

Bulgarian Geophysical Journal

2021, Vol. 44

Contents

<i>И. Георгиева, Н. Милошев</i> – Замърсяване на атмосферния въздух с фини прахови частици (фпч) – анализ на резултатите от компютърни симулации за България и София град.	3
<i>И. Георгиева</i> – Сезонна и годишна повтораемост на индексите за качеството на атмосферния въздух за района на град София.	23
<i>Д. Солаков, Пл. Райкова, С. Симеонова, И. Александрова</i> – Силни, разрушителни земетресения, реализирани на територията на България след 1900 г.	33
<i>P. Mukhtarov, R. Bojilova, B. Andonov</i> – The second G3 (strong) geomagnetic storm in 25th solar cycle on 3-4 november 2021.	43
<i>M. Chamati</i> – ULF geomagnetic disturbances due to moderate geomagnetic storm at Panagjuriste, Bulgaria.	53
<i>Пл. Райкова, С. Симеонова, Д. Солаков,, И. Александрова</i> – Земетресения с магнитуд $MW>5.0$, реализирани в сеизмогенна зона София след 1900 г.	60
<i>M. Metodiev, P. Trifonova</i> – Annual report of the observed geomagnetic activity at Panagjurishte observatory for 2016.	75
<i>M. Metodiev, P. Trifonova</i> – Annual report of the observed geomagnetic activity at Panagjurishte observatory for 2017.	92

<i>M. Chamati</i> – Spectral characteristics in ULF range of geomagnetic storm observed at Panagjuriste, Bulgaria on 27-28 september 2017.....	109
<i>М. Попова, Е. Ойнаков, Й. Милков, В. Бучакчиев, Д. Драгомиров</i> – Сеизмичност на територията на България и прилежащите земи по данни на НОТССИ за 2021.....	117

ЗАМЪРСЯВАНЕ НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ С ФИНИ ПРАХОВИ ЧАСТИЦИ (ФПЧ) – АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ КОМПЮТЪРНИ СИМУЛАЦИИ ЗА БЪЛГАРИЯ И СОФИЯ ГРАД

И. Георгиева¹, Н. Милошев¹

¹ Национален Институт по Геофизика, Геодезия и География, Българска Академия на Науките, ул. Акад. Георги Бончев, блок 3, София, България, e-mail: iivanova@geophys.bas.bg

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.1

Абстракт. В последно време, при изучаване на атмосферното замърсяване, особен интерес, поради доказаната вреда за Човешкото Здраве (ЧЗ), предизвикват праховите аерозоли (ФПЧ). Темата е особено актуална за България и град София, където системно се регистрират неколнократни превишения на нормите за концентрации на ФПЧ. Целта на настоящата работа е провеждането на надеждни, изчерпателни и детайлни изследвания на полетата на приземни концентрации на ФПЧ, ролята им при формиране на Индекса на Замърсяване и връзката им с процесите, които ги обуславят. В статията са представени следните резултати: Изясняване на пространствената и времева изменчивост на полетата на концентрации на ФПЧ и установяване на връзките им с метеорологичните условия и източниците на замърсяване; Обогаляване на знанията за взаимодействията на процесите, формиращи замърсяването с ФПЧ; Открояване на случаи с най-неблагоприятно замърсяване с ФПЧ – „горещи точки“ и най-неблагоприятни синоптични епизоди и изясняване ролята на синоптичните условия и локалните метеорологични процеси.

Ключови думи: замърсяване на атмосферния въздух, фини прахови частици (ФПЧ), индекс на замърсяване, климат на замърсяване.

Въведение

В настоящата работа са проведени надеждни, изчерпателни и детайлни изследвания на полетата на приземни концентрации на ФПЧ, изяснена е ролята им при формиране на ИЗ и връзката им с процесите (атмосферна динамика и химически трансформации), които ги обуславят. Надеждни и изчерпателни изследвания озна-

чава използването на статистически значими ансамбли от компютърно симулирани данни, отразяващи многообразието на метеорологични условия с тяхната типична повтаряемост, които съчетани с компютърно симулираните данни за концентрации на ФПЧ, да позволяват да се правят надеждни изводи относно техните характерни особености и поведение, влиянието им върху ИЗ и влиянието на характеристиките на атмосферната динамика върху тях. Открити са най-неблагоприятните случаи на загърсяване с ФПЧ - „горещи точки“ и е анализирана ролята на синоптичните условия и локалните метеорологични процеси за формирането им. Детайлни изследвания означават достатъчно висока пространствено/временна разрешаваща способност на полетата, която да даде възможност да бъде отразен мултимасщабния характер на процесите, да се уловят взаимодействията на явленията с различни мащаби и да се проследят основните източници, механизми и пътища за формиране на загърсяването с ФПЧ. Извършени са изследвания за територията на цялата страна, но със специален акцент върху градска среда (град София), които отразяват нейната специфичната климатология и екология. Ансамблите, обхващащи симулации за период от 7 години (от 2008 до 2014 година) се смятат за статистически представителни и отразяват основните черти на локалния/регионален климат, както на атмосферната динамика, така и на качеството на въздуха. Основният изследователски подход е съвместен анализ и статистическо третиране на полетата на загърсяване с ФПЧ и регионалните/локалните метеорологични полета. В статията са представени резултати разделени по следния начин: Климат на загърсяването с ФПЧ; Особено неблагоприятно приземно загърсяване с ФПЧ и връзката му с метеорологичните условия; Изследване на произхода на загърсяване с ФПЧ в град София и Изследване приноса на отделните динамични, химични и аерозолни процеси за формиране на загърсяване с ФПЧ.

Методология

Анализ на тримерните полета на концентрации на ФПЧ, получени със средствата на компютърно симулиране. Използвана е световно призната система от модели US EPA Models 3 System, състояща се от 3 модела – WRF <http://www.wrf-model.org/>, Skamarock et al. (2007), Dudhia, J. (1993), CMAQ Byun and Ching (1999), Byun et al. (1998) и SMOKE <http://www.smoke-model.org/>, CEP (2003). Европейската и Национална нормативна база няма стриктни и определени изисквания и дефиниции за моделите, с които да се правят симулации за състава на атмосферата, това е и причината да има и да се използват изключително голям набор от такива модели. Тези модели са различни по сложност и разполагат с различна физическа основа, и са приспособени към многообразието на мащабите на пренос - от глобален до локален мащаб в много различни разработени за състава на атмосферата в България (Gadzhev et al. 2013, 2014a, 2014b, 2015a, 2015b, 2020, 2021a, 2021b), (Gadzhev G. and K. Ganey., 2018, 2019a, 2019b), (Gadzhev G. and V. Ivanov 2020, 2021).

Обект на изследването е територията на цялата страна, но с акцент върху изследванията в градска среда (град София), които да отразяват нейната специфична климатология и екология. Обработката и анализа на генерираните ансамбли от ме-

теорологични полета и такива на концентрации на ФПЧ с разрешаваща способност от 1 км. за района на град София са извършени.

На база получените концентрации от компютърното моделиране е изчислен индекс на замърсяване (ИЗ). Един от най-често използваните ИЗ е Британският дневен индекс за качество на въздуха (Leeuw, F. de, Mol, W., 2005), използван и в България (Syrafov et al. 2012, 2013, 2014a, 2014b, 2015), (Gadzhev, G., 2018, 2020, 2021), (Georgieva, I., 2014), (Georgieva et al. 2015), (Georgieva, I. and Ivanov, V., 2017, 2018) and (Ivanov, V. and Georgieva, I., 2017).

Инвентаризацията на Холандската организация за приложни научни изследвания (TNO) за 2010 г. (Denier van der Gon et al., 2010) се използва частично за територията на България, като за София град се използва Националната инвентаризация за 2010 г., предоставена от Българската изпълнителна агенция по околна среда. В инвентаризацията на TNO, антропогенните източници са разпределени в 10 SNAP категории (Избрана номенклатура за замърсяване на въздуха), класифицирайки ги според процесите, водещи до изпускане на вредни материали в атмосферата (ЕМЕР/CORINAIR, 2002). Инвентаризацията на TNO от 2010 г. има разделителна способност $0,125^{\circ} \times 0,0625^{\circ}$ (около 7×8 km). На база на разделението на емисиите по категории източници е определен принос на всяка от категориите към концентрациите на ФПЧ.

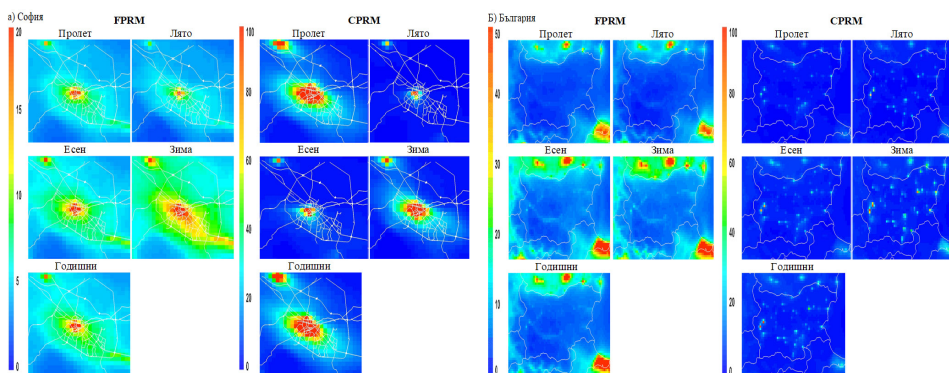
Моделът CMAQ, има опция “Integrated Process Rate Analysis”, която дава възможност да се оцени ролята и на всеки от динамичните и химични процесите формиращи атмосферното замърсяване. По този начин изменението на концентрацията за даден интервал от време може да се представя като сума от приноса на различните процеси. Включването на опцията за изследването на приносите на отделните процеси, дава възможност да се определят не само приносите на отделните процеси за определен замърсител, но също така и за група от замърсители каквато е групата на Праховите частици. Чрез обработката на компютърно симулираните полета на приносите на различните процеси към почасовото изменение на приземните концентрации на ФПЧ могат да се обогатят знанията за сложното взаимодействие на динамичните, химични и аерозолни процеси, формиращи замърсяването с ФПЧ. Разглеждането на взаимодействието и приноса на тези процеси дава възможност за обяснение на общата картина на замърсяване с ФПЧ както за територията на България, така и за София.

Резултати

Прахта е един от основните замърсители на въздуха, като основните ѝ източници са промишлеността, транспорта и енергетиката. Естествено тя има вредно влияние върху човешкото здраве, което зависи главно от размера и химичния състав на праховите частици. По-едриите прахови частици (от $2.5 \mu\text{m}$ до $10 \mu\text{m}$ - PM10) при попадане в организма чрез дихателната система, се задържат в горните дихателни пътища, а по-фините (под $2.5 \mu\text{m}$ - PM2.5) достигат до по-ниските отдели на дихателната система и водят до увреждане на тъканите в белия дроб. В настоящата ста-

тия праховите частици с размер под $2.5 \mu\text{m}$ са наречени фини (FPRM), а тези с размер от $2.5 \mu\text{m}$ до $10 \mu\text{m}$ - едри прахови частици (CPRM). С наредба № 12 от 15 юли 2010 г. за норми за серен диоксид, азотен диоксид, фини прахови частици, олово, бензен, въглероден оксид и озон в атмосферния въздух в сила от 30.07.2010 г., (Обн. ДВ. бр. 58 от 30 Юли 2010 г., изм. и доп. ДВ. бр. 48 от 16 Юни 2017 г., изм. и доп. ДВ. бр. 79 от 8 Октомври 2019 г.) са приети норми за пределно допустими концентрации (ПДК) за ФПЧ. Въведените ПДК целят предпазване от техния вреден ефект върху здравето на хората и околната среда. FPRM - $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Средно годишна Норма (СГН); CPRM - $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Средно Дневна Норма (СДН) и $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Средно годишна Норма (СГН).

Климат на замърсяването с ФПЧ: Основната цел е да се изясни пространствената и времева (денонощна, сезонна) изменчивост на основните характеристики на полетата на приземни концентрации на ФПЧ и анализ на връзките им с метеорологичните условия. За това е извършен статистически анализ на получените ансамбли от двумерни полета на изчислените концентрации на ФПЧ. Фигура 1. Изчислена е плътността на вероятността за концентрациите на ФПЧ, пресметнати са статистическите моменти (средни и дисперсии по ансамбъл), максимуми, персентили с тяхната пространствена и времева (сезонна, денонощна) изменчивост Фигура 2.

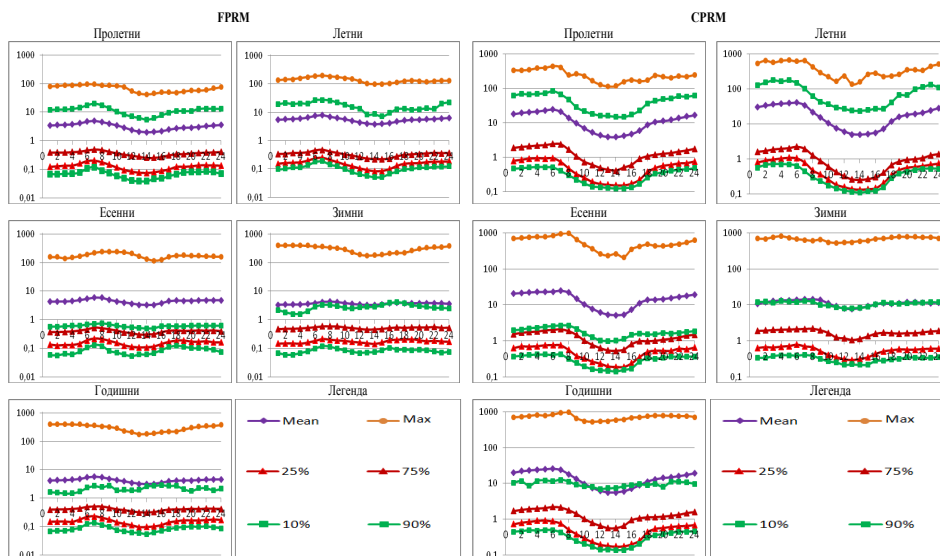


Фиг. 1. Двумерни полета на изчислените концентрации (годишно и сезонно осреднени) на ФПЧ Фигура 1А) FPRM/CPRM София и Фигура 1Б) FPRM /CPRM България за един избран час 07:00 UTC.

От фигурите добре се открояват районите с високи концентрации на ФПЧ, както за района на София така и за България. Вижда се, че и при двата случая се превишават ПДК, като причините за тези високи концентрации са различни и зависят от фактори като подложна повърхност, метеорологични условия, автомобилен трафик и сезонна обусловеност. От полетата за България се вижда, че като отделно открояващо се място с високи концентрации е главно района на град София. Друг район е ТЕЦ Марица Изток, както и по-големите градове в страната, особено

през зимните месеци. За София полетата на концентрациите на праховите частици (FPRM/CPRM), както на фините така и на едрите са високи в Централните части и Южните квартали. Като отделно място с висока концентрация се откроява и района на Костинброд в западните покрайнини. На места в споменатите райони на високи концентрации се достигат определените ПДК за FPRM, докато CPRM превишават ПДК в Центъра на града и района на Костинброд.

Компютърно симулирания ансамбъл е 7 годишен (от 2008 до 2014) и е достатъчно голям и изчерпателен за да позволява разнообразни статистически обработки. Представените осреднени концентрации не изчерпват информацията, която може да бъде извлечена от ансамбъла, затова са изчислени различни статистически характеристики, за цялата област София. По този начин са определени корелационни връзки и е направен качествен анализ на зависимостта на характеристиките на замърсяването с ФПЧ от метеорологичните полета и параметри. На Фигура 2 са представени графики показващи основни ансамблови характеристики на замърсяването, а именно сезонни и годишни характеристики за FPRM/CPRM, осреднени за област София град. На всички графики са изобразени средните концентрации, максимални по ансамбъл концентрации и кривите обозначени с 10%, 25%, 75% и 90%. Тези криви представляват имажинерни концентрации, за които съответно в 10%, 25%, 75%, 90% от случаите са били симулирани по-ниски концентрации. При така представените криви в интервала между 25% - 75% попадат 50% от случаите, а в интервала 10% - 90% попадат 80% от случаите. Изобразените по този начин криви дават достатъчно добра представа за статистическите характеристики на ансамбъла – дисперсия, асиметрия, ексцес, без да бъдат показани явно.

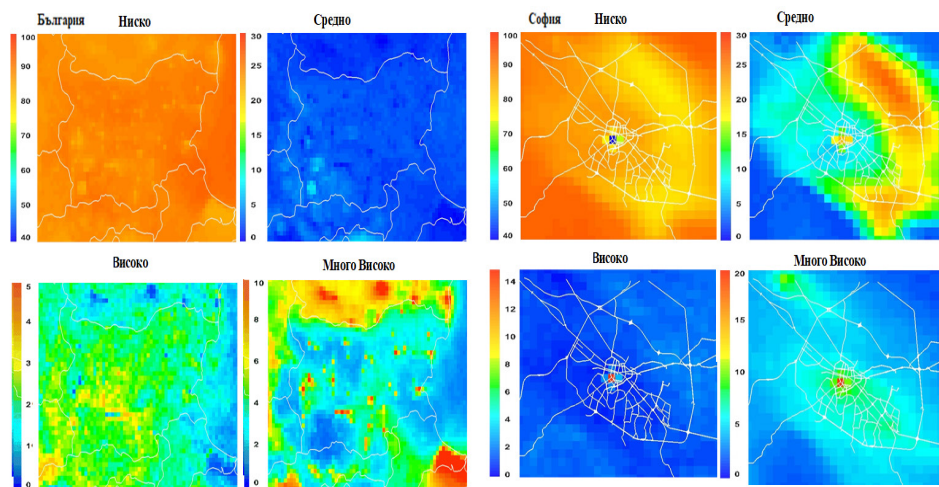


Фиг. 2. Статистически характеристики на осреднени приземни концентрации на FPRM/CPRM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] за София.

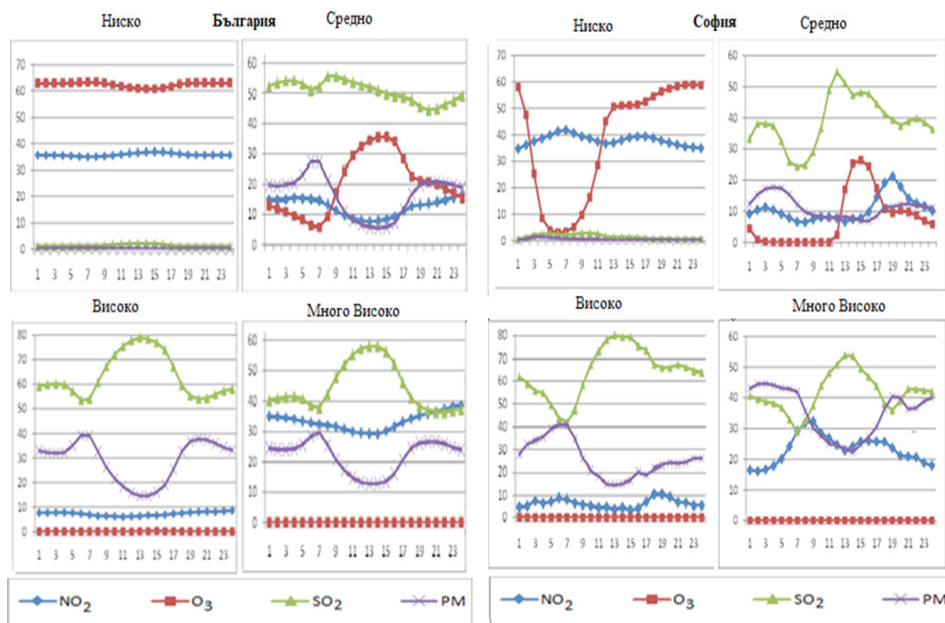
Графиките са представени в логаритмична скала. Вижда се, че средните концентрации са с добре изразени денонощен и сезонен ход и са асиметрично разположени в различните отрязъци от броя случаи през денонощието и през различните сезони. Средните концентрации попадат в интервала съдържащ 80% случаи през топлите месеци и над него през есента и през зимата съвпадат или са по-големи от 90% кривата. Абсолютните максимални и средни концентрации са най-високи през есента и зимата (устойчивата стратификация). В сутрешните часове има добре изразен максимум и минимум около обяд. Вероятна причина за този максимум са стабилната атмосфера и интензивния автомобилен транспорт сутрин. Източници на едри прахови частици са енергетиката и локалното отопление, които са най-интензивни през по-студените месеци. Фактът, че в много случаи линията на средните концентрации попада дори над линията 90% показва, че в останалите 10% от случаите концентрациите са изключително високи. Средните и абсолютните максимални концентрации на FPRM и CPRM са най-високи през есента и зимата поради устойчивата атмосфера и слабо изразения турбулентен транспорт във височина.

Изчисляване на ИЗ. Изясняване на ролята на замяряването с ФПЧ за формиране на ИЗ. Очертаване на региони/епизоди при които ФПЧ са определящи за ИЗ: Качеството на въздуха се определя, като се конструира Индекс за качеството на въздуха (ИКВ), или още наречен индекс на замяряване (ИЗ), показва до каква степен е чиста или замърсена средата, която дишаме и какви биха били последиците за здравето на хората. ИЗ е съставен и се измерва, за да се определи състоянието и качеството на въздуха, спрямо широкия кръг от замърсители, от който е съставен. Основна функция на ИЗ е оповестяването на реалното състояние на въздуха и обобщаването му в една цифра (например, изразена като цветна пиктограма или като код), като се дава възможност да се опише по един прост и разбираем за хората начин. ИЗ на атмосферния въздух дава интегрална оценка на влиянието на цялата съвкупност от замърсители върху човешкото здраве и се изчислява на базата на концентрацията на различните замърсители получена от измерване или числено моделиране. Предоставянето на информация за реалното качество на въздуха се осъществява, чрез преобразуване на концентрацията на замърсителите в индекс, който се определя за всеки замърсител поотделно и по различен начин. След преобразуването на концентрацията в индекс, се образува безразмерна скала, в която попада индексът и е свързана с интуитивен цветен код (напр. от зелено до червено) и лингвистично описание (например от много добро до много лошо). ИЗ се определя в няколко интервала за всеки, от който е линейна функция на концентрацията на съответните примеси (ЕРА, 2009). ИЗ в България се базира на концентрациите на 5 замърсителя: Озон (O_3), Азотен диоксид (NO_2), Серен диоксид (SO_2) и Прахови частици (PM10). По този начин е определен и изчислен и индекса на замяряване, като резултатите са представени на Фигури 3 и 4. Пространственото и времево поведение на ИЗ е определен като всички симулации са представени като сума на всеки индекс във всяка една от категориите - Ниско, Средно, Високо и Много високо. В категорията Ниско въздуха е най чист, което означава, че високи стойности при полетата с повтаряемостта на дните с даден ИЗ, показват повече случаи с чист въздух, а ниските стойности означават

по-малко случаи с чист въздух, респективно – повече случаи със замърсен въздух. При останалите категории Средно, Високо и Много Високо, високите стойности показват повече случаи със замърсен въздух, а ниските – повече случаи с чист въздух.



