г., в близост до град Пловдив, който е част от сеизмогенна зона Марица.

## Методика и входни данни

В настоящото изследване са оценени чрез спектрален анализ основни параметри на сеизмичния източник такива като: сеизмичен момент ( $M_0$ ), свалено напрежение ( $\Delta\sigma$ ) и радиус на източника ( $r$ )

Сеизмичният момент  $M_0$  (измерващ се в  $\text{N}\cdot\text{m}$ ) е величина, която обединява площта на разкъсване и остатъчното преместване по разлома с якостните свойства на средата, и се определя: чрез релацията:

$$M_0 = \mu SD, \quad (1)$$

където  $\mu$  (в Па) е модула на срязване (твърдостта),  $S$  е площ на разломната повърхнина, по която е станало преместването (измерваща се в  $\text{m}^2$ ) и  $D$  е относителното преместване по разломната повърхнина (в  $\text{m}$ ). Сеизмичният момент може да се определи чрез инверсия на тензора на момента или чрез спектрален анализ на сеизмичните вълни. Този параметър е надеждна оценка на размера на земетресението и се използва за определяне на магнитуд по сеизмичен момент  $M_w$ .

Сваленото напрежение (stress drop) е разликата между първоначалната и крайната стойност на напрежението в средата. Сваленото напрежение е свързано с енергията освободена при реализацията на земетресение, основно със сеизмичния момент, а от там с магнитуда на земетресението (Frankel, 2009). Вариации в стойността на сваленото напрежение се наблюдават, поради различните физични свойства на средата, и дълбочината на сеизмичния източник. Наблюдаваните стойности на този параметър, при по силните земетресения, са между 10 – 100 бара или от 1-10 МПа (Kanamori and Anderson, 1975; Kanamori and Brodsky, 2004). За земетресения в близост до границите на плочите (междуплочевни събития) средните стойности на този параметър са по-ниски, отколкото при тези в континенталните части - вътрешноплочевни събития, каквито са земетресенията, генерирани на територията на България (e.g., Kanamori and Anderson, 1975; Kanamori and Allen, 1986). Средната стойност на сваленото напрежение е около 3МПа за междуплочевни земетресения и около 6МПа за вътрешноплочевни земетресения (Allmann and Shearer, 2007).

Сваленото напрежение се определя по формулата (Eshelby, 1957):

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{r^3}, \quad (2)$$

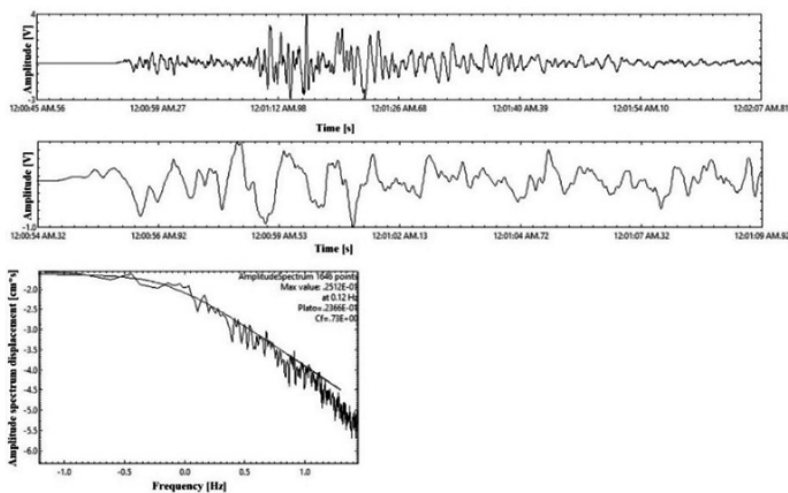
където  $\Delta\sigma$  е средният stress drop (в bars),  $M_0$  е сеизмичния момент и  $r$  е радиусът на разломната повърхност (в  $\text{m}$  или  $\text{km}$ ).

Радиусът  $r$  е свързан с ъгловата честота  $f_c$  (основен параметър, свързан със спектрите, генерирани от сеизмичен или експлозивен източник (Hanks and Wyss, 1972)), оценена от спектъра на съответната вълна. Този параметър се представя с формулата:

$$r = \frac{k\beta}{f_c}, \quad (3)$$

където  $r$  е радиусът на разлома (в m или km),  $f_c$  е наблюдаваната ъглова честота (в Hz), а  $k$  е константа, която зависи от конкретния теоретичен модел.