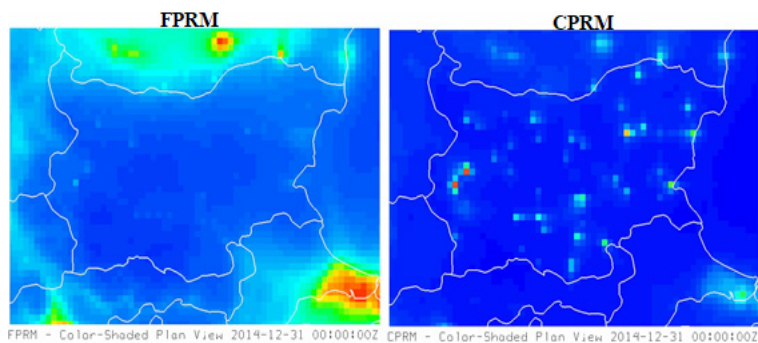
Фиг. 3. Повтаряемост на ИЗ в 4-те категории – годишно осреднени за България и София.



Фиг. 4. Годишно осреднени дневни вариации [%] на доминантните замърсители.

Фигура 3 полетата на повторемостта на ИЗ за двете области, много добре описва териториите и районите със занижено качество на въздуха. За България те са предимно големите градове и административни центрове в страната, както и районите на ТЕЦ-те (Бобов дол и Марица Изток); за София се открояват предимно централните части на града, района на Костинброд, по-големите пътни артерии на Столицата и ТЕЦ-те Изток и София. На Фигура 4 са представени графики показващи дневните вариации на всеки един от замърсителите участващи в изграждането на ИЗ във всяка една от категориите. Вижда се ясно, че и при двете области София и България, открояваща доминантна роля имат фините прахови частици. В категориите Високо и Много високо, се открояват като втори доминантен замърсител, след серния диоксид, като е редно да се отбележи, че през различните сезони и в зависимост от метеорологичните условия, ФПЧ са доминантен замърсител, особено сутрин и следобед, и определят качеството на въздуха.

Особено неблагоприятно приземно замърсяване с ФПЧ и връзката му с метеорологичните условия: Изясняване на ролята на крупномасштабните и локални метеорологични условия и процеси за формиране на особено неблагоприятно (екстремно) приземно замърсяване с ФПЧ. Направен е анализ на полетата на приземно замърсяване с ФПЧ и са разгледани случаи на най-неблагоприятно (екстремно) замърсяване – открояване на „горещи точки“. Анализирани са полетата на замърсяване с ФПЧ над двете области България и София град, и са определени открояващите се „горещи точки“ и за тези точки са представени полета на концентрации и графики със статистически характеристики. За територията на страната са определени „горещите точки“ Фигура 5, но представените графики са от района на град София, понеже това е областта с най-фина хоризонтална разрешаваща способност, а по територията на България те ще бъдат само изброени: Една от тези „горещи точки“ в страната е именно град София! Както се вижда и от полетата на концентрациите на двете фракции на праховите частици, ПДК се превишават, открояващите се райони са предимно големите градове (най-много над София), открояват се също ТЕЦ-те Марица Изток и Бобов дол.



Фиг. 5. „Горещи точки“ по територията на България и годишно осреднени концентрации на FPRM/CPRM за територията с разрешаваща способност от 9 км.

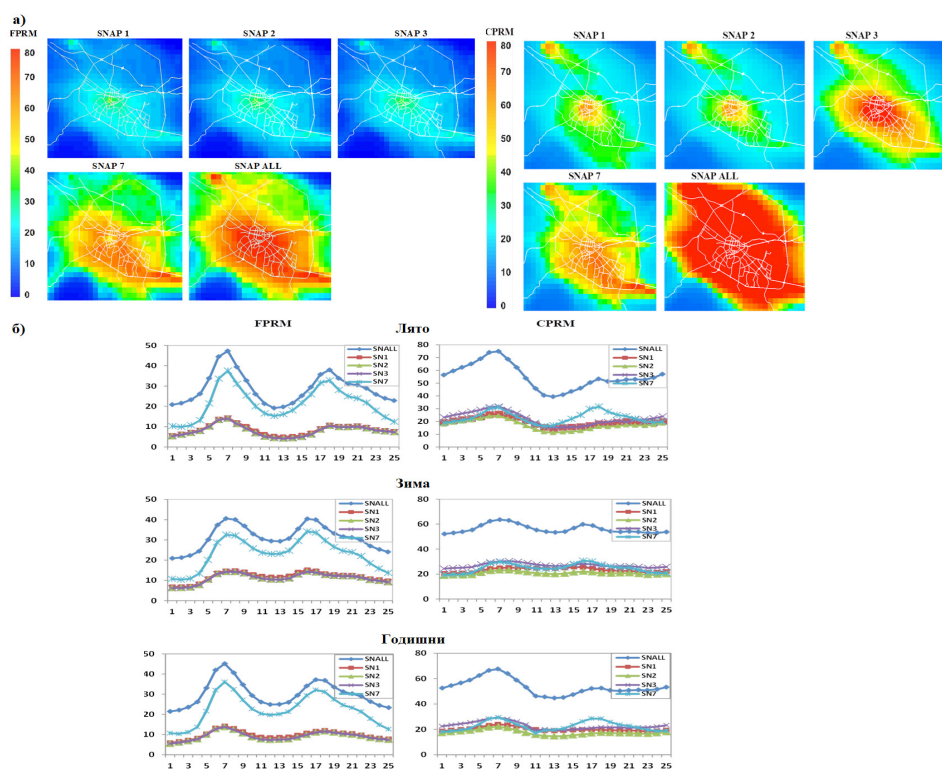
Представените полета на концентрациите на FPRM/CPRM осреднени за района на София (Фигура 6) показват, че „горещите точки“ от областта с високи стойности на концентрациите са Централните части на града (там се намира ТЕЦ София), ТЕЦ Изток в кв. Дружба и южната дъга на околновръстния път. Представителните точки за избраните райони са ТЕЦ „София“ и ТЕЦ „Изток“ (кв. Дружба – юго-източна част). Тези райони се открояват и на симулациите при определяне ИЗ със занижено качеството на въздуха. Всички графики са представени в логаритмична скала. Графиките показват, че средните концентрации са с добре изразени денонощен и сезонен ход и са асиметрично разположени в различните отрязъци от броя случаи през денонощието и през различните сезони. Средните концентрации



Фиг. 6. Статистически характеристики на годишно и сезонно осреднени приземни концентрации на FPRM/CPRM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] за избрани горещи точки: ТЕЦ София и ТЕЦ Изток.

попадат в интервала съдържащ 80% случаи през топлите месеци и над него през студените, като през зимата съвпадат с 90% кривата. Абсолютните максимални и средни концентрации са най-високи през есента и зимата, като вероятна причина за това е често устойчивата стратификация на атмосферата. В сутрешните часове има добре изразен максимум и минимум около обяд (стабилната атмосфера и интензивния автомобилен транспорт сутрин). Има добре изразен минимум през деня и максимум вечер. Източници на едри прахови частици са предимно енергетиката и локалното отопление, които са най-интензивни през по-студените месеци, когато поради стратификацията е възпрепятстван турбулентния транспорт на замърсители във височина и те се задържат в приземния слой.

Изследване на произхода на замяряване с ФПЧ в град София: Чрез обработката на компютърно симулираните полета на приземни концентрации на ФПЧ за различни емисионни сценарии се оцени приноса на различните категории източници на атмосферно замяряване към цялостната картина на замяряването на град София с ФПЧ. Емисиите в използваната инвентаризация от 2010 година са за



Фиг. 7. а) Средно годишни приземни приноси на категориите SNAP1, SNAP2, SNAP3, SNAP7, SNAPALL [%] към изменението на приземните концентрации на FPRM/CPRM и **б)** Осреднени по ансамбъл годишни и сезонни приноси на отделните източници, водещи до изменението на FPRM и CPRM за София.

10 категории източници (SNAP) и това позволява да се оцени приноса на различните антропогенни дейности към общата картина на загърсяване с ФПЧ. В момента са налични ансамблови симулации за следните емисионни сценарии: SNAP1 - Енергетика; SNAP2 - Неиндустриални изгаряния; SNAP3 - Индустриални изгаряния; SNAP7 - Автомобилен транспорт и SNAPALL - включени емисии от всички категории източници. Направен е анализ за областта София град с разрешаваща способност от 1 км и инвентаризация на емисиите от 2010 година. Изчислен е относителния принос на всички категории източници към формиране на приземното загърсяване с ФПЧ. Представени са ансамбли от двумерни, зависещи от времето полета на относителните приносите на разглежданите SNAP категории към приземните концентрации на FPRM/CPRM, за София Фигура 7.

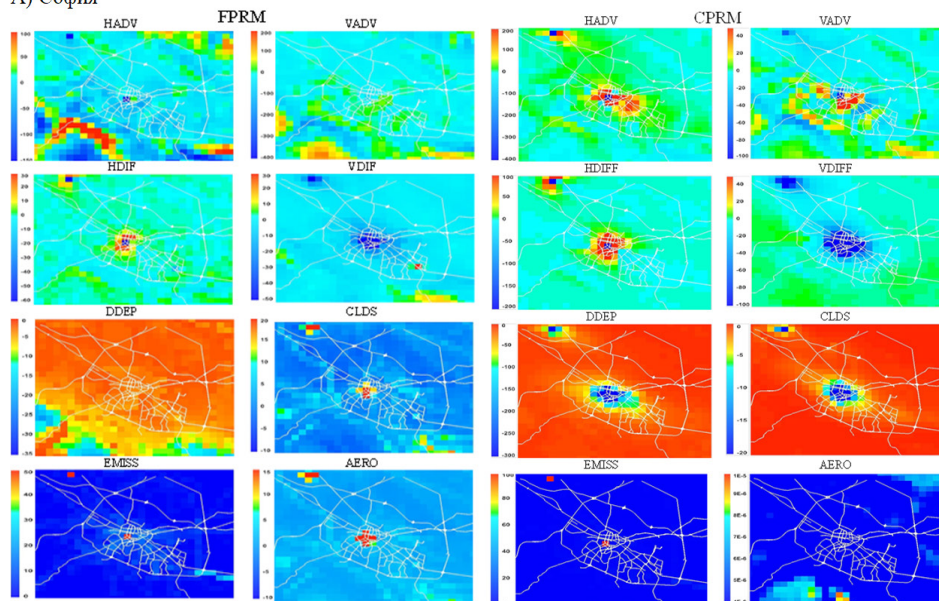
От полетата за средния годишния принос на емисиите от SNAP1, SNAP2 и SNAP3 за образуване на FPRM се вижда, че приносът през цялото денонощие навсякъде е положителен. Средният принос за града е около 30%. Само над високите части на планините Витоша и Стара Планина той е минимален и почти нулев. Приносът е най-висок над централните части на града, южните квартали и района на Костинброд около 40%. Полетата за средния годишен принос на емисиите от Автомобилния транспорт SNAP7 водещ до изменение на концентрацията на FPRM показват, че приносът през цялото денонощие навсякъде е положителен. Като в сутрешните и следобедните часове средният принос е максимален за града - около 50%, когато и транспорта е най-интензивен и пътните трасета са най-натоварени. Около обяд и през вечерта, приноса е по нисък в сравнение с другите часове, но въпреки това остава около 30% в централните части и началото на АМ Тракия както и основните пътни трасета в Столицата. От полетата за средния годишен принос на емисиите от всички категории източници SNAPALL водещ до изменение на приземните концентрации на FPRM, се вижда, че приносът през цялото денонощие навсякъде е положителен и максимален. Достига стойности над 60% за цялата област освен над планините, където той е нулев. Приносът е максимален сутрин и следобед със стойности около 70%, в централните части и южните квартали, като с голям принос се откроява и района на района на Костинброд. От полетата за средния годишен принос на емисиите от отделните категории водещи до изменение на концентрацията на CPRM се вижда, че приносът на всички е положителен, и най-големи се открояват от SNAP3 и SNAP7. Над планините Витоша и Стара Планина приноса е минимален и почти нулев. Открояват се Централните части на града, южните квартали и района на Костинброд с принос около 60-70%, а средния принос за останалата част на града е около 40%. Всички категории имат положителен принос към изменението на концентрациите на FPRM/CPRM, но най-големи са приносите от автомобилния транспорт за FPRM и Индустриалните изгаряния за CPRM. Също така приносите имат много добре изразен денонощен и сезонен ход, който може да се проследи и на графиките за Статистическия анализ на получените ансамбли от двумерни полета Фигура 7б. От фигурите за осреднените по ансамбъла годишни и сезонни приноси на отделните източници, водещи до изменението на приземните концентрации на FPRM и CPRM се вижда, че през отделните сезони приносът на различните типове източници е различен, но с почти еднакъв денонощен ход. Доминиращият принос

за FPRM е този на източниците от всички снопове (SNALL) около 40%, следван от този на автомобилния транспорт (SN7) - около 30%. Приносът на останалите източници е около 10% през всички сезони. Денонощното разпределение показва, че максимален принос имат сноповете в сутрешните и следобедните часове, а минимален около обяд и през нощта. За CPRM навсякъде доминиращият принос е на източниците от всички снопове около 50%. Вторият по големина принос е на автомобилния транспорт, като в сутрешните часове, той се изравнява с приноса на емисиите от промишлеността. Най-големи стойности на приносите са в сутрешните часове през всички сезони, както и в следобедните часове. Най-малък принос имат източниците на Неиндустриалните изгаряния около 10%. За територията на град София относителните приноси имат добре изразен денонощен и сезон ход. Сезонният ход може да бъде различен за различните замърсители и да се мени в зависимост от източника. Може да се направи обобщен извод, че за образуването на ФПЧ доминират Автомобилния транспорт (SNAP7) и Индустриалните изгаряния (SNAP3). Приносът на емисиите от всички категории (SNAPALL) за цялата област София град, е по-малък от 100%, което означава, че част от концентрациите се формират и от източници, които са външни за областта в резултат на пренос през границите и.

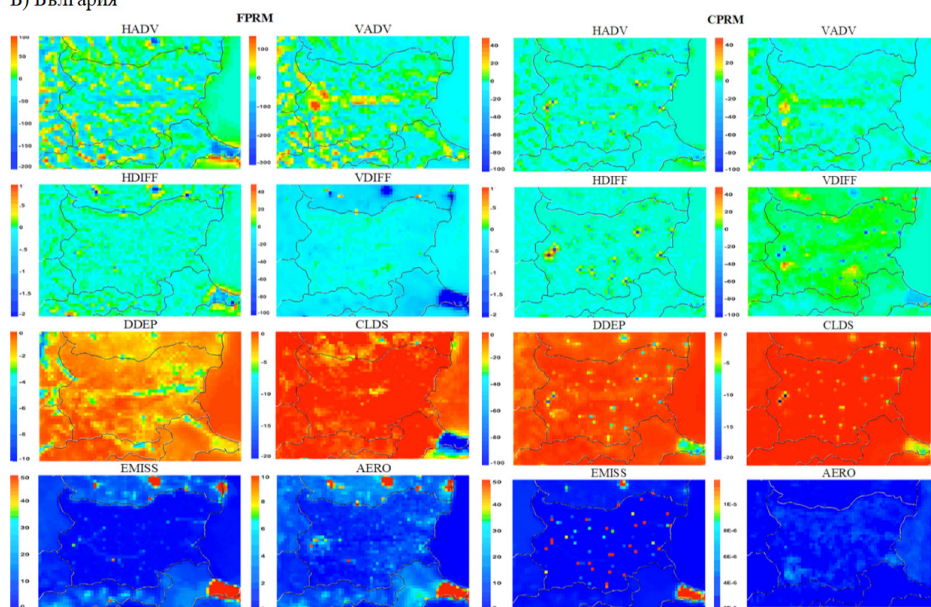
Изследване приноса на отделните динамични, химични и аерозолни процеси към формиране на замърсяването с ФПЧ. Атмосферното замърсяване се формира в резултат на взаимодействието на различни динамични и химични процеси. Чрез обработката на компютърно симулираните полета на приносите на различните процеси към почасовото изменение на приземните концентрации на ФПЧ се обогатяват знанията за сложното взаимодействие на динамичните, химични и аерозолни процеси, формиращи замърсяването с ФПЧ.

Разглеждането на взаимодействието и приноса на тези процеси дава възможност за обяснение на общата картина на замърсяване с ФПЧ както за територията на България, така и за София. Различните процеси, които влияят върху формиране на картината на замърсяване са: хоризонтална и вертикална дифузия, хоризонтална и вертикална адвекция, емисии, сухо отлагане, химически трансформации, аерозолни процеси, хетерогенна химия и облачни процеси, запазване/съхранение на масите. В тази част са представени резултати от компютърните симулации, оценяващи приноса на различните динамични процеси на пренос и трансформация на ФПЧ, които формират климата на замърсяването на въздуха за двете области. Извършен е статистически анализ на ансамблите от двумерни полета на относителни приноси на различните процеси към формиране на концентрациите на ФПЧ. Моделът CMAQ, който е използван при симулациите има опция "Integrated Process Rate Analysis", която дава възможност да се оцени ролята на всеки от процесите споменати по-горе, при формиране на атмосферното замърсяване. По този начин изменението на концентрацията за даден интервал от време може да се представи като сума от приноса на различните процеси. Включването на опцията за изследването на приносите на отделните процеси, дава възможност да се определят не само приносите на отделните процеси за определен замърсител, но също така и за група от замърсители:

А) София



Б) България

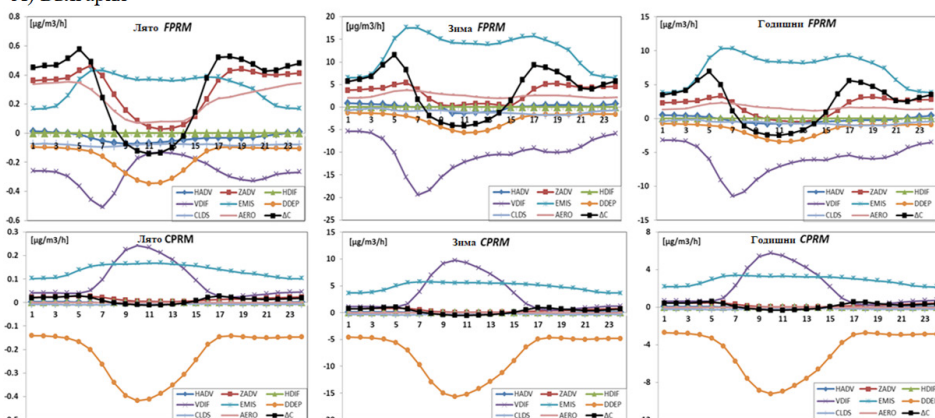


Фиг. 8. Осреднени годишни двумерни полета на приземните приноси на отделните процесите към изменението на концентрациите на FPRM/CPRM за териториите на А) София и Б) България.

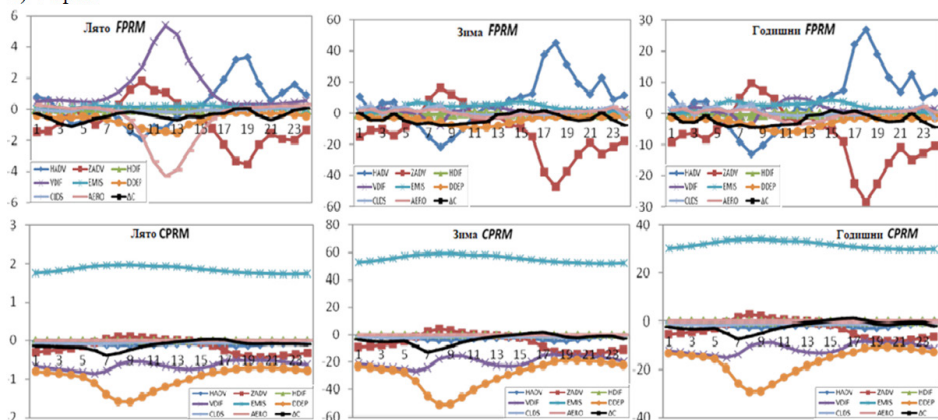
Една такава специфична група от замърсители са праховите частици, които модела може да раздели и разгледа като отделни фракции: CPRM = ACORS + ASEAS + ASOIL - Едри Прахови Частици (CPRM) и A2_5 = SO₄ + NH₄ + NO₃ + EC +(ORGA + ORGB) + PM_{2.5}- Фини Прахови Частици (FPRM). Представени са резултати за двете групи праховите замърсители CPRM и FPRM (едри и фини прахови частици). От двумерните карти за приземните приноси на процесите водещи до образуването на ФПЧ, както за България, така и за София, могат да се направят следните изводи: Приносите на двойката Хоризонтална-Вертикална адвекция (HADV, VADV) са винаги в противофаза, което е отражение на уравнението на непрекъснатостта. И двете адвекции добре описват планинските части и релефа на областта, като естествено в полетата за София (с по-детайлната резолюция) ефекта е по-видим. Приносът на HADV към FPRM е отрицателен над планините и в центъра на града и положителен принос в подножията (добре се описва и на картите за България). Вертикалната адвекция (VADV) е в противофаза на Хоризонталната и тя има положителен принос по планините и отрицателен в подножията. Приносът на Хоризонталната дифузия (HDIF) е отрицателен над самите източници - ТЕЦ „София“, ТЕЦ „Изток“, ТЕЦ „Марица Изток и Бобов дол, а около тях е положителен. Най-добре тези ефекти се откриват на картите за CPRM за България. Вертикалната дифузия (VDIF) има положителен принос само над високите източници (ТЕЦ-те) при картите за София и FPRM, докато за CPRM на картите за България приноса на VDIF е отрицателен. Приносът на VDIF е отрицателен за FPRM /CPRM в центъра на София и района на Костинброд – където са по-ниски източници. Приносът на сухото отлагане (DDEP), естествено, е отрицателен за и за двете фракции, като най-голям е над ТЕЦ „Изток“ и Витоша планина за FPRM, а в централните части е почти нулев. При картите на CPRM, приносът на DDEP е най-голям и отрицателен в центъра на града и района на Костинброд. Приносът на облачните процеси (CLDS) също е отрицателен и най-голям над централните части и Костинброд за CPRM, докато на полетата за FPRM, приноса е положителен и максимален в тези райони за София, а на картите за България отрицателен е приноса е отрицателен над София и ТЕЦ „Бобов дол“, докато на другите места е почти нулев. Приносът на емисиите (EMIS) е положителен! За София той е най-голям в Центъра на града, района на Костинброд и началото на АМ Тракия и за двете фракции, а при картите за България той е максимален и положителен над големите градове и източниците на емисии. Приносът на аерозолните процеси (AERO) е положителен, като за FPRM той е най-голям в централните части и района на Костинброд, а за CPRM приносът на аерозолните процеси е изключително малък и за двете области. Както стана ясно от описанието на полетата на средните приземни приноси, всички процеси имат различни по-големина приноси, със различни знаци в различни фази са и имат различни значения. Значението на „положителен“ принос, е че даденият процес допринася към повишение на концентрацията, докато „отрицателния“ принос, намаля концентрацията на дадения замърсител (в случая ФПЧ).

На графиките от Фигура 9, са представени осреднените приноси на различни процеси (HADV, ZADV, HDIF, VDIF, EMIS, DDEP, CLDS, CHEM, AERO), водещи до изменението на концентрацията на ФПЧ, осреднени за София и България.

А) България



Б) София



Фиг. 9. Годишно и сезонно осреднени приземни приноси на процесите водещи до изменението на концентрациите на ФПЧ (FPRM/CPRM) в $[(\mu\text{g}/\text{m}^3)/\text{h}]$ за А) България и Б) София.

Сумарното изменение на процесите (ΔC) е изобразено с черен цвят на всички графики и се вижда, че то е както с положителен, така и с отрицателен знак и има добре изразен денонощен ход. Стойностите на (ΔC) са различни през различните сезони и се определя от броя на процесите, които също са с различен знак и големина. За образуването на различните замърсители доминират различни приноси с различни стойности и именно това е проследено със следващите графики - кой принос на даден процес е доминиращ, по кое време на денонощието и с какъв знак.

За България: за изменението на концентрацията на FPRM основен положителен принос имат EMIS през целия ден и VADV сутрин и следобед. HADV има почти нулев принос, а VDIF има изцяло отрицателен принос през всички сезони. DDEP е с отрицателен принос с максимум около обяд. AERO през всички сезони имат положителен принос. Вижда се че доминантния процес тук са EMIS особено през

зимните месеци. Сумарното изменение (ΔC) водещо до изменението на концентрацията на FPRM има изцяло положителен знак, като единствено през обедните часове той става много близък до нула, дори отрицателен. За образуването на CPRM основен положителен принос имат химичните процеси (CHEM), чиито стойности са най-големи от всички други, с максимум през зимните месеци и VDIF с максимум около обяд. DDEP има изцяло отрицателен принос. Сумарното изменение на процесите (ΔC) е както с положителен, така и с отрицателен знак за CPRM.

За София: за изменението на концентрацията на FPRM основен положителен принос имат VDIF през целия ден и VADV около обяд. Приносът на VADV в сутрешните и следобедните часове е отрицателен. HADV е в противофаза на VADV. DDEP е с отрицателен принос с максимум около обяд. AERO през всички сезони с изключение на зимата са с отрицателен принос. За образуването на CPRM основен положителен принос имат CHEM, чиито стойности са най-големи от всички други, с максимум през зимните месеци. VDIF и DDEP имат изцяло отрицателен принос. VADV в обедните часове има малък положителен принос, а в следобедните и сутрешните, той е отрицателен. През зимата процесите са по-активни в сравнение с другите сезони и също така се откроява този сезон с голям положителен принос на EMIS и намаляващ до отрицателен принос на VDIF. Останалите процеси имат почти нулев принос. Сумарното изменение на процесите (ΔC) е както с положителен, така и с отрицателен знак за CPRM и предимно с отрицателен знак за FPRM.

Заклучение

Конструиран е климата на загърсяването с ФПЧ в различни мащаби, като се определиха и точки с особено неблагоприятно приземно загърсяване с ФПЧ. Изследвана е връзката на това загърсяване с метеорологичните условия. От получените резултати с компютърното моделиране беше изследван произхода на загърсяване с ФПЧ в град София, като се определиха източниците на загърсяване, също така и се изясни ролята на отделните динамични, химични и аерозолни процеси за формиране на загърсяване с ФПЧ.

Числено получените полета за концентрация на ФПЧ показват няколкократно превишаване на граничните стойности за концентрации основно в най-големия град в страната София.

Поведението на приземните концентрации, осреднени за целия ансамбъл годишно или за четирите сезона е разумно и демонстрира ефекти, които за повечето от съединенията могат да се обяснят от гледна точка на общоприетите схеми на динамични влияния (турбулентен транспорт, атмосферна стабилност), локални атмосферни циркулации или химични трансформации; Приземните концентрации на ФПЧ вероятно се дължат на приземните източници - най-вече на автомобилния транспорт; Инвентаризацията на емисиите на TNO е за 10 категории SNAP, които позволяват оценка и определяне на приноса на различни антропогенни дейности към цялостната картина на загърсяването. За всички категории емисии моделът на полетата за принос е доста сложен, което отразява конфигурацията на източника на

емисии, хетерогенността на топографията, използването на земята и метеорологични условия. Относителният принос на отделните типове източници на емисии към концентрацията на ФПЧ може да бъде доста различен. Приносът на различните категории емисии към приземните концентрации на ФПЧ има различен дневен ход и значение. Замърсяването на въздуха се формира в резултат на взаимодействието на различни процеси, така че познаването на приноса на всеки за различните процеси, метеорологични условия за дадена пространствена конфигурация на емисиите и временно поведение, са много полезни за разбирането на климата на замърсяването на въздуха, в частност климата на замърсяването с ФПЧ.

Резултатите, получени от “Integrated Processes Rate Analysis” демонстрират много сложното поведение и взаимодействие между различни процеси за FPRM и CPRM. По-нататъшен анализ на тези процеси, тяхната пространствена, денонощна и сезонна променливост и взаимодействие може да бъде полезен за обяснение на цялостната картина и произход на замърсяването в разглеждания регион. Общата промяна на концентрацията (ΔC), водеща до промяна в концентрацията, се определя главно от малък на брой доминиращи процеси, които имат големи стойности и могат да бъдат с противоположен знак и фази. Знакът на приноса на някои от процесите е очевиден, но някои от тях може да имат различен знак в зависимост от вида на емисиите, както и от метеорологичните условия и топография.

Благодарности

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Опазване на околната среда и намаляване на риска от неблагоприятни явления и природни бедствия“, одобрена с Решение на МС № 577/17.08.2018 г. и финансирана от МОН (Споразумение № Д01-363/17.12.2020). Специални благодарности на US EPA and US NCEP за предоставянето на свободни данни и софтуер и на Холандска организация за приложни научни изследвания (TNO) за предоставяне на Европейска инвентаризация на емисиите с висока разрешаваща способност.

Литература

- Byun, D., Ching, J., 1999. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. *EPA Report 600/R-99/030, Washington DC*. <http://www.epa.gov/asmdnerl/models3/doc/science/science.html>.
- Byun, D., J. Young, G. Gipson, J. Godowitch, F. S. Binkowski, S. Roselle, B. Benjey, J. Pleim, J. Ching, J. Novak, C. Coats, T. Odman, A. Hanna, K. Alapaty, R. Mathur, J. McHenry, U. Shankar, S. Fine, A. Xiu, and C. Jang, 1998. Description of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, *10th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA*, 11-16 January 1998, Phoenix, Arizona, pp. 264-268.
- CEP (2003). Sparse Matrix Operator Kernel Emission (SMOKE) Modeling System, *University of Carolina, Carolina Environmental Programs, Research Triangle Park, North Carolina*.

- Denier van der Gon, H., Visschedijk, A., van de Brugh, H., Droge, R., (2010). A high resolution European emission data base for the year 2005, *TNO-report TNO-034-UT-2010-01895 RPT-ML, Apeldoorn, The Netherlands*
- Dudhia, J., 1993. A non-hydrostatic version of the Penn State/NCAR Mesoscale Model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.* 121, pp. 1493-1513.
- EMEP/CORINAIR, 2002. Atmospheric emission inventory guidebook, third edition, European Environmental Agency. <http://reports.eea.europa.eu/EMEP/CORINAIR3/en/page002.html>
- EPA 2009. Technical assistance document for the reporting of daily air quality - the Air Quality Index (AQI). EPA- 454/B-09-001, *US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, North Carolina 27711.*
- Gadzhev G., K. Ganev, D. Syrakov, M. Prodanova and N. Miloshev 2013. Some Statistical Evaluations of Numerically Obtained Atmospheric Composition Fields in Bulgaria, in the *Proceedings of 15th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. 6-9 May 2013, Madrid, Spain, 373-377.
- Gadzhev, G., Ganev, K., Miloshev, N., Syrakov, D., Prodanova, M. 2014a. Some basic facts about the atmospheric composition in Bulgaria - Grid computing simulations. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8353 LNCS, pp. 484-490.
- Gadzhev, G., Ganev, K., Miloshev, N., Syrakov, D., Prodanova, M. 2014b. Analysis of the processes which form the air pollution pattern over Bulgaria. *Lecture Notes in Computer Science (subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8353 LNCS, pp. 390-396.
- Gadzhev G., Ganev K., Miloshev N. 2015a. Numerical study of the atmospheric composition climate of Bulgaria – validation of the computer simulation results. *Int. J. Environment and Pollution*, Vol. 57, Nos. 3/4, pp. 189-201.
- Gadzhev, G., Ganev, K., Miloshev, N., Syrakov, D., Prodanova, M. 2015b. HPC simulations of the fine particulate matter climate of Bulgaria. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8962, pp. 178-186.
- Gadzhev G., Ganev K., Mukhtarov P., 2020. Statistical Moments Of The Vertical Distribution Of Air Pollution Over Bulgaria. *I. Lirkov and S. Margenov (Eds. (sad) LSSC 2019, LNCS 11958*, pp. 213–219, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41032-2_24
- Gadzhev G., Ganev K., Mukhtarov P., 2021a. HPC Simulations of the Atmospheric Composition Bulgaria's Climate (on the example of coarse particulate matter pollution), *HPC 2019, SCI 902*, pp. 221-233, (2021) https://doi.org/10.1007/978-3-030-55347-0_19
- Gadzhev G., V. Ivanov, K. Ganev, 2021b. Modelling of dry and wet deposition processes for the Sulphur and Nitrogen compounds over Bulgaria, *The 20th conference on „Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes“* was held in Tartu, Estonia, in June 2021.
- Gadzhev G. and K. Ganev., 2018a. VERTICAL STRUCTURE OF SOME POLLUTANT OVER BULGARIA - OZONE AND NITROGEN DIOXIDE. *SGEM 2018*, 18, 4.3, (2018), ISBN:978-619-7408-70-6, ISSN:1314-2704, DOI:10.5593/sgem2018/4.3, pp. 449-454.
- Gadzhev G. and K. Ganev., 2018b. Vertical structure of atmospheric composition fields over Bulgaria, *International Conference on „Numerical Methods for Scientific Computations and Advanced Applications“ (NMSCAA'18)*, Hisarya. Bulgaria, 27 – 31 May 2018, pp. 38-41.

- Gadzhev G. and K. Ganev., 2019. VERTICAL STRUCTURE OF AIR POLLUTANT FIELDS OVER BULGARIA, *19th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (Harmo'19)* 3-6 June 2019, Bruges, Belgium.
- Gadzhev G. and V. Ivanov, 2020. MODELLING OF THE SULPHUR AND NITROGEN DEPOSITIONS OVER THE BALKAN PENINSULA BY CMAQ AND EMEP-MSC-W – PRELIMINARY RESULTS, (2020), *Proceeding of 1st International conference on ENVIRONMENTAL protection and disaster RISKS*, 29-30 September 2020, Sofia, Bulgaria, ISBN 978-619-7065-38-1, pp. 90-100, <https://doi.org/10.48365/envr-2020.1.8>
- Gadzhev G. and V. Ivanov, 2021. Modelling of the Seasonal Sulphur and Nitrogen Depositions over the Balkan Peninsula by CMAQ and EMEP-MSC-W, N. Dobrinkova and G. Gadzhev (eds.), *Environmental Protection and Disaster Risks, Studies in Systems, Decision and Control 361*, (2021), pp. 171 – 183, https://doi.org/10.1007/978-3-030-70190-1_12
- Gadzhev, G., 2018. Recurrence of Air Quality for the city of Sofia for 2013 and 2014, *Bulgarian Geophysical Journal*, 41, 46-58.
- Gadzhev, G., 2020. PRELIMINARY RESULTS FOR THE RECURRENCE OF AIR QUALITY INDEX FOR THE CITY OF SOFIA FROM 2008 TO 2019, *Proceeding of 1st International conference on ENVIRONMENTAL protection and disaster RISKS*, 29-30 September 2020, Sofia, Bulgaria, ISBN 978-619-7065-38-1, 53-64, <https://doi.org/10.48365/envr-2020.1.5>
- Gadzhev, G., 2021. The Seasonal Recurrence of Air Quality Index for the Period 2008-2019 Over the Territory of Sofia City, Dobrinkova and G. Gadzhev (eds.), *Environmental Protection and Disaster Risks, Studies in Systems, Decision and Control 361*, 161–170, https://doi.org/10.1007/978-3-030-70190-1_11
- Georgieva, I., Gadzhev, G., Ganev, K., Prodanova, M., Syrakov, D., Miloshev, N. 2014. Numerical study of the air quality in the city of Sofia -Some preliminary results. *Int. J. Environment and Pollution*, Vol. 57, Nos. 3/4, pp. 162-174.
- Georgieva, I., Gadzhev, G., Ganev, K., Prodanova, M., Syrakov, D., Miloshev, N. 2015. Numerical study of the Air Quality in the city of Sofia, *8th Congress of the Balkan Geophysical Society, BGS 2015*.
- Georgieva, I and Ivanov V. 2017. Air Quality Index Evaluations for Sofia city, *IEEE EUROCON 2017 – 17th IEEE International Conference on Smart Technologies, IEEE EUROCON 2017*, pp. 920-925.
- Georgieva, I., Ivanov, I., 2018. Computer simulations of the impact of air pollution on the quality of life and health risks in Bulgaria, *Int. J. Environment and Pollution*, Vol. 64, Nos. 1/3, 2018, pp. 35-46.
- Leeuw, F. de, Mol, W., (2005). Air Quality and Air Quality Indices: a world apart. ETC/ACC *Technical Paper 2005/5* http://acm.eionet.europa.eu/docs/ETCACC_TechPaper_2005_5_AQ_Indices.pdf
- Shamarock et al., 2007. “A description of the Advanced Research WRF Version 2”, http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf
- Schwede, D., G. Pouliot, and T. Pierce 2005. Changes to the Biogenic Emissions Inventory System Version 3 (BEIS3), *Proc. of 4th Annual CMAS Models-3 Users's Conference*, September 26-28, 2005, Chapel Hill, NC.
- Syrakov, D., Etropolska, I., Prodanova, M., Ganev, K., Miloshev, N., Slavov, K., 2012. Operational Pollution Forecast for the Region of Bulgaria, *American Institute of Physics, Conf. Proc.* 1487, p. 88 - 94; DOI: 10.1063/1.4758945.
- Syrakov, D., Etropolska, I., Prodanova, M., Slavov, K., Ganev, K., Miloshev, N., Ljubenov T., 2013. Downscaling of Bulgarian Chemical Weather Forecast from Bulgaria region to

- Sofia city, *American Institute of Physics, Conf. Proc.* 1561, p. 120-132, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4827221>.
- Syrakov, D., Prodanova, M., Etropolska, I., Slavov, K., Ganey, K., Miloshev, N., Ljubenov T., 2014a. A multy-domain operational chemical weather forecast system, *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Volume 8353 LNCS, 2014, Pages 413-420.
- Syrakov, D., Prodanova, M., Georgieva, E., Etropolska, I., Slavov, K., 2014b. Impact of NOx emissions on air quality simulations with the Bulgarian WRF-CMAQ modelling system, *HARMO 2014 - 16th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Proceedings* 2014, Pages 187-190.
- Syrakov, D., Prodanova, M., Georgieva, E., Etropolska, I., Slavov, K., 2015. Impact of NOx emissions on air quality simulations with the Bulgarian WRF-CMAQ modelling system, *International Journal of Environment and Pollution*, Volume 57, Issue 3-4, 2015, Pages 285-296.

Fine particles (pm) air pollution - analysis of the results of computer simulations for bulgaria and sofia city

I. Georgieva and N. Miloshev

Abstract. Recently, in the study of air pollution, special attention has been paid to particulate matter (PM) because of great importance for the quality of life and Human Health (HH). The topic is especially relevant for Bulgaria and Sofia city, where the situation is especially severe regarding PM concentrations, where several times exceeded the limit values for concentrations. The research aims to provide a statistically reliable assessment of the atmospheric composition climate, particularly PM surface concentrations, the role in forming the Air Quality Index, and the relationship with the processes that determine. The following results are presented in the paper: Analysis of the spatial and temporal variability of the PM concentrations fields and behavior, the establishment of the connections with meteorological conditions and the pollution sources; Enrichment knowledge about the interactions of the processes forming the PM pollution; Highlighting cases with the most unfavorable PM pollution - „hot spots“ and the most unfavorable synoptic episodes, and clarifying the role of meteorological conditions and local processes.

СЕЗОННА И ГОДИШНА ПОВТОРЯЕМОСТ НА ИНДЕКСИТЕ ЗА КАЧЕСТВОТО НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ ЗА РАЙОНА НА ГРАД СОФИЯ

И. Георгиева

¹ Национален Институт по Геофизика, Геодезия и География, Българска Академия на Науките, ул. Акад. Георги Бончев, блок 3, София, България, e-mail: iivanova@geophys.bas.bg

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.2

Абстракт. Със средствата за 3D моделиране е създадена обширна база данни, която се използва в България за различни изследвания за състава на атмосферата. Всички тези изследвания са проведени с достатъчно голяма разрешаваща способност и с помощта на най-съвременните инструменти за моделирани, а именно модели от световно използваната система US EPA Model-3. Благодарение на това, са проведени задълбочени проучвания на климата на атмосферния състав в страната със специален фокус върху градска среда. Изчислен е статистически значим ансамбъл за индекс на замърсяване (ИЗ), като е определена и неговата пространствена и времева променливост както и типичната му повтораемост за територията на град София. ИЗ оценява въздействието на качеството на атмосферния въздух върху човешкото здраве и дава директна оценка на ефектите от атмосферните замърсители. Всички оценки на ИЗ са получени на база концентрации на замърсители в атмосферата, получени чрез числени симулации.

Ключови думи: замърсяване на атмосферния въздух, индекс на замърсяване, доминантни замърсители.

Въведение

В настоящата работа са проведени детайлни изследвания относно ИЗ и влиянието му върху човешкото здраве. Изследванията са надеждни и изчерпателни, поради използването на статистически значими ансамбли от компютърно симулирани данни, които отразяват многообразието на метеорологични условия с тяхната типична повтораемост, съчетани с компютърно симулираните данни за концентрации на замърсители, позволяват надеждни изводи относно техните характерни

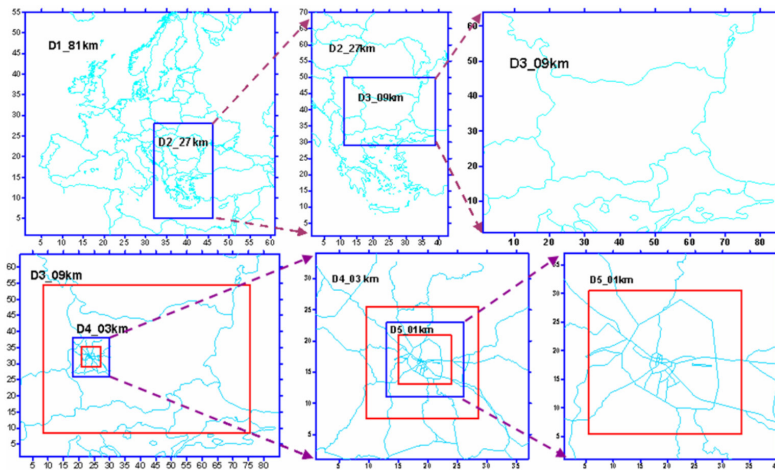
особености и поведение и влиянието им върху ИЗ. Изследванията са и детайлни, понеже са извършени с достатъчно висока пространствено/временна разрешаваща способност на полетата, която дава възможност да бъде отразен мултимасщабния характер на процесите. Извършени са изследвания за територията на град София, които отразяват нейната специфичната климатология и екология. Ансамблите, обхващащи симулации за период от 13 години (от 2008 до 2020 година), се смятат за статистически представителни и отразяват основните черти на локалния климат, на атмосферната динамика и на качеството на въздуха.

Изследванията за ИЗ са в рамките на Българската Система за Прогноза на Химичното Време (БГСПХВ) (Syrakov et al. 2013a, 2013b, 2014a). БГСПХВ изчислява и ИЗ, който дава интегрирана оценка на въздействието на замърсителите, директно измерващ ефектите върху човешкото здраве. Резултатите от дейността на БГСПХВ позволяват да се направят надеждни заключения за състоянието и поведението на атмосферния състав. Обобщаването и анализът на тези резултати, по-специално за ИЗ, неговото пространствено времево разпределение, както и определяне на доминантни замърсители е целта на настоящата работа.

Методология

В България заедно с числената прогноза на времето, работи системата за прогноза на химичното време – БГСПХВ. Системата е автоматична и се базира на световно известните числени модели WRF (мезометеорологичен прогностичен модел) <http://www.wrf-model.org/>, Skamarock et al. (2007), Dudhia, J. (1993), CMAQ (дисперсионен модел с отчитане на атмосферната химия) Byun and Ching (1999), Byun et al. (1998) и SMOKE <http://www.smoke-model.org/>, CEP (2003). Моделите на които е базирана системата разполагат с различна физическа основа, и са приспособени към многообразието на мащабите на пренос - от глобален до локален мащаб в много различни разработени за състава на атмосферата в България (Gadzhev et al. 2013a, 2014a, 2014b, 2015a, 2015b, 2020, 2021a, 2021b), (Gadzhev G. and K. Ganeyev., 2018a, 2018b, 2019), (Gadzhev G. and V. Ivanov 2020, 2021). Използван е телескопният подход (нестинг) с увеличение на разделителната способност на симулациите от 81 км за Европа, до 1 км за територията на град София, Фигура 1. Емисионните данни за големите области са подготвени от Холандската организация за приложни научни изследвания (TNO) за 2010 г. (Denier van der Gon et al., 2010), а за България и по-малките области се използва Националната инвентаризация на емисиите, предоставена от Българската изпълнителна агенция по околна среда, подготвена от МОСВ.

На база получените концентрации от компютърното моделиране БГСПХВ изчислява ИЗ, по подобие на Британският дневен индекс за качество на въздуха (Leeuw, F. de, Mol, W., 2005), използван и в България (Syrakov et al. 2012, 2013a, 2014a, 2014b, 2015), (Gadzhev, G., 2018, 2020, 2021), (Georgieva et al. 2014, 2015), (Georgieva, I. and Ivanov, V., 2017, 2018).



Фиг. 1. Телескопизация на метеорологична (WRF) и химична (CMAQ) прогноза от област Европа (81 км) до София град (1 км).

Основните замърсители, върху чиято база се изчислява индекса са 5: Озон (O_3), Азотен диоксид (NO_2), Серен диоксид (SO_2), Въглероден оксид (CO), и Прахови частици (PM_{10} – Прахови частици, които са финни с диаметър между 2.5 and 10 микрометра). Граничните стойности между ИЗ са определени за всеки замърсител поотделно, като за всеки конкретен случай концентрацията на дадения замърсител попада в една от категориите („Ниско“, „Средно“, „Високо“ и „Много Високо“) и се определя ИЗ за всеки замърсител Фигура 2. Обобщеният ИЗ е за всеки замърсител, при който в дадения случай индекса попада в най високата категория. Замърсителят, който определя общия ИЗ за дадения конкретен случай, се дефинира като „доминантен замърсител“.