За да се определят параметрите на земетресението, е необходимо да се трансформира сеизмичния сигнал. За преобразуването на амплитудно-времеви сигнал в амплитудно-честотен се използва бързо преобразуване на Фурие (FFT). Фиг. 1 илюстрира преобразуването на амплитудно-времеви сигнал в амплитудно-честотен с цел генериране на спектър по преместване. На фигурата е представен: а) запис на земетресение на вертикалната компонента на станция Витоша (VTS) за определен времеви интервал; б) конкретен времеви интервал, за който ще се генерира спектър по преместване; в) спектър на преместване на Р-вълна.



Фиг. 1. Пример за спектър по преместване на Р-вълна.

Амплитудата на сеизмичния импулс в идеално еластична среда се контролира от отражението и преноса на енергия през различни граници. Известно е, че Земята не е идеално еластична и вълните затихват с времето и разстоянието. Амплитудите на сеизмичните вълни търпят промени и затова, че те преминават през различните слоеве на земята. Когато фронтът на вълната се движи от източника навън, първоначалната енергия, освободена при земетресението се разпрос-

тира на по-голяма площ и по този начин интензивността на вълната намалява с увеличаване на разстоянието. Процеси, свързани с преразпределението и загуба на енергия при разпространението на вълните са: геометричният спрединг, затихването - качествен фактор  $Q$ , насоченост на излъчването, както и затихване в близост до повърхността -  $\kappa$ .

При разглеждането на спектрите по премествене на сеизмичните вълни са направени корекции за някои от тези параметри. Като за качествения фактор е заложена стойност  $Q = 400$  (Malagnini et al., 2000), а за затихването в близост до повърхността е  $\kappa = 0.035$  (Margaris and Boore, 1998).

В настоящото изследване са генерирани спектрите по Р- и S- вълни. За всяко събитие са използвани входни данни от минимум пет станции, а за всяка станция са направени спектри по Z, N, E компоненти. Сигналите, които са разгледани в изследването са калибрирани според съответния прибор във всяка станция. Стойностите на параметрите, характеризиращи огнището са получени чрез математичния апарат, представен по долу.

От получените спектри се определят ъгловата честота ( $f_0$ ) и нискочестотното спектрално ниво ( $\Omega_0$ ).

Сеизмичният момент по спектъра на Р-вълната ( $M_{0p}$ ) се определя по следената формула:

$$M_{0p} = \frac{\rho \cdot 4\pi \cdot \Omega_p \cdot R \cdot v_p^2}{R_{\theta\varphi}(P)}, \quad (4)$$

където  $M_{0p}$  е сеизмичният момент за Р-вълната (в  $N \cdot m$ ),  $\rho$  – плътността на средата (в  $kg/m^3$ ),  $\Omega_p$  – ниво на платото (в  $nm^2/s$ ), определено чрез спектъра на вълната,  $v_p$  – скоростта на вълната (km/s),  $R$  – хипоцентралното разстояние,  $R_{\theta\varphi}(P)$  – насоченост на излъчването (radiation pattern), която при определянето на сеизмичния момент за Р-вълни е 0.52.

В много изследвания за насочеността на излъчването при Р- или S- вълни се използват стандартни стойности, които са съобразени с азимутите и диапазона на ъглите на излизане. Стойностите на този параметър обикновено са 0.52 за Р-вълни и 0.63 за S-вълните (Aki and Richards, 2002).

Сеизмичният момент по S-вълна ( $M_{0s}$ ) се дава със следното уравнение:

$$M_{0s} = \frac{\rho \cdot 4\pi \cdot \Omega_s \cdot R \cdot v_s^2}{R_{\theta\varphi}(S)}, \quad (5)$$

където  $M_{0s}$  е сеизмичният момент за S-вълната,  $\rho$  – плътността на средата,  $\Omega_s$  – ниво на платото, определено чрез спектъра на вълната, като стойностите му се определят по Z, N, E – компонента  $\left( \Omega_s = \sqrt{\Omega_Z^2 + \Omega_N^2 + \Omega_E^2} \right)$ ,  $R_{\theta\varphi}(S)$  – насоченост на излъчването (radiation pattern), която при определянето на сеизмичния момент за S-вълни е 0.63, а  $v_s$  е скоростта на вълната.