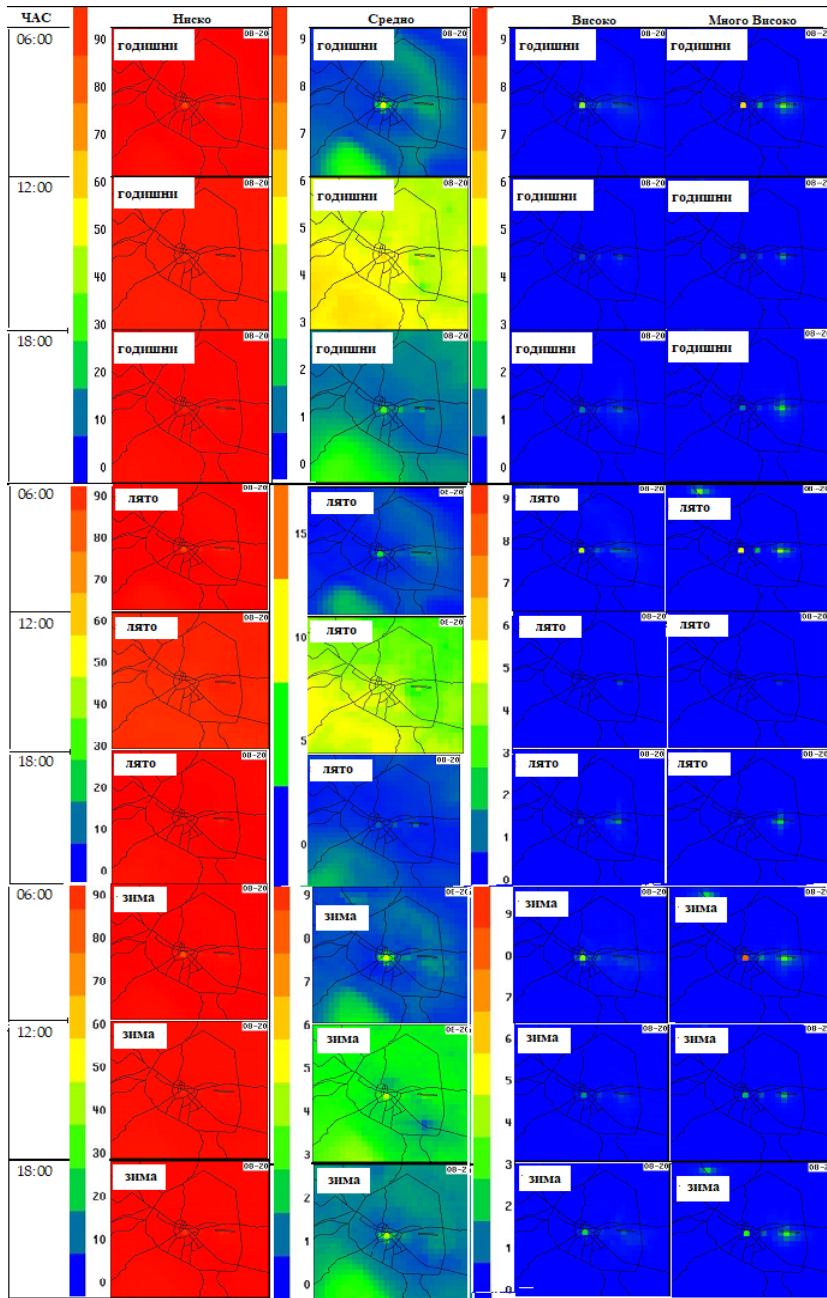
Категория		O_3	NO_2	SO_2	CO	PM_{10}
индекс		$\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$	$\mu g/m^3$
Ниско	1	0-32	0-95	0-88	0-3.8	0-21
	2	33-66	96-190	89-176	3.9-7.6	22-42
	3	67-99	191-286	177-265	7.7-11.5	43-64
Средно	4	100-126	287-381	266-354	11.6-13.4	65-74
	5	127-152	382-477	355-442	13.5-15.4	75-86
	6	153-179	478-572	443-531	15.5-17.3	87-96
Високо	7	180-239	573-635	532-708	17.4-19.2	97-107
	8	240-299	636-700	709-886	19.3-21.2	108-118
	9	300-359	701-763	887-1063	21.3-23.1	119-129
Много Високо	10	> 360	> 764	> 1064	> 23.2	> 130

Фиг. 2. Граничните стойности между индекса за всеки замърсител.

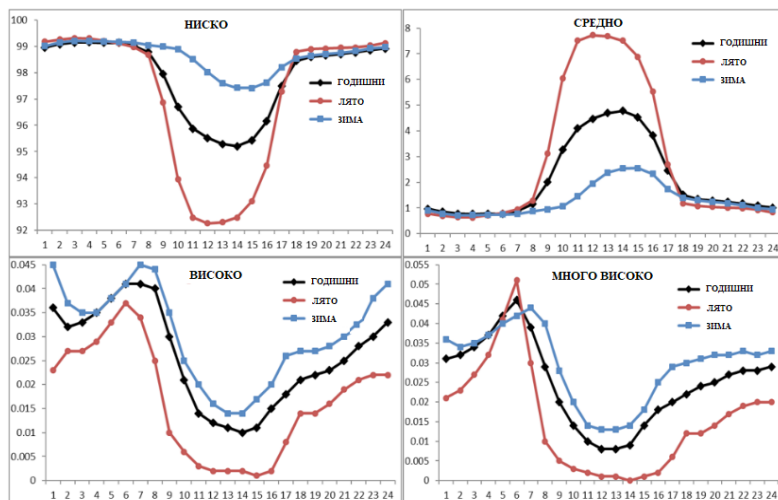
Представените резултати в настоящата статия са за изчисления ИЗ, неговата годишна и сезонна повторяемост както и определяне на доминантните замърсители определящи съответната категория и тяхното разпределение и повторяемост, за целия период на симулации от 2008-2020 година.

Резултати

Представените резултати в статията са относно поведението на ИЗ осреднени за територията на град София. Представени са полета на ИЗ групирани по категории, като са избрани часове от денонощие, които се смятат за представителни и отразяващи денонощния ход. Фигура 3 презентира полета на годишни и сезонни вариации на повторяемостта на категориите („Ниско“, „Средно“, „Високо“ и „Много Високо“) на ИЗ, осреднени върху целия домейн. Повтаряемостта на категория „Ниско“ е около 90-99% върху цялата територия, през целия ден и през всички сезони. Останалите 10% от случаите са разпределени между другите категории. Може да се забележи някакъв дневен ход в категория „Средно“ с повторяемост над 10% през лятото и около 3-5% през зимните месеци и годишните полета. Високата повторяемост през летните месеци в тази категория се дължи предимно на разпределението на O_3 . Поведението на приземният O_3 е сложно и над България, до голяма степен то се дължи на пренос от чужбина (Gadzhev et al. 2013b). Поради този факт, както и поради O_3 фотохимични реакции, концентрациите на O_3 в сутрешните часове са по-ниски (заради слаб турбулентен транспорт от по-високите нива) и високи по обяд и следобедните часове. За категориите „Високо“ и „Много Високо“, полетата показват ниска повторяемост, но въпреки това разпределението в сутрешните и следобедните часове, особено през зимата е такова, че състоянието на атмосферния въздух е влошено. Категорията „Много Високо“ има повторяемост която достига до 10% в някои точки от града, в сутрешните часове. Високата повторяемост на категориите „Високо“ и „Много Високо“ през зимата са главно поради стабилността на атмосферата през тези месеци, което от своя страна води до възпрепятстване на турбулентността и така замърсителите са затруднени да се изкачват във височина и по често се задържат на приземно ниво. На Фигура 4, са представени графики отразяващи отново разпределението на повторяемостта на категориите на ИЗ, но този път много добре се описва денонощният им ход. Отново се вижда повторяемостта на категория „Ниско“ от 90-99% за целия домейн и през всички сезони, като тук вече може ясно да се очертае и локален минимум в обедните часове, като най-голям той е през лятото, а най-малък през зимата. Напълно противоположно е разпределението на повторяемостта в следващата категория „Средно“, където се вижда ясен максимум около обяд, почти 8% през лятото и 3-5% през зимата и на годишно осреднените резултати. Както вече беше споменато и по нагоре, причините за това са O_3 концентрации и разпределение. При категориите „Високо“ и „Много Високо“, повторяемостта е сравнително ниска, като се открояват два максимума в сутрешните и следобедните часове (интензивен пътен трафик), и особено през зимата, поради стабилността на атмосферата.

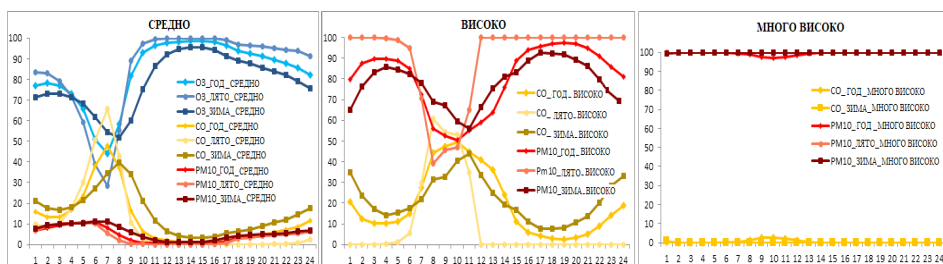


Фиг. 3. Годишна/сезонна повторяемост на категориите на ИЗ (%) за територията на гр. София, за период 2008-2020г в избраните часове (06:00, 12:00, 18:00 GMT).



Фиг. 4. Годишни/сезонни „типични“ дневни вариации (в %) на повторяемостта на ИЗ за всяка категория, осреднени за София град за периода 2008-2020 г.

Фигура 5 представя графики отразяващи повторяемостта на случаите, в които даден замърсител доминира при всяка една от категориите. Както вече беше споменато в Методологията, ИЗ се изчислява и определя на база 5 замърсителя и именното тези 5 замърсителя са разгледани в следващите графики, като е определено кой от е доминиращ за въпросната категория. Повечето от случаите, както стана ясно от предните две фигури, са разпределени в категория „Ниско“, а само 10% са разпределени в категориите „Средно“, „Високо“ и „Много Високо“. Поради тази причина тук категория „Ниско“ не е представена и фокусът пада върху така наречените „лоши“ категории. За категория „Средно“ ясно се вижда, че водещият замърсител е O_3 , с най-високи стойности през лятото. O_3 е доминиращ замърсител през по-голямата част от деня, освен рано сутрин. В сутрешните часове с около 50% вероятност доминира CO и с 10% вероятност се вижда и разпределение на PM_{10} .



Фиг. 5. Годишна/сезонна повторяемост (%) на случаите в които всеки замърсител доминира при образуването на всяка категория за територията на София за периода 2008-2020 г.

За категориите „Високо“ и „Много Високо“, O_3 няма никаква повторяемост, което показва че за тези две категории отговорни са другите замърсители. Вижда се, че за категория „Високо“ доминира предимно PM_{10} с почти 100% повторяемост, сутрин и следобед и около 50% по обяд. Вторият доминантен замърсител за тази категория е CO , с повторяемост около 50% по обяд и 10-20% сутрин и следобед. За категория „Много Високо“ основен доминиращ замърсител е PM_{10} с повторяемост от 100% през целия ден и всички сезони.

Заключение

Резултатите от числените симулации показват, че ИЗ попада предимно в две категории – „Ниско“ и „Средно“. Въпреки това, повторяемостта на случаите с високо замърсяване достигат до 10% за някои точки по територията на град София.

Повторяемостта на категория „Ниско“ е над 90% над целия град, през целият ден и през всички сезони. Високата повторяемост на категория „Средно“ е предимно по обедните часове и през лятото, като се дължи главно на O_3 концентрации.

За категориите „Високо“ и „Много Високо“, висока повторяемост се наблюдава през зимните месеци в сутрешните и следобедните часове, когато е и най-интензивен автомобилният трафик в натоварените часове и заради по-често стабилната атмосфера през зимата (възпрепятстван турбулентен транспорт на замърсителите във височина).

Резултатите за повторяемостта на различните замърсители водещи до формирането на всяка категория показват, че O_3 и CO са доминиращи замърсители за категория „Средно“, PM_{10} е единствения доминиращ замърсител със 100% повторяемост за категория „Много Високо“.

Освен тези общи характеристики, климатичното поведение на вероятностите на ИЗ е доста сложно, със значителна пространствена, сезонна и денонощна вариационност. Районите с по-занижено качество на атмосферния въздух, не са непременно свързани с големите източници на замърсяване. Широките крайградски и дори планински райони също могат да имат значителна повторяемост на ИЗ в категория „Средно“.

Благодарности

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Опазване на околната среда и намаляване на риска от неблагоприятни явления и природни бедствия“, одобрена с Решение на МС № 577/17.08.2018 г. и финансирана от МОН (Споразумение № Д01-363/17.12.2020). Специални благодарности на US EPA and US NCEP за предоставянето на свободни данни и софтуер и на Холандска организация за приложни научни изследвания (TNO) за предоставяне на Европейска инвентаризация на емисиите с висока разрешаваща способност.

Литература

- Byun, D., Ching, J., 1999. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA Report 600/R-99/030, Washington DC. <http://www.epa.gov/asmdnerl/models3/doc/science/science.html>.
- Byun, D., J. Young, G. Gipson, J. Godowitch, F. S. Binkowski, S. Roselle, B. Benjey, J. Pleim, J. Ching, J. Novak, C. Coats, T. Odman, A. Hanna, K. Alapaty, R. Mathur, J. McHenry, U. Shankar, S. Fine, A. Xiu, and C. Jang, 1998. Description of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, 10th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA, 11-16 January 1998, Phoenix, Arizona, pp. 264-268.
- CEP (2003). Sparse Matrix Operator Kernel Emission (SMOKE) Modeling System, University of Carolina, Carolina Environmental Programs, Research Triangle Park, North Carolina.
- Denier van der Gon, H., Visschedijk, A., van de Brugh, H., Droge, R., (2010). A high resolution European emission data base for the year 2005, TNO-report TNO-034-UT-2010-01895 RPT-ML, Apeldoorn, The Netherlands.
- Dudhia, J., 1993. A non-hydrostatic version of the Penn State/NCAR Mesoscale Model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. *Mon. Wea. Rev.* 121, pp. 1493-1513. <http://www.wrf-model.org/>
- Gadzhev G., K. Ganev, D. Syrakov, M. Prodanova and N. Miloshev 2013a. Some Statistical Evaluations of Numerically Obtained Atmospheric Composition Fields in Bulgaria, in the Proceedings of 15th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes. 6-9 May 2013, Madrid, Spain, 373-377.
- Gadzhev, G., Ganev, K., Miloshev, N., Syrakov, D., Prodanova, M.: Numerical, 2013b. Study of the Atmospheric Composition in Bulgaria, *Computers and Mathematics with Applications* 65, 402-422.
- Gadzhev, G., Ganev, K., Miloshev, N., Syrakov, D., Prodanova, M. 2014a. Some basic facts about the atmospheric composition in Bulgaria - Grid computing simulations. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8353 LNCS, pp. 484-490
- Gadzhev, G., Ganev, K., Miloshev, N., Syrakov, D., Prodanova, M. 2014b. Analysis of the processes which form the air pollution pattern over Bulgaria. *Lecture Notes in Computer Science (subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8353 LNCS, pp. 390-396.
- Gadzhev G., Ganev K., Miloshev N. 2015a. Numerical study of the atmospheric composition climate of Bulgaria – validation of the computer simulation results. *Int. J. Environment and Pollution*, Vol. 57, Nos. 3/4, pp. 189-201.
- Gadzhev, G., Ganev, K., Miloshev, N., Syrakov, D., Prodanova, M. 2015b. HPC simulations of the fine particulate matter climate of Bulgaria. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8962, pp. 178-186.
- Gadzhev G., Ganev K., Mukhtarov P., 2020. Statistical Moments Of The Vertical Distribution Of Air Pollution Over Bulgaria. I. Lirkov and S. Margenov (Eds. (sad) LSSC 2019, LNCS 11958, pp. 213–219, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41032-2_24
- Gadzhev G., Ganev K., Mukhtarov P., 2021a. HPC Simulations of the Atmospheric Composition Bulgaria's Climate (on the example of coarse particulate matter pollution), HPC 2019, SCI 902, pp. 221-233, (2021) https://doi.org/10.1007/978-3-030-55347-0_19

- Gadzhev G., V. Ivanov, K. Ganev, 2021b. Modelling of dry and wet deposition processes for the Sulphur and Nitrogen compounds over Bulgaria, The 20th conference on „Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes“ was held in Tartu, Estonia, in June 2021.
- Gadzhev G. and K. Ganev., 2018a. VERTICAL STRUCTURE OF SOME POLLUTANT OVER BULGARIA - OZONE AND NITROGEN DIOXIDE. SGEM 2018, 18, 4.3, (2018), ISBN:978-619-7408-70-6, ISSN:1314-2704, DOI:10.5593/sgem2018/4.3, pp. 449-454.
- Gadzhev G. and K. Ganev., 2018b. Vertical structure of atmospheric composition fields over Bulgaria, International Conference on „Numerical Methods for Scientific Computations and Advanced Applications“ (NMSCAA'18), Hisarya. Bulgaria, 27 – 31 May 2018, pp. 38-41.
- Gadzhev G. and K. Ganev., 2019. VERTICAL STRUCTURE OF AIR POLLUTANT FIELDS OVER BULGARIA, 19th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (Harmo'19) 3-6 June 2019, Bruges, Belgium.
- Gadzhev G. and V. Ivanov, 2020. MODELLING OF THE SULPHUR AND NITROGEN DEPOSITIONS OVER THE BALKAN PENINSULA BY CMAQ AND EMEP-MSC-W – PRELIMINARY RESULTS, (2020), Proceeding of 1st International conference on ENVIRONMENTAL protection and disaster RISKS, 29-30 September 2020, Sofia, Bulgaria, ISBN 978-619-7065-38-1, pp. 90 – 100, <https://doi.org/10.48365/envr-2020.1.8>
- Gadzhev G. and V. Ivanov, 2021. Modelling of the Seasonal Sulphur and Nitrogen Depositions over the Balkan Peninsula by CMAQ and EMEP-MSC-W, N. Dobrinkova and G. Gadzhev (eds.), Environmental Protection and Disaster Risks, Studies in Systems, Decision and Control 361, (2021), pp. 171 – 183, https://doi.org/10.1007/978-3-030-70190-1_12
- Gadzhev, G., 2018. Recurrence of Air Quality for the city of Sofia for 2013 and 2014, Bulgarian Geophysical Journal, 41, 46–58.
- Gadzhev, G., 2020. PRELIMINARY RESULTS FOR THE RECURRENCE OF AIR QUALITY INDEX FOR THE CITY OF SOFIA FROM 2008 TO 2019, Proceeding of 1st International conference on ENVIRONMENTAL protection and disaster RISKS, 29-30 September 2020, Sofia, Bulgaria, ISBN 978-619-7065-38-1, 53 – 64, <https://doi.org/10.48365/envr-2020.1.5>
- Gadzhev, G., 2021. The Seasonal Recurrence of Air Quality Index for the Period 2008-2019 Over the Territory of Sofia City, Dobrinkova and G. Gadzhev (eds.), Environmental Protection and Disaster Risks, Studies in Systems, Decision and Control 361, 161–170, https://doi.org/10.1007/978-3-030-70190-1_11
- Georgieva, I., Gadzhev, G., Ganev, K., Prodanova, M., Syrakov, D., Miloshev, N. 2014. Numerical study of the air quality in the city of Sofia -Some preliminary results. Int. J. Environment and Pollution, Vol. 57, Nos. 3/4, pp, 162-174.
- Georgieva, I., Gadzhev, G., Ganev, K., Prodanova, M., Syrakov, D., Miloshev, N. 2015. Numerical study of the Air Quality in the city of Sofia, 8th Congress of the Balkan Geophysical Society, BGS 2015.
- Georgieva, I and Ivanov V. 2017. Air Quality Index Evaluations for Sofia city, IEEE EUROCON 2017 – 17th IEEE International Conference on Smart Technologies, IEEE EUROCON 2017, pp. 920-925.
- Georgieva, I., Ivanov, I., 2018. Computer simulations of the impact of air pollution on the quality of life and health risks in Bulgaria, Int. J. Environment and Pollution, Vol. 64, Nos. 1/3, 2018, pp. 35-46.
- Leeuw, F. de, Mol, W., (2005). Air Quality and Air Quality Indices: a world apart. ETC/ACC Technical Paper 2005/5 http://acm.eionet.europa.eu/docs/ETCACC_TechPaper_2005_5_AQ_Indices.pdf

- Shamarock et al., 2007. "A description of the Advanced Research WRF Version 2", http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf
- Syrakov, D., Etropolska, I., Prodanova, M., Ganev, K., Miloshev, N., Slavov, K., 2012. Operational Pollution Forecast for the Region of Bulgaria, American Institute of Physics, Conf. Proc. 1487, p. 88 - 94; DOI: 10.1063/1.4758945
- Syrakov, D., Etropolska, I., Prodanova, M., Slavov, K., Ganev, K., Miloshev, N., Ljubenov T., 2013a. Downscaling of Bulgarian Chemical Weather Forecast from Bulgaria region to Sofia city, American Institute of Physics, Conf. Proc. 1561, p. 120-132, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4827221>
- Syrakov, D., Prodanova, M., Slavov, K., Etropolska, I., Ganev, K., Miloshev, N., Ljubenov, T. 2013b. Bulgarian System for Air Pollution Forecast. J. Int. Sci. Publ.: Ecol. Saf., 7 (1), 325-334. Syrakov, D., Prodanova, M., Etropolska, I., Slavov, K., Ganev, K., Miloshev, N., Ljubenov, T. (2014a). A Multi- Domain Operational Chemical Weather Forecast System. In: Lirkov I. et al. (eds.) Large-Scale 52 Dimitir Syrakov, Maria Prodanova1, Emilia Georgieva Scientific Computing, LNCS 8353, 413–420. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Syrakov, D., Prodanova, M., Etropolska, I., Slavov, K., Ganev, K., Miloshev, N., Ljubenov T., 2014a. A multy-domain operational chemical weather forecast system, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), Volume 8353 LNCS, 2014b, Pages 413-420.
- Syrakov, D., Prodanova, M., Georgieva, E., Etropolska, I., Slavov, K., 2014b. Impact of NOx emissions on air quality simulations with the Bulgarian WRF-CMAQ modelling system, HARMO 2014 - 16th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Proceedings 2014, Pages 187-190.
- Syrakov, D., Prodanova, M., Georgieva, E., Etropolska, I., Slavov, K., 2015. Impact of NOx emissions on air quality simulations with the Bulgarian WRF-CMAQ modelling system, International Journal of Environment and Pollution, Volume 57, Issue 3-4, 2015, Pages 285-296.

Annual and seasonal recurrence of the air quality index for the territory of sofia city

I. Georgieva

Abstract. Based on 3D modelling tools, an extensive database was created and used for different studies of atmospheric composition. All the simulations were conducted with a sufficiently high resolution and with the help of the most modern modeling tools, models from the globally used US EPA Model-3 system. This gave the opportunity to conduct extensive studies on a fully competitive modern level of the climate of atmospheric composition in the country with special focus on urban area. A statistically significant ensemble of Air Quality indexes (AQI) was calculated, and their typical recurrence, space, and temporal variability for the territory of the Sofia city was constructed. The AQ impact on human health is evaluated in terms of AQI, which gives an integrated assessment of the impact of pollutants. All the AQI evaluations are based on air pollutants concentrations obtained from the numerical modelling.

СИЛНИ, РАЗРУШИТЕЛНИ ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ, РЕАЛИЗИРАНИ НА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ СЛЕД 1900 Г.

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

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

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.3

Резюме: За сеизмично активните райони в света земетресенията са неделима част от околната среда (природата) и няма област от Земята, която да не е засегната (до известна степен) от този природен феномен. Земетресенията са израз на продължаващата еволюция на планетата Земя. Територията на България (разположена в източната част на Балкански полуостров) безусловно се числи към земетръсно опасните области на Земята. От сеизмологична гледна точка, България е част от Алпо - Хималайския сеизмичен пояс, характеризиращ се с високо ниво на сеизмичната активност. През изминалите векове територията на България е била подложена на силни сеизмични въздействия. В началото на 20^{ти} век (от 1901 до 1928 г.) на територията на България са реализирани едни от най-силните европейски земетресения. След 1928 г. настъпва затишие, продължаващо до наши дни. В настоящото изследване са представени 6^{те} най-силни земетресения, реализирани в земите на България след 1900 г.