За определянето на радиуса на източника и сваленото напрежение са приложени следните формули:

$$r_p = \frac{v_p \cdot 3.36}{2\pi f_0}, \quad (6)$$

където  $v_p$  е скоростта на вълната, а  $f_0$  е ъгловата честота в Hz.

За S-вълната радиусът на източника се определя по идентичен начин:

$$r_s = \frac{v_s \cdot 2.34}{2\pi f_0}, \quad (7)$$

където  $v_s$  е скоростта на вълната, а  $f_0$  е ъгловата честота в Hz.

За сваленото напрежение за P- и S-вълните са в сила следните формули (Eshelby, 1957):

$$\Delta\sigma_p = \frac{7}{16} \frac{M_{0p}}{r_p^3} \quad (8)$$

$$\Delta\sigma_s = \frac{7}{16} \frac{M_{0s}}{r_s^3}, \quad (9)$$

където  $r_p$  и  $r_s$  са оценките на радиуса по P- и S-вълни (в km).

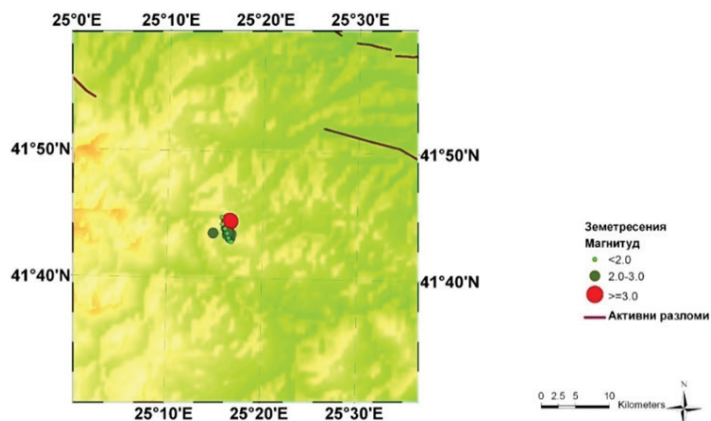
## Входни данни

В настоящата работа са оценени огнищните параметри на 10 събития от два роя, реализирани през периода 2009 - 2014 г. на територията на България. Земетресенията са с магнитуд в интервала  $2.7 \leq M_p \leq 4.1$  ( $M_p$ , дефиниран в Christoskov et al., 2012).

Основен източник на информация за разгледаните земетресения са данни от Националната Оперативна Телеметрична Система за Сеизмологична Информация (НОТССИ).

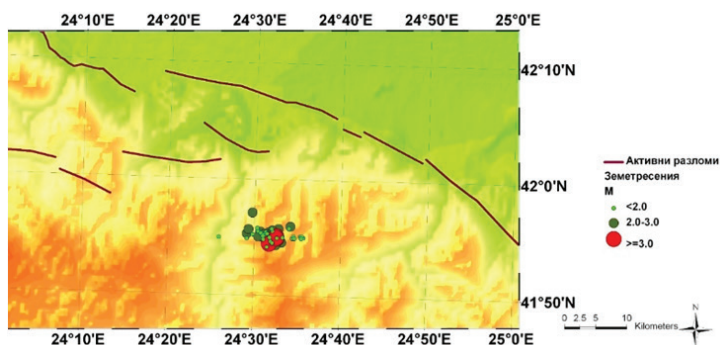
Чрез програмата, базирана на модела на Brune са генерирани 204 спектъра на P и S вълни.

Първата поредица е реализирана през периода 08-30 април 2009 г. в близост до град Кърджали (сеизмогенна зона Източни Родопи). Поредицата 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) - най-близко разположената станция до активизираната област (на около 18 km). Тези 264 събития не могат да бъдат локализирани и пространствено илюстрирани. Пространственото разпределение на 27-те събития е представено на фигура 2.



**Фиг. 2.** Пространствено разпределение на роева активност за периода 08.04.2009 г. – 30.04.2009 г., активните разломи са от „Неотектонска карта на България“, представена в Отчет ГФИ 2007 г.

Втората поредица включва 47 събития с магнитуд в интервала  $1.0 \leq M_p \leq 4.1$  и е реализирана в района на град Пловдив (сеизмогенна зона Марица). Периодът на реализация на тези събития е малко повече от 30 дни. Пространствената картина на поредицата е представена на фигура 3.