Ключови думи: силни земетресения, магнитуд, интензивност

Въведение

Земетресенията и последствията от тях са най-катастрофалните природни бедствия. Това се обуславя от спецификата на явлението земетресение – краткотрайно и силно въздействие с изключително не хуманни последствия върху голяма територия.

В много от земетръсно застрашените страни, включително и в България, има надеждно решение на най-важната част от прогнозната задача - къде и колко силни земетресения могат да се очакват. Използването на такива оценки и съвременните

методи на сеизмичното инженерство могат да намалят в много голяма степен щетите и жертвите при реализация на земетресение.

Сеизмичността, генерирана на територията на България е неравномерно разпределена в пространството и времето.

Неравномерното времево разпределение на сеизмичността, например отсъствие на силни земетресения през последните повече от 90 години, може да доведе до подценяване и дори пренебрегване на сеизмичната опасност.

В пространството земетресенията се концентрират в определени географски области, наречени сеизмогенни зони. Всяка една от тези зони се характеризира със своя специфика в сеизмотектонски, геоложки и геофизичен аспект. Сеизмичността, генерирана на територията на България и околностите може да бъде асоциирана към сеизмогенните зони, дефинирани в множество изследвания (като например Sokerova et al., 1992; Dachev et al., 1995; Simeonova et al., 2006) на базата на пространственото разпределение на земетресенията, идентифицираните геоложки и геофизични структури, и на възможните огнищни зони, предложени в Boncev et al. (1982). Основните сеизмогенни зони (генерирани документирано, силни земетресения), идентифицирани на територията на България са: Кресна, София, Марица, Горна Оряховица и Шабла.

Земетресенията в сеизмогенните зони са плитко корови събития с дълбочина по - малко от 60 км ($h < 60$). От анализа на дълбочинното разпределение (Boncev et al., 1982; Sokerova et al., 1992; Dachev et al., 1995) е установено, че земетресенията са генерирани в Земната кора на дълбочина до 50 км. Хипоцентрите на земетресенията са локализирани предимно в горната част на кората (до 20-25 км).

Силни земетресения (с магнитуд по-голям или равен на 6.5, $M_w \geq 6.5$) са реализирани на територията на България през изминалите столетия. Първото добре документирано земетресение у нас е събитието от I век преди Христа, станало в Черно море, близо до гр. Каварна. Едни от най-силните европейски земетресения, станали през 20^{ти} век, са реализирани в България. С висока сеизмична активност се характеризира ЮЗ България през периода 1904-1906 г. През 1928 г., по долината на р. Марица (в централната част на Южна България) се реализира поредица от силни земетресения.

След 1928 г. земетресения с магнитуд $M_w \geq 6.5$ не са реализирани на територията на страната.

Силни земетресения, реализирани на територията на България в началото на 20^{ти} век

Земетресение от 31 март 1901 г., генерирано в сеизмогенна зона Шабла

Изявената сеизмичност в тази зона е израз на неоген/кватернерната активност на разломна система в направление ССИ-ЮЮЗ, свързана с формирането на Западно-Черноморския задлъгов маргинален рифтогенен басейн. Най-силните земетресения се смята, че са свързани с Калиакренския разлом, който е идентифициран по данни от сондажи и сеизмичното профилиране в Черно море.

Първото добре документирано историческо земетресение е събитието от I век преди Христа, станало в Черно море, близо до град Каварна в сеизмогенна зона Шабла.

Най-силното земетресение в тази зона, реализирано през XX век е събитието от 31 март 1901 г. (с интензивност $I_0=10$ МШК и магнитуд по сеизмичен момент $M_w=7.1$) с епицентър в морето на около 20 км южно от нос Калиакра. След събитието пропада брегът между Калиакра и Балчик. Пропадането е с размер около 200 декара.

Силно засегнати са селищата Калиакра, Камен бряг, Тюленово, Българево, Балчик, Каварна и Шабла. Последствията от земетресението са описани в работата на Спас Вацов от 1902 г. (Вацов, 1902).

„Попукаха се къщи, изпопадаха много комини и стени... В Каварна 28 къщи разпукани и съборени...Църквата, новото и старото училище и частните здания в Шабла...На югозападната страна от Балчик съборена част от морския брег съ приблизително 200 декара лозя. Брегът продължава да се рони и пада в морето“ (Вацов, 1902).

Във вестник „Вечерна поща“ (брой 91 от март 1901) за Балчик е написано *„...Земята се разклати и покривите запръщеха; пропукаха се стени и някои зидове до основите; къщите цели затрепериха. ...Зданията се залюлеха, като да падат, и само хвърляха от себе си връхните си части; западаха комините съ страшен шум. Минаретът на джамията се провали, увисна на покрива; а горе по белите баури се вдигна мъгла от прах, те заиграха, пръста се срива в глух ропот!...Едно тепе край самия брег седна в земята три метра по-ниско. Настана обща паника....“* (Вацов, 1902).

Във Варна *„...зетресението трая няколко секунди; през това време чухме шум, като от кола, която се приближава; полиелеите и ламбите се разлюляха силно, камбаните почнаха да бият, градският часовник спре, стени и тавани се пропукаха, много комини паднаха...“* (Вацов, 1902).

Месембрия (Несебър) – *„вълнообразно землетресение, предшествовано от подземен шум. Кубето на черквата „Св. Иван“ се срути, а от черквата „стари Митропол“ паднаха няколко камъка“* (Вацов, 1902).

В Силистра *„Почти всички двуетажни и тухлени здания се пропукаха, но никакво срутване...“* (Вацов, 1902).

В София *„Землетресението е било усетено и въ всички части на града; много стенни часовници спрели.“* (Вацов, 1902).

Площта, на която е усетено земетресението е оценена на около 610 000 км². Изследванията върху афгършоковата активност, последвала земетресението показват, че проследената продължителност на афгършоковата серия е над две години (Симеонова, 1995).

Земетресения 4 април 1904 г., генерирани в сеизмогенна зона Кресна

Дълбочинният Струмски разлом, простиращ се в направление СЗ-ЮИ, който се пресича от множество неотектонски разломи е основната структура в тази зона. Високата сеизмична активност, в зона Кресна, се свързва със Струмската разломна

система. Сеизмичната поредица започва на 04.04.1904 г. с две катастрофални земетресения, реализирани в интервал от 23 минути (първото, реализирано в 12:03 часа с магнитуд по сеизмичен момент $M_w=6.8$ се приема за форшок на второто земетресение, станало в 12:26 часа с магнитуд по сеизмичен момент $M_w=7.6$ и интензивност $I_0=X$ МШК). Второто събитие е усетено на обширна територия (до Будапеща, Унгария) и свидетели твърдят, че са наблюдавани повърхностни вълни от земетресението в град София. Следи от земетресението в Кресненското дефиле могат да се видят и сега. Земетресението е последвано от добре изявена афтершокова активност продължила повече от три години (Simeonova, Solakov 1999). Последствията от земетресението са детайлно представени в работата на Спас Вацов от 1905 г. (Вацов, 1905).

За селище Бобошево, разположено близо до епицентъра на земетресението е написано „Паника ужасна. Всички хора са на улицата, никой няма в къщи“ „Рядко има къща останала с комин. Много стени съборени, други напукани. Черквата съвсем напукана, има опасност от сгромолясване“. На около 2 км извън Бобошево хората видели „...на хиляди места да блика студена вода от 2 до 5 метра високо. След представянето ѝ останал черен пясък, който миришел на барут, на сяр.“ (Вацов, 1905).

В Рилски манастир първото земетресение „предизвиква страшна паника в манастирските жители; всички с ясно изобразен ужас на лицето бягаха и незнаеха къде да се скрият“. Второто събитие „...много по-страшно от първото в 12⁰³“ е придружено „...от зловещото подземно бучене.“

„Черквата, която се намира в средата на манастирския двор, е здраво и солидно здание, цялото е направено с дялани камъни. От земетресенията през предходните години, тя не е имала никакви повреди, но от днешното тя силно се е напукала на много места.“

„Въ време на силните трусове всички чешми вътре и вън от манастира спряха; след малко протекоха, но с мътна и кална вода.... Въ същото време всред всеобщата паника, се чуваше ехот и бумтене на север и на юг от манастира, от падането на скали, отронени от високите и стръмни върхове.“ (Вацов, 1905).

В най-близкото до епицентъра селище Пехчево „...нямало къща, нямамо постройка неразрушена или неповредена. В планината близо до Пехчево се образували грамадни пукнатини „ въ някои от тях се спускали с въжа любопитни Пехчевци, но без резултат се връщали; никога не са смеели да отидат до дъното.“ (Вацов, 1905).

„Землетресението е било силно разрушително в Джумая (днешен Благоевград) и други близки селища. Много постройки и джамии въ Джумая също са съборени.“ „Селата Крупникъ и Симитлия съ съборени до основи.“ „В основите на Пиринъ-Планина, близо до селото Сърбиново (Кресненско) имало образувано една голяма и дълга пукнатина, въ която хвърлени камъни давали екот по цяла минута.“ (Вацов, 1905).

В град София земетресението е силно усетено, но със „сравнително малко повреди“. „Най-значителни поправки е изисквало основно училище Св. Седмочисленици, защото вътрешните му преградни стени били много повредени. Въ Двореца

, Народното Събрание, Мъжката Гимназия, Дирекцията на Полиците и Телеграфите и много други държавни учреждения пак има малки пукнатини, но може да се мине без всякакви поправки“ (Вацов, 1905).

В град Пловдив „Всички хора бяха избягали на открито, а някои до вечерта не се прибрали в къщи.....Казватъ, че никои не помни толкова силно земетресение да е ставало така.“ (Вацов, 1905).

Земетресението от 14 юни 1913 г., генерирано в сеизмогенна зона Горна Оряховица

Сеизмогенна зона Горна Оряховица е разположена в централната част на Северна България. Сеизмичните събития в зоната се генерират основно по контакта между Пред-Балкана и Мизийска платформа. Най-силното известно земетресение в тази зона е събитието от 14 юни 1913 г., реализирано в близост до град Горна Оряховица с магнитуд по сеизмичен момент $M_w=6.8$ и интензивност $I_0=9-10$ МШК. Разрушени са градовете: Горна Оряховица – до 95%; Велико Търново, Лясковец и Долна Оряховица – до 80 %. Сериозно засегнати са и много други селища. Площта, на която е усетено земетресението е оценена на около 400 000 км². Последвалата афтершокова активност е продължила около 2 години (Симеонова, 1995).

Последствията от земетресението са описани в работата на Спас Вацов от 1923 г. Някои от разрушенията, установени в градовете Горна Оряховица и Търново са представени на Фиг. 1.



Фиг. 1. Разрушения в градовете Горна Оряховица и Велико Търново от силното земетресение с магнитуд $M_w 6.8$, реализирано през 1913 година.

За град Горна Оряховица във вестник „Дневник“, брой 3872 пише – „Разнесе се първо силен гръм из под земята и последва продължително разтърсване. Изплашени, гражданите напущат домове, заведения, дюкяни и др. и бягат да се спасят. Секунда след тая стихия, започват с адски тресък да се рушат сградите на града и то с такава сила и бързина, че в минута само градът се преобръща на страшни развалини“ Вацов (1923).

За град Търново учителят М. Попов пише „Ненадейно ни стресна един ужасен гърмеж откъм Св. Гора. В същия миг се обърнахме назад за да видим що става, но е да можем да си обясним причината за гърмежа, земята почна да се тресе със страшна сила.....Във време на труса, когато всичко на около трещеше с адски шум, картината беше страшна.....в улицата която води към катедралната църква Св. Богородица, тряска беше неописуем, всякъде по паважа и тротуарите се рушеха с грозен шум корнизите на масивните здания, железните и каменни балкони и падаха керемидите от покривите....“

„Църквата „Св.40 мъченици“ е наполовина срутена, за което не малко са спомогнали и грамадните канари, съборени от Царевец. Стените на църква „Св. Богородица“ са съборни до половина, а камбанарията ѝ, много солидна каменна кула, носи дълбоки отвесни пукнатини. Срутена е също митрополитската и още няколко други стари църкви“ Вацов (1923).

Земетресението от 1913 г. е последвано от сеизмично затишие, което продължава до 1986 г., когато в района на град Стражица (сеизмогенна зона Горна Оряховица) стават две умерено силни земетресения, първото с магнитуд $M_w=5.4$, генерирано на 21 февруари и второто с магнитуд по сеизмичен момент $M_w=5.6$, реализирано на 7 декември 1986 г.

Земетресенията от 14-18 април 1928 г., генерирани в сеизмогенна зона Марица

Сеизмогенна зона Марица е разположена в Централна Южна България. Сеизмичността в зоната е привързана към добре известната Маришка разломна система, простираща се в направление ЗСЗ-ИЮИ. Тази разломна система има дълго геоложко развитие, което продължава и през неогена и кватернера. Най-силните известни земетресения, станали в зоната, са събитията от 1928 г. (Чирпанското земетресение от 14 април 1928 г. с магнитуд $M_w=6.5$ и Пловдивското от 18 април 1928 г. с магнитуд $M_w=7.1$).

За тези събития Киров (1945) пише: “На 14 и 18 април 1928 г. България преживя две катастрофални събития. Второто земетресение е най-голямата сеизмична катастрофа в България. Записано е от всички сеизмографи по света.”

Земетресенията предизвикват значителни разрушения в градовете Пловдив, Чирпан и Първомай, както и в много други селища (илюстрирано на Фиг. 2). Напълно разрушени са 74 000 сгради, загиват около 150 човека и над 1000 са ранени.

Представените по-долу описания се базират на наблюдаваните и документиранни щети, представени в отчета “ДИПОЗЕ” (1931), в архивни материали от Държавния архив и в Градската библиотека на град Пловдив.

Едни от най-масовите разрушения са наблюдавани в кварталите на север от река Марица – Каршияка и Филипово. Един от най-тежко пострадалите квартали е Съдийският квартал, разположен в ЮИ част на града, където теренът е наносен - мочурлив под Съдийския квартал. Някога оттам е минавал ръкав на река Марица, по-късно засушен и засипан. Кварталът е застроен през 1925 г. върху насипите. При земетресението рухват 95% от къщите – постройки на един и два етажа. Големи са разрушенията и в Кючук Париж в южните периферни части на град Пловдив – най-бедното население живее в този квартал.

На юг от река Марица пораженията върху сградите са значително по-слаби. По централната улица сградите са високи и масивни, с много добро строително изпълнение. Най-слабо засегнати в целия град са постройките изградени около и в близост до тепетата (изградени от сиенит). При тях ефектите от земетресението се свеждат до частични отлепвания на мазилка и стръсване на керемиди.

Трябва да се отбележи, че наблюдаваните въздействия са последствия от двете земетресения и могат да се разглеждат като комбиниран ефект от силата на двете сеизмични събития, инженерно-геоложките условия и типа строителство.

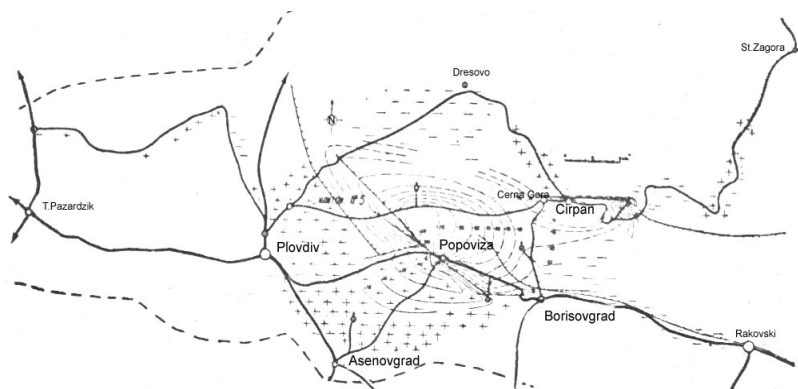
Земетресенията са последвани от интензивна афтершокова активност, продължила до края на 1933 г. (Simeonova, Solakov 1999).

След земетръсната серия от 1928 г., в страната настъпва затишие на силните земетресения с $M_w^{36.5}$, което продължава и до сегашният момент.



Фиг. 2. Последствия от земетресенията през 1928 г., в градовете Пловдив и Чирпан.

През годините 1922, 1926 и 1929 г. географският институт при Военното министерство прави нивелачни измервания в областта около епицентъра на земетресението. Тези измервания са обобщени и представени в работата на Янков (1935). Това е един от малкото случаи, цитирани в световната литература (като напр. Richter, 1958), когато преди и след силно земетресение са проведени детайлни геодезични измервания. Съставената карта е представена на Фиг. 3.



Фиг. 3. Денивелация на терена вследствие на земетресенията от 14 и 18.04.1928 г. (съгласно Янков, 1935): 1) дебелите изтеглени линии означават нивелачната мрежа, по която са правени измерванията; 2) прекъснатите линии означават местата с еднакво пропадане на терена в см, а тънките непрекъснати линии с еднакво издигане. Разликата между две съседни линии е 10 см издигане или пропадане; 3) при по - малко от 10 см издигане се обозначава с (+) и съответно с (-) пропадане на терена.

При земетресението от 14 април се извяват два основни разлома почти успоредни един на друг. Счита се, че при земетресението от 18 април е образуван един основен разлом. Съществуват множество второстепенни разломи успоредни или коси на основните. Обща дължина на образуваните разломи е около 141 км.

Констатирани са основно издигания спрямо нивата преди земетресенията, но на места се наблюдават и пропадания (Киров, 1945). При основните разломи се забелязва „пропадане“ на почвата, което достига до 2.5 - 3 метра. Между северната и южната разседна система има само пропадания на терена. Югозападно от южната разседна система се наблюдава изключително само издигане. Площта на затъването на терена е около 900 км², а на издигане около 240 км². На отделни места денивелациите на терена достигат 1.5-2 метра.

Заклучение

Сеизмологичните изследвания безспорно доказват реалното високо ниво на земетръсна опасност за България. Науката дава предупреждение за опасност и оценява приблизително последствията от нея.

За съжаление, поуки от земетресенията, реализирани в началото на 20^{ти} век, на територията на България, днес са изтрети от паметта на хората и преобладава мнението за относителна земетръсна безопасност. Опитът от минали земетресения у нас, а и от световната практика показва, че обществото взема мерки постфактум, т.е. след реализацията на бедствието.

Голямата част от активните действия на човека за намаляване на сеизмичния риск опират до икономическия потенциал на държавата, до отделените средства за създаване и поддържане на готовността при земетресение и преодоляване на последиците от тях.

Благодарности:

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на Национална научна програма (ННП) „Опазване на околната среда и намаляване на риска от неблагоприятни явления и природни бедствия“, одобрена с Решение на МС № 577/17.08.2018 г. и финансирана от МОН (Споразумение № Д01-363/17.12.2020).

Литература

- Вацов С., 1902. Земетресенията в България през 1901, Д. П., С., 39 с.
- Вацов С., 1905. Земетресенията в България през 1904., Д. П, С., 283 с.
- Вацов С., 1923. Земетресенията в България през 1913-1916, Д. П, С., 195 с.
- Дипозе, 1931. Отчет за извършеното от 25 април 1928 г. до 1 ноември 1931 г. на Дирекцията за подпомагане и възстановяване земетръсната област 1928 г., София, 421 с.
- Киров, К. 1945. Земетресения в България 29-32. Списък на земетресенията, усетени през годините 1928-1930. Инст. Метеорол. Център, България, 140 стр.
- Симеонова, С. 1995. Разпределение във времето на събития от афтершокови серии, реализирани на територията на България и околностите ѝ. БГС, XX1, 3, 23-33.
- Янков, Я. 1935. Регионални деформации, причинени от земетресенията на 14 и 18 април 1928 г. Земетресенията в България No.20-21, Центр. Мет. Ст., С., стр. 93.
- Bonchev, E., I. Bune, L. Christoskov, J. Karagjuleva, V. Kostadinov, G. Reisner, S. Rizhikova, N. Shebalin, V. Sholpo, D. Sokerova, 1982. A method for compilation of seismic zoning prognostic maps for the territory of Bulgaria. *Geologica Balcanica*, 12(2), 2-48.
- Dachev H., I. Vaptzarov, L. Filipov, D. Solakov, S. Simeonova, S. Nikolova, P. Sokolova, E. Botev, Tz. Georgiev, 1995. Seismology, geology, neotectonics, seismotectonics and seismic hazard assessment for the PNPP Belene site, Report of Project: Investigations and activities for increasing of the seismic safety of the PNPP Belene site, *Geoph. Inst., BAS*, S, I, pp. 250.
- Richter, Ch. F., 1958. *Elementary seismology*. San Francisco, W. H. Freeman and Co, cademic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Simeonova S., D. Solakov, 1999. Temporal characteristics of some aftershock sequences in Bulgaria. *Annali di Geofisica*, 42, 5, 821-832.
- Simeonova, S. D., Solakov, D. E., Leydecker, G., Busche, H., Schmitt, T., Kaiser, D., 2006. Probabilistic seismic hazard map for Bulgaria as a basis for a new building code. *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 6, 6, 2006, 881-887.
- Sokerova, D., S. Simeonova, S. Nikolova, D. Solakov, E. Botev, R. Glavcheva, S. Dineva, B. Babachkova, S. Velichkova, S. Maslinkova, K. Donkova, S. Rizikova, M. Arsovski, M. Matova, I. Vaptzarov, L. Filipov, 1992. Geomorphology, neotectonic, seismicity and seismotectonic of NPP Kozloduy, Final Report (Summary) on IAEA Mission: Design basis earthquake for seismic upgrading of NPP Kozloduy, Sofia, pp 200.

Strong, destructive earthquakes, occurred in Bulgaria after 1900

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

Abstract: For seismically active regions of the world, earthquakes are an integral part of the environment (nature) and there is no area of the Earth that is not affected (to a certain degree) by this natural phenomenon. Earthquakes are the expression of the continuing evolution of the Earth planet. The territory of Bulgaria (situated in the eastern part of the Balkan Peninsula) represents a typical example of high seismic risk area. Bulgaria is located, from seismological point of view, in the Alpo-Himalayan seismic belt, which is characterized by high seismic activity. Over the past centuries, Bulgaria has experienced strong earthquakes. Some of the Europe's strongest earthquakes occurred in Bulgaria at the beginning of the 20th century (from 1901 to 1928). No such large earthquakes occurred in Bulgaria since 1928. In the present study, the six strongest earthquakes occurred in Bulgaria after 1900 are presented.

THE SECOND G3 (STRONG) GEOMAGNETIC STORM IN 25TH SOLAR CYCLE ON 3-4 NOVEMBER 2021

P. Mukhtarov, R. Bojilova, B. Andonov

National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography-Bulgarian Academy of Sciences,
str. Acad. G. Bonchev, bl. 3, Sofia 1113, e-mail: engpjm@abv.bg, rbojilova@geophys.bas.bg,
bandonov2@abv.bg

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.4

Abstract. In this paper is analyzed the reaction of the ionosphere over Bulgaria during the G3 (Strong) geomagnetic storm on 3-4 November 2021 on the basis of data from constantly acting monitoring of the state of the ionosphere at the National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography - Bulgarian Academy of Sciences. The global geomagnetic indices (Kp and Dst), which characterize the time development of the storm and the data for the solar wind, are presented. The model values (MAK model, working on the NIGGG website) of the global index of geomagnetic activity, which is calculated in real time from solar wind data show good agreement with definitive values of this index from global data centers. The values of Total Electron Content (TEC) and the forecast values of the critical frequencies of the ionosphere (foF2 and MUF3000) for Bulgaria during the storm are presented. Due to the lack of data from the ionospheric station Sofia, the values foF2 and MUF3000 are calculated on the basis of TEC and are used to prepare daily forecasts for the propagation of radio waves on the territory of our country. A very good coincidence between the model values and the measured ones was reported. As a result, the reaction of the ionosphere was monitored, which in the considered interval 3-5 November and in the conditions of a geomagnetic storm is positive. An explanation of the observed behavior of the critical frequencies of the ionosphere is also purposed. All parameters discussed in this work are subject to monitoring activities under the Project "National Geoinformation Center" (NGIC) financed by the National Roadmap for Scientific Infrastructure 2017-2023.

Key words: geomagnetic activity, solar wind, ionosphere, critical frequencies, Total Electron Content.

Introduction

The geomagnetic storm is a complex geophysical phenomenon of cosmic origin. It has two main manifestations – a change in the values of the geomagnetic field and a change of the electron density of the ionosphere. These two phenomena are result of the particle precipitation, emitted by the Sun, into the Earth's magnetosphere and ionosphere. The electric currents generated in them cause both variations in the geomagnetic field and a change in the temperature regime of the ionosphere and hence a change in the ionospheric plasma. The change in the electron density of the ionosphere directly affects the long-distance radio communications made with meter radio waves, as well as the accuracy of satellite navigation. For these reasons, controlling variations in ionospheric density (so-called “ionospheric storms”) is essential for radio communications and satellite navigation. For this purpose, the National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography - Bulgarian Academy of Sciences has developed empirical models that provide in real-time: nowcast and forecast of some of the main parameters in geophysics: a) the values of the global index of geomagnetic activity Kp, b) the critical frequencies of the ionosphere over Bulgaria and c) Total Electron Content (TEC).

The relationship between Interplanetary Magnetic Field (IMF) components and geomagnetic activity plays an important role in the physical understanding of the solar wind-magnetosphere interaction (Kamide et al., 1998; Tsurutani and Gonzalez, 1997). This relationship is a key element in Space Weather modeling and forecasting (NSWP, 2000). On the basis of such connections the empirical model for forecasting Kp-index was created and subsequently improved (Mukhtarov and Andonov, 2000; Andonov et al., 2004), which uses some of the data on the components of the solar wind: a) vertical component of the interplanetary magnetic field Bz, b) speed and c) pressure of the solar wind.

The model allows calculating the values for every 15 minutes, which are published on website of the National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography at the Bulgarian Academy of Sciences. Due to the absence of a station for vertical sounding of the ionosphere, an empirical model has been developed (Bojilova and Mukhtarov, 2021; Mukhtarov and Bojilova, 2021a), which allows to calculate estimated values of the critical frequencies of the ionosphere (foF2 and MUF3000) by TEC data obtained from the Center for Orbit Determination of Europe. These values can be used to determine the parameters of radio paths on the territory of Bulgaria, which are used by government organizations.

The geomagnetic storm on November 3-4, 2021 is the second storm of rank G3 (Strong) for the 25th solar cycle. This storm occurred in conditions of comparatively low solar activity (for November the average number of sunspots is 35). Usually during low solar activity geomagnetic storms are caused by plasma flows ejected by the so-called “coronal holes” of the Sun. The considered storm on November 3-4, 2021 was the result of Coronal Mass Ejection (CME), recorded by the DSCOVR satellite.

The designation G3 (Strong) is perceived in the NOAA Space Weather Scales (<https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>) for geomagnetic storms in which

the geomagnetic activity index Kp reaches 7. On average, about 200 such geomagnetic storms are registered for each solar cycle. The first geomagnetic storm for the current cycle was registered in May 2021.

Data and methods

The geomagnetic activity is described by the Dst- and planetary Kp-index that are received from: Goddard Space Flight Center (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>), the values of solar wind (including Bz-component, Density, Speed, and Pressure) are taken from the same webpage. The TEC values for Sofia are obtained by the Center for Orbit Determination of Europe (CODE) at Astronomical and Physical Institutes of the University of Bern (<ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>). TEC data have a grid spacing of $5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ in longitude and latitude respectively. The values in point with coordinates on Sofia are obtained by interpolation. The data for the critical frequencies over Bulgaria are calculated by an empirical model from TEC (Bojilova and Mukhtarov, 2021; Mukhtarov and Bojilova, 2021a). The data for the other ionospheric station San Vito (Station Code: VT139, 40.6°N , 17.8°E), subject to this work, are taken from Global Ionosphere Radio Observatory (GIRO) <https://giro.uml.edu/didbase/scaled.php>.

Results

The main task of the present study is to trace the behavior of the empirically modeled geophysical parameters in NIGGG in disturbed conditions. As mentioned, geomagnetic storms are characterized by changes in the Earth's magnetic field due to its interaction with streams of charged particles emitted by the Sun. When considering such phenomena of interest to geophysics, indices are used that characterize the global change in the Earth's magnetic field.

The Kp-index is used to characterize the magnitude of geomagnetic storms. Kp is an excellent indicator of disturbances in the Earth's magnetic field and is used to decide whether geomagnetic alerts and warnings need to be issued for users who are affected by these disturbances. The Dst index is an index of magnetic activity derived from a network of near-equatorial geomagnetic observatories that measures the intensity of the globally symmetrical equatorial electrojet (the "ring current"). The Dst index shows the effect of the globally symmetrical westward flowing high altitude equatorial ring current, which causes the "main phase" depression worldwide in the H-component field during large magnetic storms.

Fig. 1 shows the variation of Kp and Dst, which are used to determine main phases of the storm. Data for both indices were obtained from <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>. The figure shows that the storm started around 18UT on November 3 through the following changes in both parameters: a) Kp- index exceeds 6 (which is an indication of geomagnetic disturbance), b) the other index Dst reacts with a positive change up to 20nT, followed by a sharp drop in the index to -120nT. The graph shows that the changes in the two indices occur sharply, which may define the considered event as a storm with

a sudden commencement. The maximum of the storm is around noon on 4 November. In the hours around 12UT the Kp index exceeds 7.67 and Dst reaches its minimum. After 18UT on November 4, the Kp index returns to quite condition, which is characterized by values below 4, and the Dst index gradually begins to recover. The duration of the storm according to the considered global indices turns out to be one day from 18 UT on 3 November to the same hour on 4 November 2021.

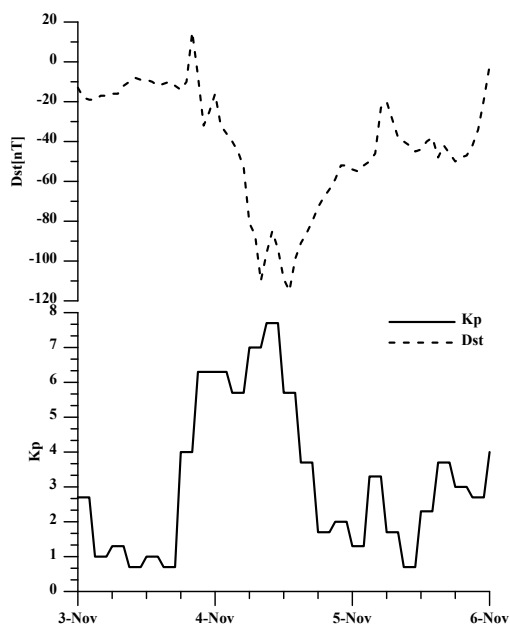


Fig. 1. Global indices of geomagnetic activity Kp (continuous line) and Dst (dash line)

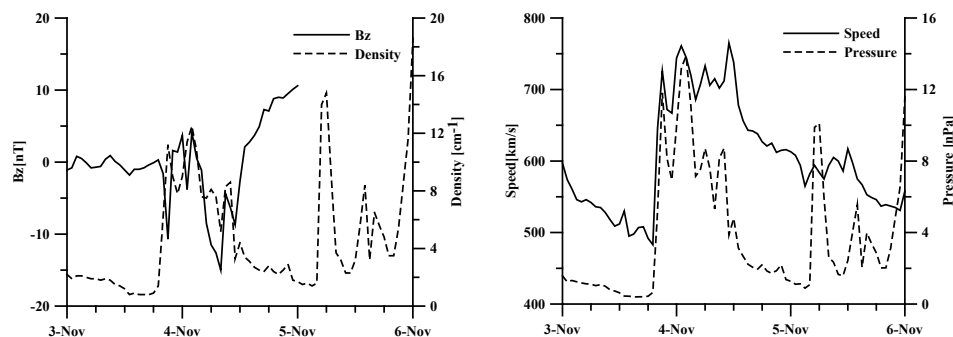


Fig. 2. Solar wind parameters: Bz component of interplanetary magnetic field (continuous line; left panel) and solar wind density (dash line; left panel), Speed (continuous line; right panel) and Pressure (dash line; right panel).

Shown in Fig. 2 parameters of the solar wind show that at 18 UT on 3 November the increase in the density of the solar wind (dash line), which reaches about 11 cm^{-3} . The component B_z of the interplanetary magnetic field - IMF (continuous line; left panel) has negative values, reaching about -10 nT , which allow for coupling between the solar wind and the Earth's magnetosphere. The speed (continuous line; right panel) and pressure (dash line; right panel) of the solar wind also increased sharply at 18 UT on 3 November, which is another confirmation besides the global indices of geomagnetic activity (see Fig. 1) that we have a storm with a sudden commencement. By 12 UT on 4 November B_z has negative values (about -15 nT) and then turns into positive values (above 10 nT). This means that the coupling between the solar wind and the Earth's magnetosphere ceases around 12 UT on 4 November, when the density and speed of the solar wind begins to decline. This also causes rapid decline in the Kp-index (see Fig. 1).

The MAK model (Andonov et al., 2004) presents estimated Kp values (marked in Fig. 3 as Kpm) as a function of the inert system-modified B_z values, the speed and pressure of solar wind. Fig. 3 shows the variation of Kpm, obtained by the model (continuous line), compared to the variation of Kp values. During the storm the values of Kpm are close enough to the actual values of Kp (dash line), which are determined from data from geomagnetic stations of the world network (Mukhtarov and Andonov, 2000; Andonov et al., 2004).

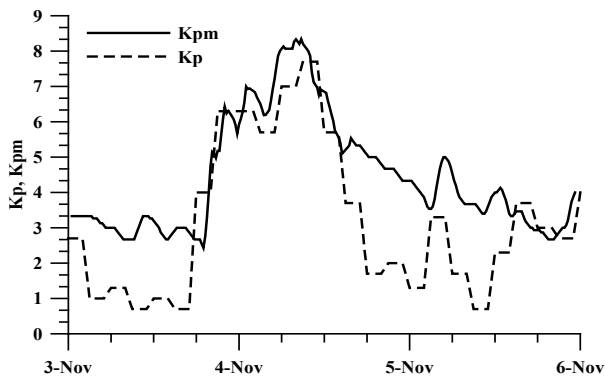


Fig. 3. Comparison between the model values of the Kp-index, calculated from the MAK model (continuous line) and the actual (dash line).

Total Electron Content is the integral of the ionospheric electron density for the entire ionosphere along a line vertical at a point on the Earth's surface. The TEC quantity is important for determining the so-called ionospheric correction to using Global Navigation Satellite Systems (GNSS). The radio waves used in satellite navigation are with a very high frequency and they are not reflected by the ionosphere, but when pass through it they get an additional delay, which introduces errors in determining the coordinates of the receiver. Knowing of the TEC values makes it possible to correct the values of the devices.

In Fig. 4 the TEC values for the point with coordinates 42.7°N и 23.4°E calculated from the CODE data by interpolation are shown. Shown with dotted lines relative deviation (Mukhtarov et al., 2018) describes the deviation of the TEC values from the steady state presented by the TEC hourly medians for November 2021. When using a relative deviation, the diurnal, seasonal and solar course of the respective ionospheric characteristics is eliminated. The short-period variations caused by geomagnetic disturbances are clearly distinguished. The figure shows that during the considered storm both the TEC values and the relative deviation have a predominance of positive values, which means an increase in the electron density of the ionosphere. A similar reaction is typical for the winter season (Bojilova and Mukhtarov, 2020; Bojilova and Mukhtarov, 2020a). Weak negative reaction in TEC is observed only in the initial phase of the storm (on the night of 3 to 4 November) in the values of relative TEC (dash line). In daytime conditions on 4 November, a positive response of relative TEC of about 0.5 was observed, which means an increase of TEC by 50% compared to the calm state this month. An increase of up to 30 TECU was again observed in the raw TEC values.

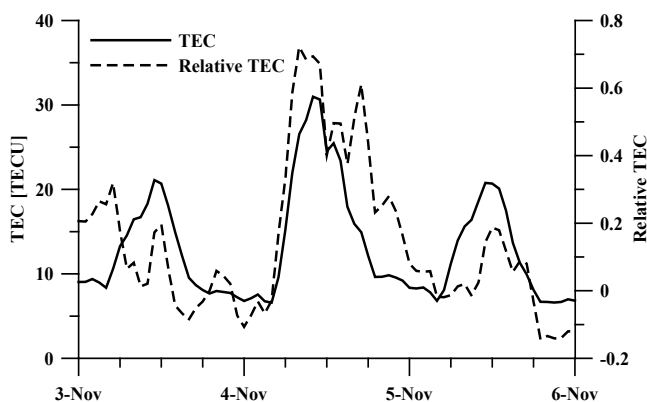


Fig. 4. TEC values for Bulgaria (continuous line) and their relative deviation from the steady state (dash line).

The physical explanation for the observed positive response may be the result of some of the main mechanisms: the F2-layer uplifting due to vertical drift, plasma fluxes from the plasmasphere, and downwelling of the gas as a result of the storm-induced thermospheric circulation (Danilov and Lastovicka, 2001).

In the physics of the ionosphere, the following values are of the greatest interest: foF2 and MUF3000, which together with the value foE allow to calculate the main parameters of a given radio path. The task for calculating a radio path contains the determination of the range of frequencies on which a radio communication can occur at a given distance between the two radio communication points. The frequency range is limited by the minimum and maximum usable frequencies, which depend on the distance of the radio path and the state of the ionosphere at the time. To solve this problem, it is necessary to know the altitude profile of the electron density of the ionosphere to the

maximum in the layer of reflection of radio waves. The model named after its creators, the profile of Di Giovanni-Radicella, is based on the presentation of the electronic profile with hyperbolic sequence functions (Di Giovanni and Radicella, 1990). The values of the three critical frequencies are sufficient to calculate the model altitude profile for heights up to the height of the maximum of the F-layer. After calculating the electron profile, the model ionogram is calculated. After determining the model ionogram, the calculation of the model inclined ionograms at a given distance of the radio communication is started.

Therefore, the values of foF2 and MUF3000 were chosen in the present work to illustrate the ionosphere response. Two points were selected to compare the behavior of ionospheric parameters. One point is ionosonde station San Vito, and the other is the point with coordinates close to Sofia.

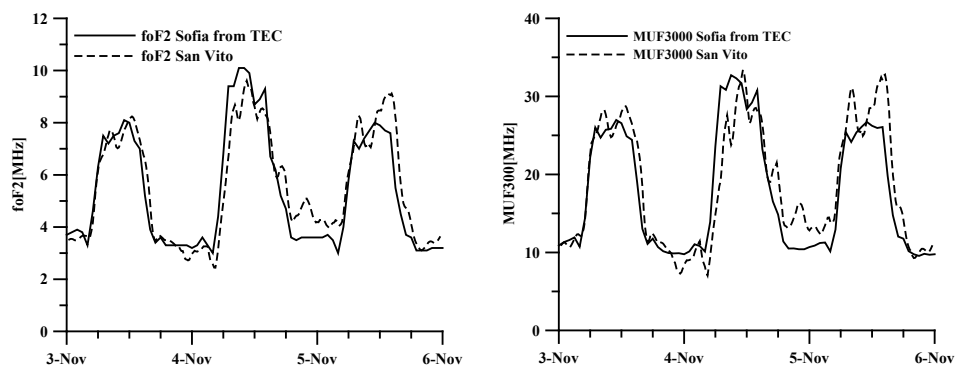


Fig. 5. Variations of the critical frequencies of the ionosphere over Bulgaria during the storm calculated according to the TEC data (continuous line). For comparison with dotted line the measured values from a similar coordinate ionospheric station San Vito are shown.

Fig. 5 shows the values of the critical frequency with vertical propagation foF2 (left panel; continuous line) and the maximum usable frequency of radio communication at a distance of 3000km (right panel; continuous line) obtained from an empirical model that makes it possible to calculate both critical frequencies through TEC data (Bojilova and Mukhtarov, 2021; Mukhtarov and Bojilova, 2021a). For comparison, the measured values of these quantities from a nearby ionospheric station San Vito (40.6°N, 17.8°E) are shown. Fig. 5 makes it evident that the values of the critical frequencies during the storm increase in comparison to the values on quite days. During the day on 4 November (the maximum of the storm) foF2 for Sofia exceeds 10MHz, and the same value on 3 November and 5 November (quite conditions) has values around 8 (see Fig. 5; left panel; continuous line). The other ionospheric quantity MUF3000 has analogous increase in values during the storm (see Fig. 5; right panel; continuous line). From the parameters shown at the San Vito ionospheric station in fig. 5 (right and left panel; dash line) a similar situation with the behavior of the ionosphere on the territory of Bulgaria is clearly visible. In conclusion, we can say that in the studied ionospheric stations at almost the same latitude in the territories of Bulgaria and Italy there is a positive response in the behavior of

critical frequencies during the studied event on 4 November, 2021. The positive storm effects, especially at midlatitudes, remain the most unpredictable feature of the ionospheric storms. Besides an increase in the neutral density ratio O/N_2 as possible candidate for the positive storm occurrence, storm time thermospheric winds, prompt penetration, and disturbance dynamo electric fields, as well as plasmaspheric downward fluxes, have been reported to be the main causes of the storm time increases in the ionospheric plasma density (Astafyeva et al., 2015; Fuller-Rowell et al., 1996; Richmond and Lu, 2000; Förster and Jakowski, 2000; Huang et al., 2005; Crowley et al., 2006; Danilov, 2013; Gadzhev et al., 2013). A positive response to the critical frequencies of the ionosphere means that during this storm there are no conditions for disruption of radio communications.

Summary

Empirically modeled values of the geomagnetic activity index K_p presented in this paper, calculated from satellite data of the solar wind, allow to predict with satisfactory accuracy through the website of the National Institute of Geophysics Geodesy and Geography the occurrence of geomagnetic storms with a delay of not more than 15 minutes. This is a definite advantage over the three-hour estimated values published by the world data centers.

The model, which calculates the estimated values of the critical frequencies of the ionosphere over Bulgaria (foF2 and MUF3000) provides, in the absence of a working ionospheric station, a way to control the state of the ionosphere over Bulgaria. The results of the model allow to predict the ionospheric characteristics with satisfactory accuracy not only in quiet conditions, but also during disturbances of geomagnetic origin and to make short-term and medium-term prediction.

This study presents the second geomagnetic storm of class G3 for 2021, which occurs on November 3–4, 2021. From the considered geophysical parameters it can be seen that the models providing monitoring at the National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography describe in great detail and accuracy the behavior of the basic quantities used to study the behavior of the ionosphere in geomagnetic and ionospheric disturbances, namely: i) the K_p -index by MAK model, ii) the critical frequency of the F2 layer, iii) the maximum usable frequency at a distance of 3000 km and iv) the TEC quantity.

Acknowledgments. This work is supported by Contract No DO1-404/18.12.2020 (Project “National Geoinformation Center (NGIC)” financed by the National Roadmap for Scientific Infrastructure 2017–2023.

References

- Kamide, Y. Baumjohann, W. Daglis, I. A. Gonzalez, W. D. Grande, M. Joselyn, J. A. McPherron, R. L. Phillips, J. L. Reeves, E. G. D. Rostoker, G. Sharma, A. S. Singer, H. J. Tsurutani, B. T. Vasyliunas, V. M., 1998. Current understanding of magnetic storms: Storm-substorm relationships, *J. Geophys. Res.*, 103, No. 8, 17,705–17,728.

- Tsurutani, B., W. Gonzalez, 1997. The interplanetary causes of magnetic storms: A review, in *Magnetic Storms*, Geophys. Monogr. Ser., vol. 98, edited by B. Tsurutani et al., p. 77, AGU, Washington, D.C.
- National Space Weather Program Implementation Plan, 2000. 2nd Edition, Washington.
- Muhtarov, P. and Andonov, B., 2000. Improved relationship between the Interplanetary Magnetic Field component B_z and K_p index. *Bulgarian Geophysical Journal*, 26, pp. 1-4.
- Andonov, B., Muhtarov, P., and Kutiev, I., 2004. Analogue model, relating K_p index to solar wind parameters. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 66(11), 927-932.
- Bojilova, R., and Mukhtarov, P., 2021. RECONSTRUCTION OF IONOSPHERIC CRITICAL FREQUENCIES BASED ON THE TOTAL ELECTRON CONTENT OVER BULGARIA. *COMPTEs RENDUS DE L'ACADEMIE BULGARE DES SCIENCES*, 74(1), 110-119.
- Mukhtarov, P., and Bojilova, R., 2021a). Accuracy Assessment of the Ionospheric Critical Frequencies Reconstructed by TEC over Bulgaria. *COMPTEs RENDUS DE L'ACADEMIE BULGARE DES SCIENCES*, 74(2), 250-259.
- Mukhtarov, P., Andonov, B., and 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.
- Bojilova, R., & Mukhtarov, P., 2020. LOCAL TIME DEPENDENCE OF THE IONOSPHERIC RESPONSE TO GEOMAGNETIC DISTURBANCES OVER BULGARIA. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 20(1.2), 615-622.
- Bojilova, R., & Mukhtarov, P., 2020a). Relationship between the Critical Frequencies of the Ionosphere over Bulgaria and Geomagnetic Activity. *COMPTEs RENDUS DE L'ACADEMIE BULGARE DES SCIENCES*, 73(8), 1113-1122.
- Danilov, A. D., & Lastovicka, J., 2001. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *International Journal of geomagnetism and aeronomy*, 2(3), 209-224.
- Di Giovanni, G., & Radicella, S. M., 1990. An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. *Advances in Space Research*, 10(11), 27-30.
- Astafyeva, E., Zakharenkova, I. and Förster, M., 2015. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(10), pp. 9023-9037.
- Fuller-Rowell, T. J., M. V. Codrescu, H. Rishbeth, R. J. Moffett, and S. Quegan, 1996. On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 101(A2), 2343-2353, doi:10.1029/95JA01614.
- Richmond, A., and G. Lu, 2000. Upper-atmospheric effects of magnetic storms: A brief tutorial, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 62, 1115-1127.
- Förster, M., and N. Jakowski, 2000. Geomagnetic storm effects on the topside ionosphere and plasmasphere: A compact tutorial and new results, *Surv. Geophys.*, 21, 47-87.
- Huang, C. S., J. C. Foster, L. P. Goncharenko, P. J. Erickson, W. Rideout, and A. J. Coster, 2005. A strong positive phase of ionospheric storms observed by the Millstone Hill incoherent scatter radar and global GPS network, *J. Geophys. Res.*, 110, A06303, doi:10.1029/2004JA010865.
- Crowley, G., Hackert, C.L., Meier, R.R., Strickland, D.J., Paxton, L.J., Pi, X., Mannucci, A., Christensen, A.B., Morrison, D., Bust, G.S. and Roble, R.G., 2006. Global thermosphere-ionosphere response to onset of 20 November 2003 magnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111(A10).
- Danilov, A. D., 2013. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances, *Adv. Space Res.*, 52(3), 343-366, doi:10.1016/j.asr.2013.04.019.
- Gadzhev, G., Ganey, K., Prodanova, M., Syrakov, D., Atanasov, E. and Miloshev, N., 2014. Multi-scale atmospheric composition modelling for Bulgaria. In *Air Pollution Modeling and its Application XXII* (pp. 381-385). Springer, Dordrecht.