**Фиг. 3.** Пространствено разпределение на роев активност, реализирана през периода 12 януари – 16 февруари 2014 г., активните разломи са от „Неотектонска карта на България“, представена в Отчет ГФИ 2007 г.

От двете фигури (Фиг. 2 и Фиг. 3) се вижда, че събитията в тези поредици се групират в много малка пространствена област, която не може да се привърже към дефинирана разломна структура.



## Резултати

Резултатите от изследването са представени на фиг. 4-5 и в табл. 1-2. Резултатите от спектралния анализ за 5 от по-силните събития от поредицата в района на град Кърджали е представена на фиг. 4. На фиг. 5 са представени спектрите на 5 събития от поредицата в района на град Пловдив.

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 по-висок магнитуд в интервала  $3.3 \div 4.1$ .

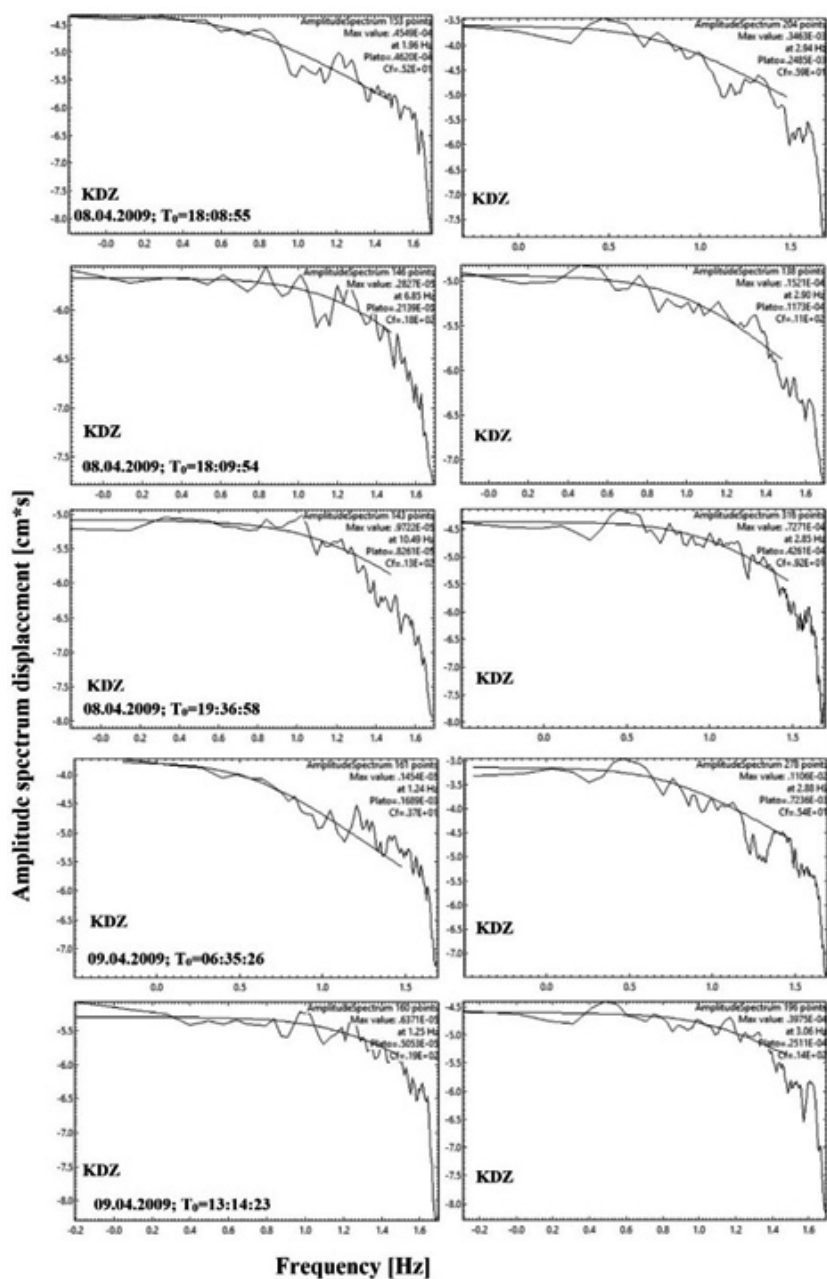
За всяко земетресение са генерирани спектри по преместване за Р и S - вълни, като са използвани записите от трите компоненти (Z - спектри за Р-вълна; Z, N и E - спектри за S -вълна) на различни станции. На фигура 4 са представени спектрите, генерирани за разгледаните събития, по най-близките до епицентъра станции. Оценените **параметри на сеизмичния източник за всяко от събитията** са дадени в табл. 1.