G3 (силна) геомагнитна буря през 25-тия слънчев цикъл на 3-4 ноември 2021

П. Мухтаров, Р. Божилова, Б. Андонов

Резюме: В настоящата статия е анализирана реакцията на йоносферата над България по време на G3 (Strong) геомагнитна буря от 3-4 Ноември 2021 на базата на данните от постоянно действащия мониторинг на състоянието на йоносферата в Националния Институт по Геофизика, Геодезия и География – Българска академия на науките. Представени са глобалните геомагнитни индекси (Kp and Dst), характеризиращи протичането на бурята и данните за слънчевия вятър. Моделните стойности (МАК модел работещ на интернет страницата на NIGGG) на глобалния индекс на геомагнитната активност, които се изчисляват в реално време по данните на слънчевия вятър показват добро съответствие с дефинитивните стойности на този индекс от световните центрове за данни. Представени са стойностите на Total Electron Content (TEC) за България по време на бурята и прогнозните стойности на критичните честоти на йоносферата (foF2 and MUF3000), които се изчисляват на базата на TEC и служат за изготвяне на ежедневни прогнози за разпространението на радиовълните на територията на България. Отчетено е много добро съвпадение между моделните стойности и измерените такива. Като резултат е проследена реакцията на йоносферата, която в разглеждания интервал от време 3-5 ноември и в условията на геомагнитна буря е положителна. Предложено е и обяснение за наблюдаваното поведение на критичните честоти на йоносферата. Всички дискутирани параметри в тази работа са обект на мониториновата дейност по Project “National Geoinformation Center (NGIC)“.

ULF GEOMAGNETIC DISTURBANCES DUE TO MODERATE GEOMAGNETIC STORM AT PANAGJURISTE, BULGARIA

M. Chamati

National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences,
ul.Acad.G.Bonchev, bl3, Sofia1113, Bulgaria, e-mail: mchamati@geophys.bas.bg

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.5

Abstract. The geomagnetic disturbances caused by the geomagnetic storm on 12 October 2021 – class G1 increasing to G2 are investigated. The data set, recorded at 1s sampling rate at the Geomagnetic Observatory Panagjuriste, Bulgaria, along the X and Y components of the geomagnetic field variations, are analyzed. The time evolution of the ULF variations, the local and the global geomagnetic K-indices and the dynamical spectra in the ULF range are presented. It is found that spectral characteristics before 10 UT along the two geomagnetic components have similarities in term of the time of occurrence, the time scale and power. After 10 UT, the results show radical differences in the manifestations of disturbance in the two geomagnetic components in terms of the time scales in which they occur.

Key words: ULF variations, spectral properties, geomagnetic storm, Panagjuriste.

Introduction

Many parameters that characterize different geophysical fields (Earth's magnetosphere, ionosphere, atmosphere and lithosphere) are used and analyzed to identify a possible source of disturbances of ultra-low frequency (ULF) field variations (Chamati and Botev, 2019; McPherron, 2005; Nenovski et al., 2013; Regi et al., 2014; Villante and Vellante, 1998). These variations, recorded by the different types of magnetometers on the ground and in the Space provide very useful information about the Sun and magnetosphere/ionosphere processes (Blagoveshchensky and Sergeeva, 2018; Borovsky, 2020; Chamati, M., 2018). Many centers for scientific information collecting geophysical data include in their database information of ULF observation such as National Geoinfor-

mation Center (Miloshev et al., 2019) as well as information about geomagnetic field elements (Metodiev and Trifonova, 2020).

In terms of their spectral characteristics, the irregular short-term geomagnetic variations with external origin resulting mainly from the impact of the storms and the sub-storms on the geomagnetic field, cover a wide range of periods and frequencies - from part of second to minutes (Chamati, M., 2018; Chapagain, 2017; Kleimenova et al., 2019; Watermann and Gleisner, 2009).

On 09 October 2021 at 06:38 UT the coronal mass ejection (CME) associated with flare from Region 2882 (N17, L=1.57) has occurred on the Sun. The CME reached the Earth on the 11 October 2021 to early 12 October 2021 and disturbed the Earth's magnetosphere, in particular geomagnetic field, and caused a geomagnetic storm at high and mid latitudes.

Measuring instrument

At the Geomagnetic Observatory Panagjuriste, Bulgaria (geographic coordinates: 42.51N/24.18E) operate a tri-axial search-coil magnetometer system which is a part of SEGMA Array (South European Geomagnetic Array, Figure 1). It is designed to measure and collect data for the Earth's magnetic field variations, specific geomagnetic events and



Fig. 1. The map of SEGMA Array and measuring instrument pictures

long-term study of ULF signals. The sensitivity of the measuring instrument is in range 10 mV/nT – 100 mV/nT. The frequency band is 5 mHz – 20 Hz and its intrinsic noise is 0.05 pT/ $\sqrt{((\text{Hz}))}$ at 1 Hz. The timing is provided via GPS.

Data set

The acquisition system records originally data sets associated with X (north-south), Y (east-west) and Z (down/vertical) directions. They are sampled at 100 Hz, organized in files with duration one hour. With aid of some software packages perform verifications of the data files and transform them into data files with duration one hour, sampled at 1 Hz.

Results

At early hours on 12 October 2021 the shock from the coronal mass ejection (CME) arrived resulting in a geomagnetic storm – class G1 increasing to G2 according to classification of BGS (British Geological Survey) categories since 2014. It was recorded by the search-coil instrument at Panagjuriste, Bulgaria, which provides continuous data of ultra-low frequencies of geomagnetic field variations. Figure 2 illustrates the variations of the magnetic field along the X (north-south) and Y (east-west) directions for twenty-three hours. The shock is characterized by sudden decrease in the both values along the X and Y components at 02:26:20 UT (Figure 3). The absolute values of the decrease for the X and Y components are about $2 \cdot 10^5 \mu\text{V}$ and $1 \cdot 10^5 \mu\text{V}$, respectively.

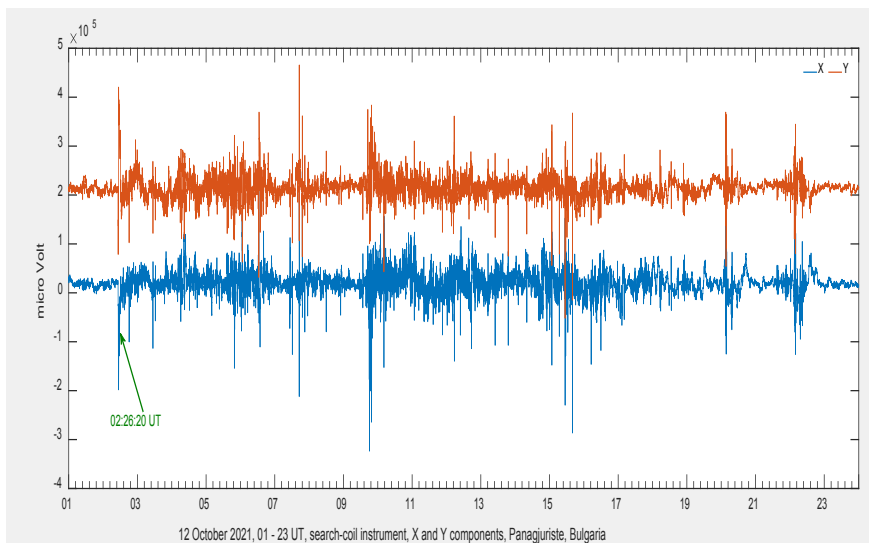


Fig. 2. ULF variations along the X and the Y components on 12 October 2021

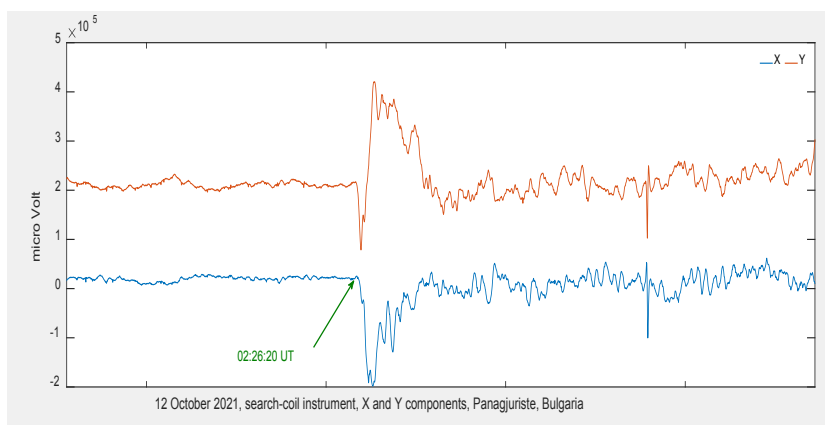


Fig. 3. ULF variations at the beginning of the storm on 12 October 2021, X and Y components

The planetary geomagnetic index - K_p reaches values about 6 during the time intervals 03-06 UT and 09-12 UT (the bottom panel on Figure 4) (Matzka et al., 2021) (https://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/Kp_ap_Ap_SN_F107_since_1932.txt) while the local K index (Metodiev, M. and Trifonova, P., 2021) (http://data.niggg.bas.bg/magn_data1/pag_archive_bg.php), calculated for Panagjuriste is 5 (upper panel on Figure 4). The local geomagnetic activity remains relatively high after 12 UT while the global index is gradually decreasing.

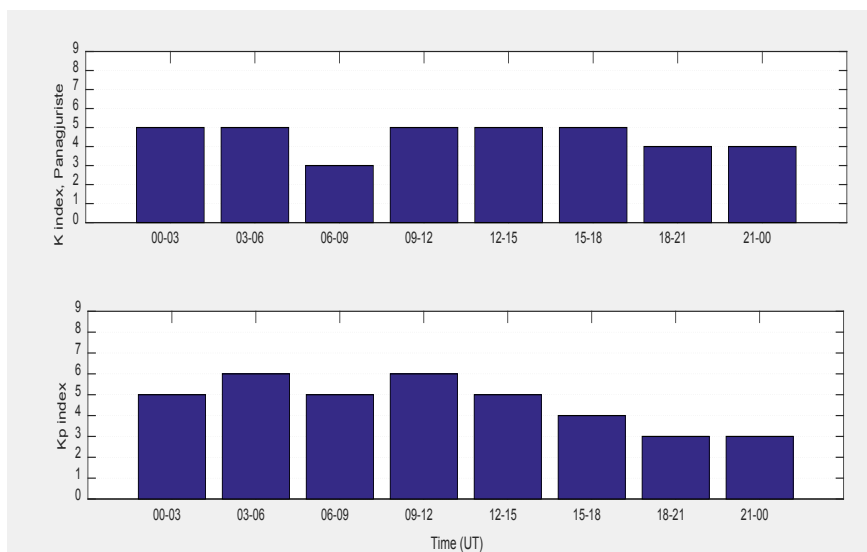


Fig. 4. The K index, Panagjuriste, Bulgaria (upper panel) and the Kp index (bottom panel) on 12 October 2021

To extract detailed information on the spectral characteristics of the geomagnetic ULF variations along the X and Y components the Wavelet analysis is applied. The time scales 1-900 seconds are analyzed. On Figure 5 the results obtained for the X component are presented. It shows that at the beginning of the storm at the 02:26 UT the sudden powerful disturbance, which comprise the time scales 90-900s, is recorded. At the same time a similar behavior of this disturbance is observed along the Y component (Figure 6). Then, up to about 10 UT, similar power and frequency interferences in time scales 45-350s occur along both directions – X and Y.

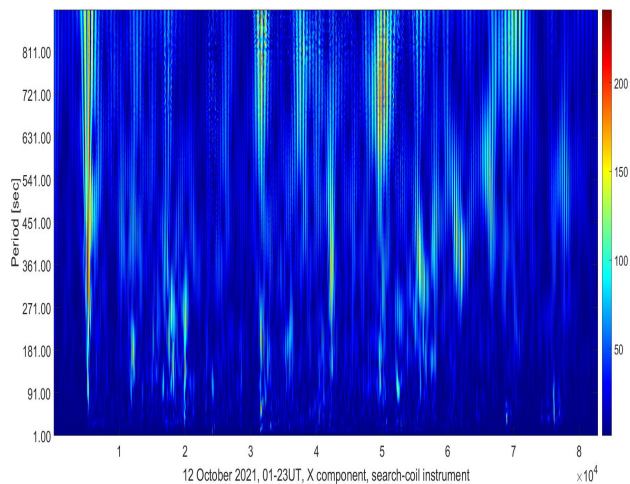


Fig. 5. Dynamic spectra, X component on 12 October 2021, PAG station, time in seconds

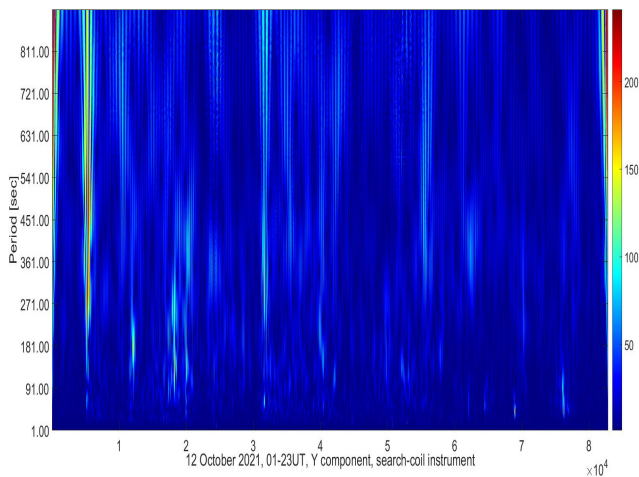


Fig. 6. Dynamic spectra, Y component on 12 October 2021, PAG station, time in seconds

After 10 UT the disturbance strength of the X and Y components (Figures 5 and 6), but not at the time of its occurrence, is very different. Along the X component stronger disturbances, compared with Y component, in time scales 250-450s and 550-900s appear. Three maxima of ULF spectra of the disturbances stand out particularly clearly: about 14:30 UT, 20 UT and 22 UT. The first one covers the time scales 600-900s, the second ~ 270-370s and the third one ~ 700-900s. Figures 6 and 7 show similarities in that almost no timescale disturbances of less than 45 seconds are observed.

Conclusion

On 12 October 2021 the shock from the coronal mass ejection (CME) caused a geomagnetic storm – class G1 increasing to G2. The local spectral characteristics of ULF geomagnetic noise along the X and the Y components, recorded at the Panagjuriste Geomagnetic Observatory have been studied. It is found that the disturbances along the two geomagnetic components have similarities and differences in terms of the time scales in which they occur and also in terms of the time of occurrence. The similarities appear before 10 UT and correspond to time scales 90-900s. The differences between disturbances recorded along X and Y components appear after 10 UT. They occur on the X component and are expressed by strong disturbances (compared to the Y component) in the time scales 600-900s, ~ 270-370s and ~ 700-900s. Along the Y component, after 10 UT, the powerful disturbances are not observed.

Acknowledgments. This work is supported by Contract No D01-404/18.12.2020 (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>
- Borovsky, J.E., 2020. What magnetospheric and ionospheric researchers should know about the solar wind. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 204, 105271. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105271>
- 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>
- Chapagain, N., 2017. Analysis of Geomagnetic Storms Using Wavelet Transforms., *Journal of Nepal Physical Society Volume 4*, 119–124. <https://doi.org/10.3126/jnphysoc.v4i1>
- 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>

- Matzka, J., Stolle, C., Yamazaki, Y., Bronkalla, O., Morschhauser, A., 2021. The Geomagnetic Kp Index and Derived Indices of Geomagnetic Activity. *Space Weather* 19, e2020SW002641. <https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
- 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>
- Metodiev, M., Trifonova, P., 2021. Local geomagnetic K- indices calculated at PAG observatory since 2007. National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences. <https://doi.org/10.34975/ctlg-2021.k-ind.v.1>
- Metodiev, M., Trifonova, P., 2020. Geomagnetic field elements of the Bulgarian territory for 2020.0 EPOCH. Presented at the International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, pp. 543–550. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.2/s05.069>
- Miloshev, N., Trifonova, P., Georgiev, I., Marinova, T., Slabakova, V., Dobrev, N., Milusheva, V., Guero, T., 2019. National geoinformation center - Scientific infrastructure for dissemination of accurate, durable and reliable geodata and products. Presented at the 10th Congress of Balkan Geophysical Society, BGS 2019. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902671>
- 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>
- Regi, M., Lauretis, M.D., Francia, P., Villante, U., 2014. The propagation of ULF waves from the Earth's foreshock region to ground: the case study of 15 February 2009. *Earth Planet Sp* 66, 1–9. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-43>
- Villante, U., Vellante, M., 1998. An analysis of working days contamination in micropulsation measurements. *Annali Di Geofisica* 41.
- Watermann, J., Gleisner, H., 2009. Geomagnetic variations and their time derivatives during geomagnetic storms at different levels of intensity. *Acta Geophys.* 57, 197–208. <https://doi.org/10.2478/s11600-008-0045-7>

Геомагнитни смущения в ULF диапазон, наблюдавани по време на геомагнитна буря в Геомагнитна Обсерватория Панагюрище

М. Шамати

Резюме. Изследвани са геомагнитните смущения, причинени от геомагнитната буря от клас G1 нарастващ до G2, наблюдавана на 12 октомври 2021 г. Анализирани са данни за ULF вариациите на X и Y компонентите на земното магнитно поле, записани в Геомагнитната Обсерватория „Панагюрище“, България, с резолюция 1 секунда. Представени са записите на ULF вариациите от 01:00 UT до 23:59 UT, локалният и глобалният K-индекси и динамичните спектри в ULF диапазона. Установено е, че спектралните характеристики на геомагнитните вариации преди 10 UT, намерени за двете геомагнитни компоненти, имат прилики по отношение на времето на възникване, времевите скали, в които се проявяват и мощността им. След 10 UT резултатите показват радикални разлики в проявите на смущения в двете геомагнитни компоненти по отношение на времевите скали, в които се появяват, а също така и по тяхната мощност.

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

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

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

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.6

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

Ключови думи: силни земетресения, магнитуд, интензивност

Въведение

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

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

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

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

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

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

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

Сеизмотектонски характеристики

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Земетресението от 18.10.1917 г.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

Земетресението от 22 май 2012

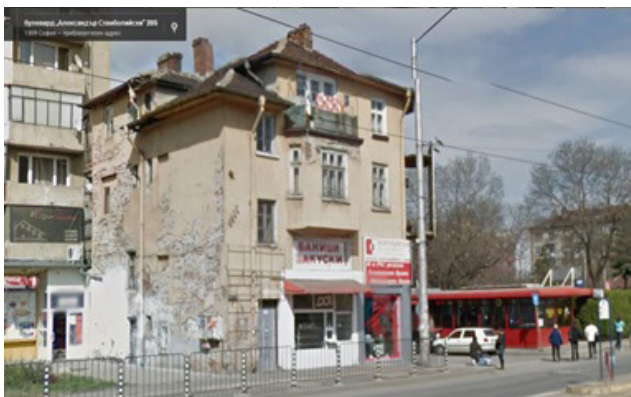
Почти век по-късно след земетресението през 1917 г., на 22 май 2012 г. земетресение с $M_w=5.6$ е регистрирано в района на Софийска зона. Събитието е с епицентър на 25 km в ЮЗ посока от центъра на София, между градовете Перник и Радомир. В град София и околностите са наблюдавани умерени до тежки щети.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

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

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

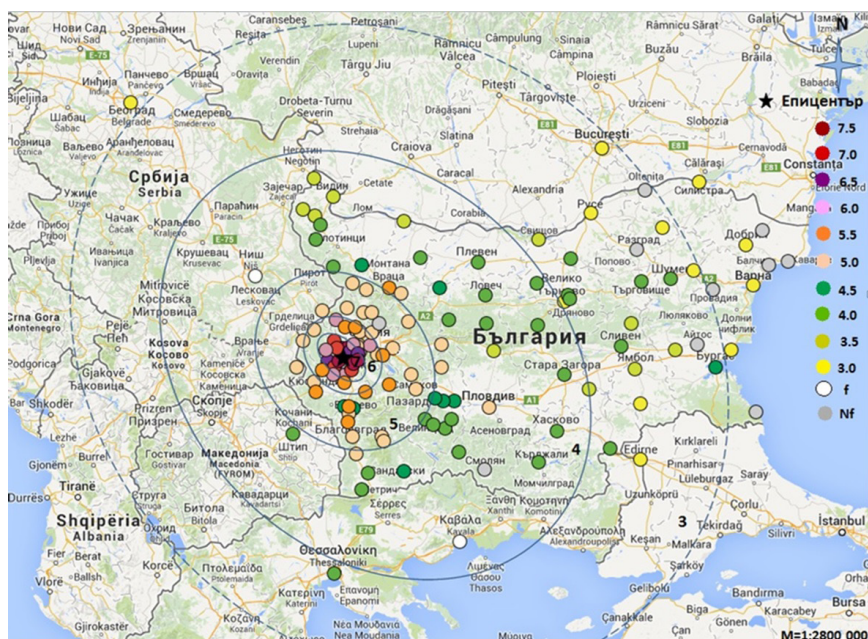


Фиг. 2. Щети, причинени от земетресението в град Перник и околности.



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

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

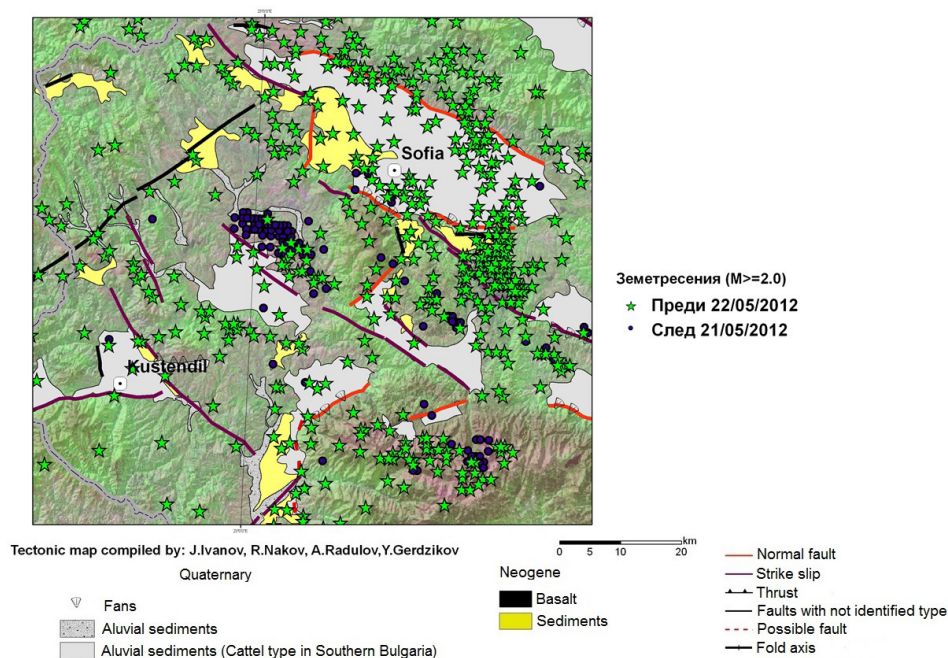


Фиг. 4. Наблюдавани въздействия след земетресението, реализирано през 2012 г.