**Таблица 1.** Оценки на параметрите на сеизмичния източник за събития от роев тип сеизмичност, генерирани през 2009 г. в района на град Кърджали

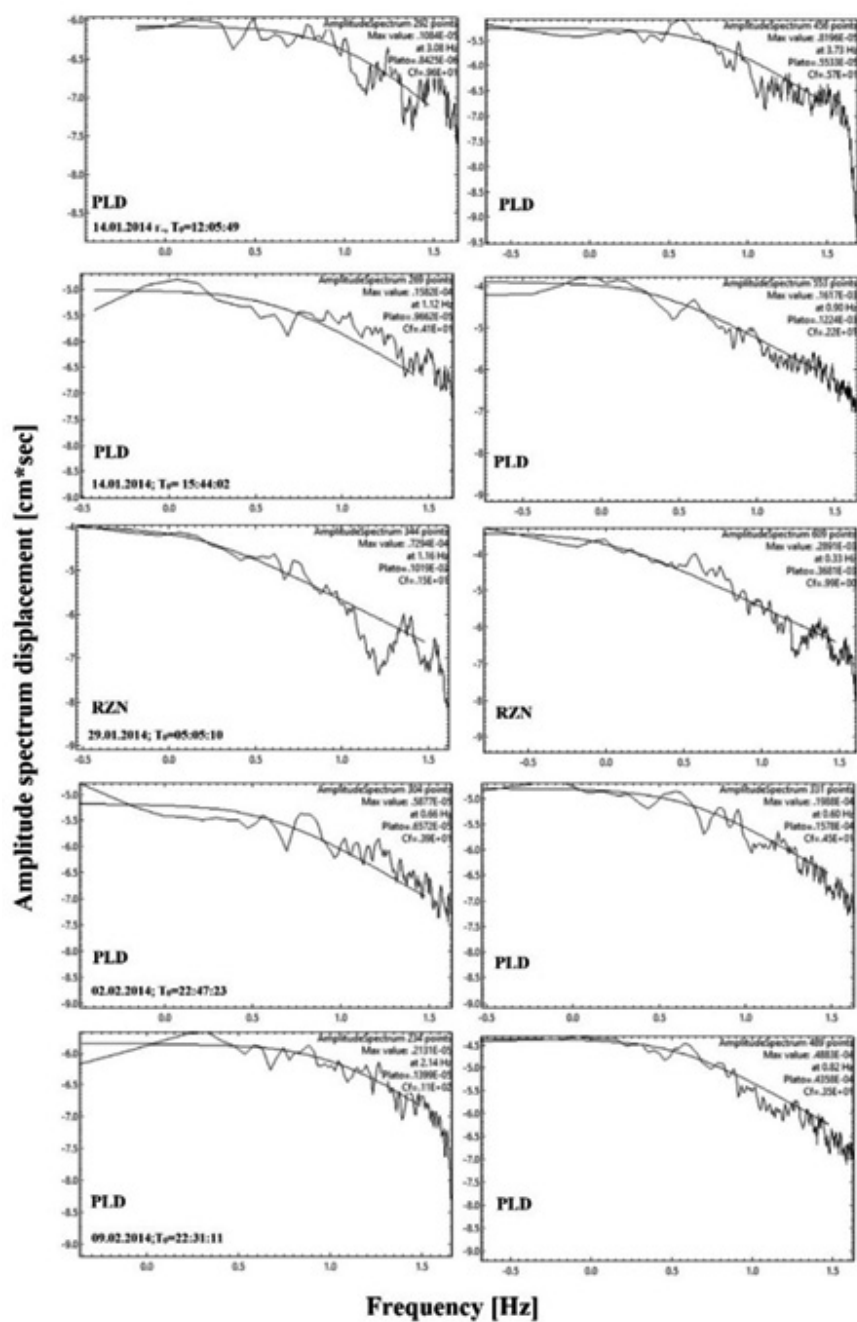
Дата	$M_p$	Брой станции	$M_0$ [ $N^*m$ ]	$\Delta\sigma_p$ [bar]	$r_p$ [km]	$M_{0s}$ [ $N^*m$ ]	$\Delta\sigma_s$ [bar]	$r_s$ [km]
08.04.2009	3.5	8	8.87E+13	11.07	0.42	9.75E+13	20.33	0.36
08.04.2009	3.3	5	1.69E+13	6.77	0.23	1.58E+13	13.00	0.20
08.04.2009	3.5	7	1.72E+13	9.54	0.19	2.03E+13	11.00	0.20
09.04.2009	4.1	8	3.41E+14	10.34	0.57	5.67E+14	29.76	0.65
09.04.2009	3.4	5	8.74E+12	13.93	0.16	1.08E+13	11.23	0.18

Тези земетресения са с приблизително еднакъв магнитуд със стойности на свалено напрежение в диапазона  $7 \div 14$  бара за Р-вълна и  $11 \div 30$  бара за S- вълна и стойности за радиус на източника в диапазона  $0.2 \div 0.6$  km за Р-вълна и  $0.2 \div 0.7$  km за S- вълна. Получените резултати са в очаквания диапазон, тъй като това са предимно слаби събития в диапазон с магнитуд между  $3.3 \div 4.1$ . Подобни резултати са получени и в други изследвания (напр. Süle, 2010). Стойностите за сеизмичен момент са в диапазона  $8.74 \times 10^{12} \leq M_0 \leq 3.41 \times 10^{14} (N^*m)$  за Р-вълна и  $1.08 \times 10^{13} \leq M_0 \leq 5.67 \times 10^{14} (N^*m)$  за S- вълна.

От серията, реализирана през месеците януари-февруари 2014 г., в близост до град Пловдив, територия разположена в маргиналната част на сеизмогенна зона Марица, са разгледани 5 събития. Изследваните събития са с магнитуд в интервала  $2.7 \div 3.4$ . На фигура 5 са представени спектрите, генерирани за разгледаните събития, по най-близките до епицентъра станции. Оценените **параметри на сеизмичния източник за всяко от събитията** са дадени в Табл. 2.



Фиг. 4. Спектри (за Р и S – вълна) на пет земетресения от роев тип сеизмичност в района на град Кърджали



Фиг. 5. Спектри (за Р и S – вълна) на пет земетресения от роев тип сеизмичност в района на град Пловдив

**Таблица 2.** Оценки на параметрите на сеизмичния източник за събития от роев тип сеизмичност, генерирани през 2014 г. в района на град Пловдив

Дата	$M_p$	Брой станции	$M_{0p}$ [N*m]	$\Delta\sigma_p$ [bar]	$r_p$ [км]	$M_{0s}$ [N*m]	$\Delta\sigma_s$ [bar]	$r_s$ [км]
14.01.2014	3.2	5	1.12E+13	18.04	0.20	1.19E+13	11.80	0.17
14.01.2014	3.1	8	1.03E+14	23.03	0.30	1.36E+14	32.13	0.33
29.01.2014	3.4	9	2.77E+14	13.69	0.56	4.91E+14	26.83	0.50
02.02.2014	2.8	7	3.13E+13	9.64	0.24	2.91E+13	16.32	0.20
09.02.2014	2.7	6	9.12E+13	20.25	0.32	5.15E+13	14.37	0.26

При тази поредица стойности на свалено напрежение са в диапазона  $10 \div 23$  бара за Р-вълна и  $12 \div 32$  бара за S- вълна и стойности за радиус на източника: от  $0.2 \div 0.6$  км за Р-вълна и  $0.2 \div 0.5$  за S- вълна. Стойностите на оценените параметри са в очаквания диапазон и потвърждават резултатите, получени от други автори (напр. Süle, 2010; Bhat, 2013). Стойностите за сеизмичен момент са в диапазона  $1.12 \times 10^{13} \leq M_0 \leq 2.77 \times 10^{14} (N*m)$  за Р-вълна и  $1.19 \times 10^{13} \leq M_0 \leq 4.91 \times 10^{14} (N*m)$  за S- вълна.

## Заклучение

Чрез анализ на получените резултати се достига до следните заключения за параметрите на сеизмичните източници в разгледаните два роя:

- ✓ Получените стойности за свалено напрежението са в рамките на очаквания диапазон от 10 до 100 бара. Средната стойност на сваленото напрежение е в интервала  $7 \div 23$  бара по Р-вълна и  $11 \div 32$  бара по S-вълна. Като при роя от 2009, генериран в района на град Кърджали, се наблюдават по ниски стойности на сваленото напрежение;
- ✓ За двата роя стойностите на сеизмичния момент  $M_0$ , оценени по спектъра на Р и S- вълна, са в интервала  $10^{12} < M_0 < 10^{14} (N*m)$ ;
- ✓ Стойности за радиус на източника са в диапазона от  $0.2 \div 0.6$  км за Р-вълна и  $0.2 \div 0.7$  за S- вълна. И при двете поредици се наблюдават идентични стойности на този параметър.

## Литература

- Aki, K., P. G. Richards, 2002. Quantitative seismology. Second Edition, ISBN 0-935702-96-2, University Science Books, Sausalito, 704 pp.
- Allmann, B. P., P. M. Shearer, 2007. Spatial and temporal stress drop variations. J. Geophys. Res., . 112, B04305, doi:10.1029/2006JB004395
- Bhat, 2013. Estimation of Source Parameters of Local Earthquakes in Jammu and Kashmir, India. International Journal of Scientific and Research Publications, V. 3, Iss. 2, ISSN 2250-3153

- Brune, J., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009.
- Brune, J., 1971. Correction (to Brune (1970)), *J. Geophys. Res.* 76, 5002.
- 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.
- Credner, H., 1876. Das vogtländisch-erzgebirgische Erdbeben vom 23. November 1875. *Z. Ges. Naturwiss.* 48, 246-269.
- Eshelby, J. D., 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems. In: *Proc. R. Soc. Lond. A* 241, 376-396.
- Frankel, A. 2009. A constant stress-drop model for producing broadband synthetic seismograms: Comparison with the Next Generation Attenuation relations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 99(2A), 664-680, doi: 10.1785/0120080079.
- Hanks, T. C. and M. Wyss, 1972. The use of body-wave spectra in the determination of seismic source parameters. *Bull. Seism. Soc. Am.* 62, 561-589.
- Kanamori, H. and Anderson, D. L., 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 65, 1073-1095.
- Kanamori, H., and C. Allen, 1986. Earthquake repeat time and average stress drop, in *Earthquake Source Mechanics*, *Geoph. Monogr. Ser.*, vol. 37, pp. 227-2352
- Kanamori, H., Brodsky, E.E., 2004. The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*, 67, 1429-1496.
- Malagnini, L., R. B. Herrmann and K. Koch, 2000. Regional ground motion scaling in Central Europe. *Bull. Seism. Soc. Am.* 90, 1052-1061.
- Margaris, N., and D. M. Boore, 1998. Determination of  $\sigma$  and  $\kappa_0$  from response spectra of large earthquakes in Greece. *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 170-182.
- 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.
- Süle, 2010. Spectral source parameters for weak local earthquakes in the Pannonian basin, *Cent. Eur. J. Geosci.*, 2(4), 475-480.
- Отчет ГФИ, 2007. 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 за територията на страната, Част I, БАН, Геофизичен Институт, С., стр. 205.

## **Estimation of source parameters for swarm type of seismicity**

P. Raykova

**Abstract:** Spectral analysis of seismic waves is one of the most important origins of information for the earthquake sources. In this study are presented P- and S-waves spectra of the earthquakes from two seismic swarms: the April 2009 swarm located in the vicinity of the city of Kardzhali and the 2014 swarm located near the city of Plovdiv. The database used in the study is compiled using digital data from the Bulgarian Seismological Network – NOTSSI. Displacement spectra are generated for P- and S- waves to estimate

some of the source parameters, such as seismic moment, stress drop, source radius and moment magnitude. Earthquake source parameters are estimated applying Brune model. The source parameters are estimated for 10 earthquakes: five earthquakes of the sequence near the city of Kardzhali and five earthquakes of the sequence near the city of Plovdiv with magnitude in interval  $2.7 \div 4.1$ . The estimated stress drop values are within the expected range. The 2009 swarm have lower values of the stress drop, in comparison with 2014 swarm.