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

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

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



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

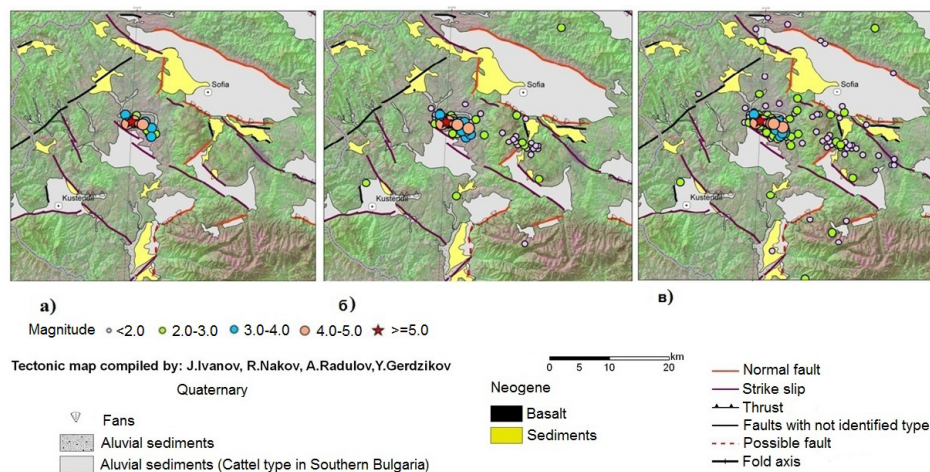
растер и цвят на фигурата. От фигурата се вижда, че събитията, реализирани след 22.05.2012 г. (означени с черни точки) частично запълват добре очертаното асейзично пространство, югозападно от град София.

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

Земетресение от 22 май 2012 г. не се характеризира с форшокова активност, но е реализирано в област, характеризираща се с изявено сеизмично затишие за слаби до умерено силни земетресения (Solakov et al., 2016).

За изследване пространственото разпределение на афтершоковите събития, генерирани след земетресението от 22.05.2012 г. е формирана извадка, включваща 209 афтершокови събития с магнитуд в интервала $1.0 \leq M_p \leq 4.4$ (M_p , дефиниран в Christoskov et al., 2012).

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



Фиг. 6. Пространствено разпределение на афтершоковите събития, реализирани след земетресението от 22.05.2012 г.: а) 3 часа след главното събитие; б) 14 дни след главното събитие; в) 663 дни след главното събитие.

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

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

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

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

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

При анализа на времево разпределение на афтершоковата активност е приложена методика за определяне на затихването на афтершоковата активност във времето, която е подробно описана в работите на Симеонова, 2015 и Райкова, 2021 (Simeonova et. al., 2015, Raykova, 2021). Афтершоковата активност е изследвана за два различни времеви интервала: (оачавана и наблюдавана продължителност, съответно $T=254$ дни и $T=1080$ дни) с и без магнитуден праг $M_a=2.0$. На фигура 7 е представено честотно-времето разпределение на афтершоковите събития за четирите разглеждани случая.

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

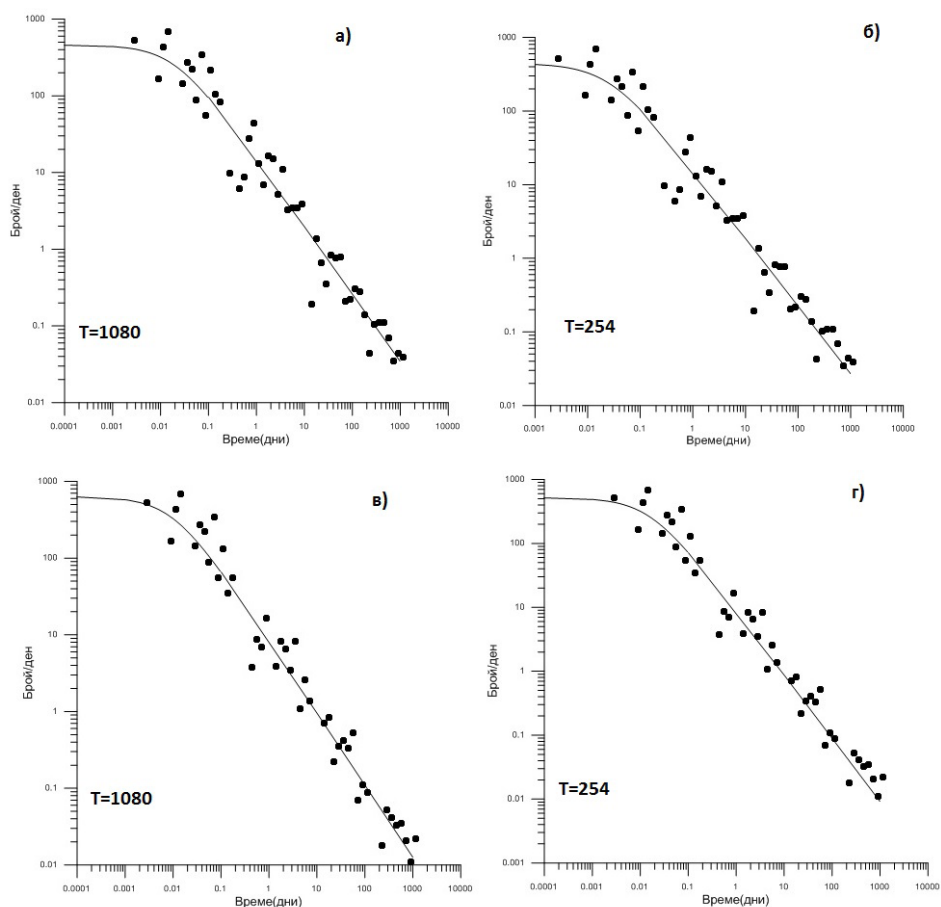
Наблюдава се добро съвпадение между очакваното (теоретичното) и наблюдаваното честотни разпределения и в четирите разглеждани случая. Така избраният модел за апроксимиране на времето разпределение е в относително добро съответствие с разпределението на афтершоковите събития. При четирите случая афтершоковата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

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

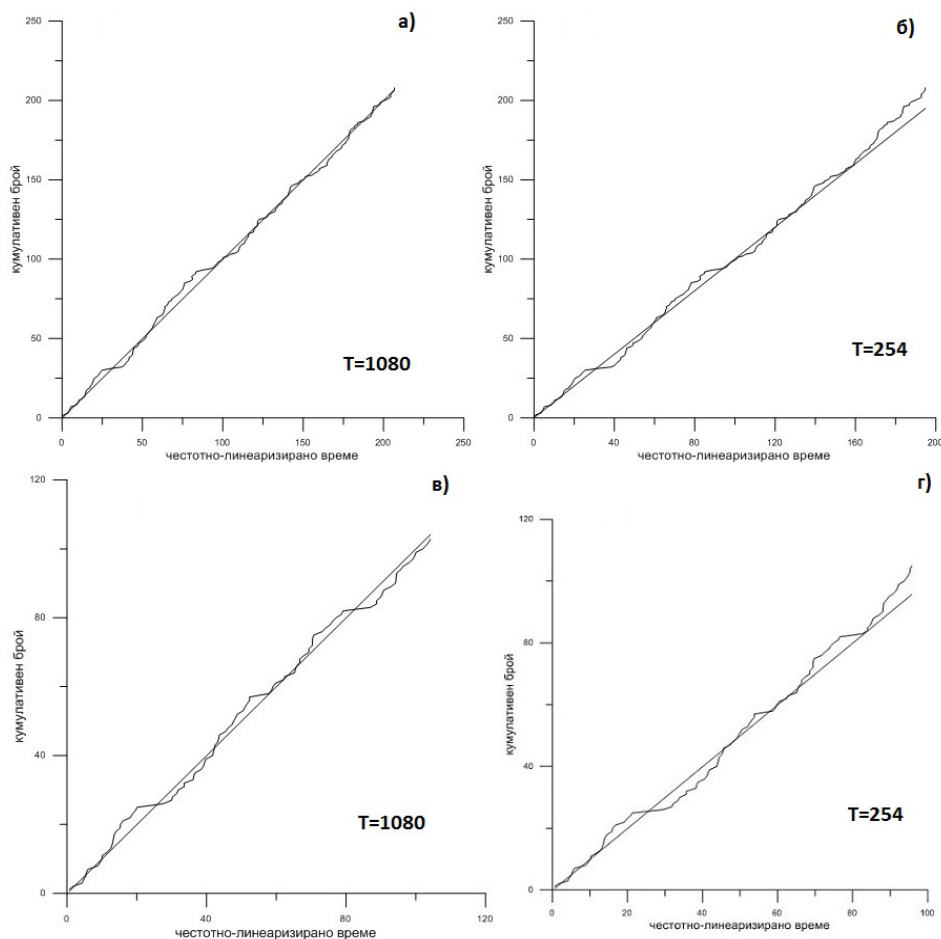
Модел	Период	K	p	C	K_1	p_1	c_1	AIC
Без вторична серия, без магнитуден праг	1080	14.86	0.88	0.02				279.96
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	1080	8.30	0.94	0.01				143.95
Без вторична серия, без магнитуден праг	254	15.46	0.92	0.03				-93.51
Без вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	254	8.57	0.99	0.02				-59.59
С една вторична серия, без магнитуден праг	1080	14.87	0.89	0.02	0.47	0.89	0.02	274.48
С една вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	1080	8.22	0.95	0.01	0.34	0.95	0.03	142.40
С една вторична без магнитуден праг	254	15.46	0.93	0.03	0.50	0.93	0.03	-99.69
С една вторична серия, с магнитуден праг $M_a=2$	254	8.49	1.02	0.02	0.38	1.02	0.04	-62.44

От получените оценки за параметрите K , p , c и стойности на AIC, представени в таблица 1, както и от представените резултати на фигурите, може да се направят следните заключения: 1) оценките и на трите параметъра се влияят от долния магнитуден праг M_a , параметрите K и c намаляват, докато параметърът p се увеличава с промяната на магнитудния праг; 2) оценките на параметъра p са в средата на

интервала от стойности на p ($p \in [0.71; 1.17]$), получени за афтершокови поредици, реализирани на територията на България и околностите (Simeonova, Solakov, 1999); 3) от честотното разпределение на афтершоковите събития може да се каже, че в първо приближение затихването на афтершоковата активност се описва добре с модифицираната формула на Omori; 4) моделът в най-добро съответствие с наблюденията (най-ниска стойност на AIC) е с една вторична серия за период $T=254$ дни, без магнитуден праг; 5) преминаването на активността към фонов сеизмичност се наблюдава около 360 дни след главното събитие, когато кумулативният брой на събитията се увеличава бързо и показва отклонение от началния тренд. Трябва да се отбележи, очакваната продължителност на афтершоковата поредица е 254 дни (продължителност определена чрез работите на Gardner and Knopoff, 1974; Христосков и Лазаров, 1981) и е превишена от наблюдаваната с около 100 дни.



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



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

Заклучение

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

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

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

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

Литература

- Bonchev E., I. Bune, L. Christoskov, J. Karagjuleva, V. Kostadinov, G. Reisner, S. Rizhikova, N. Shebalin, V. Sholpo, D. Sokerova, 1982. A method for compilation of seismic zoning prognostic maps for the territory of Bulgaria. *Geologica Balcanica*, 12(2), 2-48.
- Christoskov L., L. Dimitrova, D. Solakov, 2012. Magnitude determinations of P wave by digital broadband seismometers of NOTSSI network for local and regional events. *Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences*, 65 (5), 653-660.
- Dachev H., I. Vaptzarov, L. Filipov, D. Solakov, S. Simeonova, S. Nikolova, P. Sokolova, E. Botev, Tz. Georgiev, 1995. Seismology, geology, neotectonics, seismotectonics and seismic hazard assessment for the PNPP Belene site, Report of Project: Investigations and activities for increasing of the seismic safety of the PNPP Belene site, *Geoph. Inst., BAS, S, I*, pp. 250.
- Gardner, J. K., L. Knopoff., 1974. Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, 1363-1367.
- Jackson J., D. P. McKenzie, 1984. Active tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between western Turkey and Pakistan, *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 77, 185-246.
- Jackson J., McKenzie, D., 1988. The relationship between plate motions and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East. - *Geophysical Journal* 93, 45-73.
- McKenzie D. P., 1970. Plate tectonics of the Mediterranean region, *Nature*, 226, 239-243.
- Raykova, P., 2021. TEMPORAL DISTRIBUTION OF THE 2020 PLOVDIV EARTHQUAKE SEISMIC SEQUENCES. ПРОБЛЕМИ НА ГЕОГРАФИЯТА, 2, БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ, 2021, DOI:<https://doi.org/10.35101/prg-2021.2.2>, 15-28
- Simeonova S., D. Solakov, 1999. Temporal characteristics of some aftershock sequences in Bulgaria. *Annali di Geofisica*, 42, 5, 821-832.
- Simeonova S., D. Solakov, I. Aleksandrova, P. Raykova, V. Protopopova, 2015. The 2012 Mw5.6 earthquake in Sofia seismic zone and some characteristics of the aftershock sequence, *Bulgarian Chemical Communications*, Volume 47, Special Issue B, pp. 398-405.

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

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

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

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

ANNUAL REPORT OF THE OBSERVED GEOMAGNETIC ACTIVITY AT PANAGJURISHTE OBSERVATORY FOR 2016

M. Metodiev, P. Trifonova

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

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.7

Abstract. Magnetic variations shows different records at each observatory. They depend mainly on the latitude of the observatory and the local time. This paper reports the definitive geomagnetic data obtained at Panagjurishte Observatory in 2016, prepared in the form of local geomagnetic indices and absolute time-series of daily mean values plots. The Solar cycle 24 was a slowly rising one having moderate amplitude (<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>). It had a “double-peaked” solar maximum, with the first peak reaching sunspot number of 99 in 2011 and the second peak in April 2014 with 101.

Calculated indices show that 2016 had 62 days with “storm” level conditions of the geomagnetic field but only moderate levels have been reached. Only one day, 25.10.2016 picked at K-index 7. This is reasonable due to the fact that the sunspot numbers that year continue to decline.

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, 2016.

Introduction

The Geomagnetic observatory in Panagjurishte (PAG, 24.177°EN, 42.515°N) 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 observato-

ry was equipped with digital systems for the recording of geomagnetic field element's variations. Three different magnetometers are installed which operates in 24/7 regime: two tri-axial fluxgate magnetometers model FGE (DTU Space) – one of standard type in which the three fluxgate sensors are mounted on a $12 \times 12 \times 12 \text{ cm}^3$ marble cube placed on a three legged aluminium base, and a second version, in which the marble cube is suspended in two crossed phosphor-bronze strips to compensate any tilt of the sensor foundation. The third instrument is a three-axial search coil magnetometer used for studies on the longitudinal propagation of ULF signal (Chamati, 2020). It provides real time measurements at a sampling period of 0.01s which are integrated at a period of 1 s.

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) and automatically reported to INTERMAGNET. The present paper provides definitive geomagnetic data which are checked and processed to comply with the IAGA standards for observatory practices.

Local geomagnetic indices (K , A_k , ΣK) calculated at PAG observatory

Geomagnetic irregular variations or so called geomagnetic disturbances are driven by the solar wind. Globally, they are evaluated by the Kp-index which is predicted and later on determined by the world data centers (Matzka et al., 2021a). 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 (Sq). 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. By definition, the K-limit scales for all observatories are proportional to the Niemegk scale (Matzka, 2021b).

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 Ak [nT] which is determined by converting K –indices into eight 3-hour equivalent linear amplitudes a_k , and calculating the mean value. The ranges of the individual K numbers at PAG observatory and the 3-hour equivalent amplitude a_k which is assigned for each K value are defined in Metodiev and Trifonova, 2019. ΣK is the daily sum of the eight K numbers.

The calculated local geomagnetic indices (K , Ak , ΣK) at PAG observatory for 2016 are presented in Table 1.

Table 1. Local geomagnetic indices (K , A_k , ΣK) calculated at PAG observatory in 2016.

Activity Indices										
Day	K								Ak [nT]	ΣK
01-Jan-16	5	4	5	3	2	1	2	1	20	23
02-Jan-16	3	2	2	2	2	2	2	2	8	17
03-Jan-16	1	1	2	2	2	2	2	3	7	15
04-Jan-16	1	1	1	2	1	2	2	1	5	11
05-Jan-16	1	1	2	2	1	2	3	2	7	14
06-Jan-16	5	3	2	3	2	3	3	4	19	25
07-Jan-16	3	2	2	3	3	3	3	2	12	21
08-Jan-16	1	2	2	3	3	1	2	1	8	15
09-Jan-16	2	1	2	2	2	2	1	1	6	13
10-Jan-16	2	1	1	2	2	1	3	3	8	15
11-Jan-16	1	2	3	2	2	3	4	4	14	21
12-Jan-16	3	2	2	2	2	2	3	3	10	19
13-Jan-16	4	4	2	2	2	2	3	1	13	20
14-Jan-16	1	2	3	3	2	2	2	3	10	18
15-Jan-16	2	1	1	1	1	1	2	1	4	10
16-Jan-16	1	1	1	2	2	0	1	1	4	9
17-Jan-16	1	1	2	2	2	2	1	1	5	12
18-Jan-16	0	0	1	1	2	3	1	3	6	11
19-Jan-16	4	2	2	3	2	2	1	2	10	18
20-Jan-16	0	1	2	4	4	5	4	4	21	24
21-Jan-16	4	4	4	3	3	4	5	4	27	31
22-Jan-16	3	3	3	3	2	2	3	3	13	22
23-Jan-16	2	2	3	2	3	3	2	2	10	19
24-Jan-16	2	2	2	1	2	3	5	1	12	18
25-Jan-16	1	0	1	1	1	0	0	0	2	4
26-Jan-16	1	1	2	2	1	2	2	1	5	12
27-Jan-16	2	2	1	2	1	1	0	0	4	9
28-Jan-16	0	0	1	2	1	2	1	1	3	8
29-Jan-16	1	1	1	1	1	1	1	1	3	8
30-Jan-16	1	1	1	1	0	1	1	0	2	6
31-Jan-16	1	1	2	2	2	2	3	4	10	17

01-Feb-16	2	2	2	2	0	0	0	0	4	8
02-Feb-16	0	1	1	1	2	2	3	3	7	13
03-Feb-16	3	3	2	1	2	2	1	0	7	14
04-Feb-16	1	1	1	2	3	2	2	2	7	14
05-Feb-16	3	2	2	2	2	3	4	2	12	20
06-Feb-16	1	2	1	2	1	2	2	3	7	14
07-Feb-16	2	1	2	2	2	4	3	2	10	18
08-Feb-16	5	4	3	2	1	1	1	1	14	18
09-Feb-16	2	1	2	3	2	1	2	3	8	16
10-Feb-16	3	2	1	1	1	1	1	2	6	12
11-Feb-16	2	1	1	2	1	2	2	4	8	15
12-Feb-16	3	2	2	3	2	3	3	3	12	21
13-Feb-16	2	3	2	2	1	1	0	1	6	12
14-Feb-16	2	2	2	2	2	4	2	2	10	18
15-Feb-16	2	1	2	2	2	1	2	5	11	17
16-Feb-16	4	2	2	4	5	5	6	4	34	32
17-Feb-16	4	3	3	3	3	4	5	5	26	30
18-Feb-16	4	3	3	4	3	3	5	4	24	29
19-Feb-16	3	2	2	3	3	4	4	2	15	23
20-Feb-16	3	1	1	1	2	1	1	1	5	11
21-Feb-16	1	2	1	1	1	1	3	3	7	13
22-Feb-16	0	1	0	1	1	1	1	1	2	6
23-Feb-16	2	1	1	1	1	1	2	3	6	12
24-Feb-16	2	1	1	1	2	2	2	2	6	13
25-Feb-16	3	1	1	2	1	1	2	3	7	14
26-Feb-16	3	2	1	1	2	1	2	0	6	12
27-Feb-16	0	1	1	2	1	1	1	1	3	8
28-Feb-16	1	1	1	2	1	0	1	2	4	9
29-Feb-16	2	0	1	2	1	1	1	3	5	11
01-Mar-16	3	2	2	2	2	2	1	3	9	17
02-Mar-16	2	1	1	2	2	3	1	1	6	13
03-Mar-16	2	2	2	2	2	1	1	1	6	13
04-Mar-16	3	2	0	1	1	1	0	0	4	8
05-Mar-16	0	1	1	2	2	1	0	0	3	7

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

09-Apr-16	0	0	0	1	0	1	0	1	1	3
10-Apr-16	1	2	3	3	2	1	1	2	8	15
11-Apr-16	0	0	0	1	1	3	1	2	4	8
12-Apr-16	3	2	1	2	3	3	4	4	15	22
13-Apr-16	5	3	3	3	4	4	4	3	24	29
14-Apr-16	3	2	2	3	3	5	4	4	20	26
15-Apr-16	3	2	1	1	2	2	2	2	7	15
16-Apr-16	0	1	2	2	2	4	4	4	13	19
17-Apr-16	4	3	2	2	2	3	4	3	15	23
18-Apr-16	3	1	2	2	1	0	1	1	5	11
19-Apr-16	0	1	0	1	1	1	0	0	2	4
20-Apr-16	0	1	2	2	1	1	2	1	4	10
21-Apr-16	0	1	2	2	1	2	2	1	5	11
22-Apr-16	2	1	1	2	3	3	3	4	12	19
23-Apr-16	1	1	1	2	3	2	3	4	10	17
24-Apr-16	2	1	2	1	2	4	3	1	9	16
25-Apr-16	1	1	2	2	2	1	2	0	5	11
26-Apr-16	1	1	1	2	2	1	2	3	6	13
27-Apr-16	1	2	2	1	3	3	3	2	9	17
28-Apr-16	2	1	1	2	1	1	1	1	4	10
29-Apr-16	1	1	0	1	1	1	2	1	3	8
30-Apr-16	1	1	2	2	2	2	2	3	7	15
01-May-16	2	2	2	2	3	3	4	3	13	21
02-May-16	4	5	2	2	3	3	4	4	22	27
03-May-16	2	3	2	2	2	3	3	3	11	20
04-May-16	1	1	1	1	1	1	1	1	3	8
05-May-16	0	1	2	3	3	2	2	3	9	16
06-May-16	3	2	2	3	3	3	4	4	16	24
07-May-16	4	1	1	2	2	2	1	3	9	16
08-May-16	5	5	5	4	4	4	4	6	42	37
09-May-16	5	3	2	3	3	3	4	4	21	27
10-May-16	3	3	2	2	2	2	3	2	10	19
11-May-16	2	2	1	1	1	1	1	2	5	11
12-May-16	2	1	1	1	0	0	1	2	3	8

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

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

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

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

25-Sep-16	4	4	2	4	3	4	5	5	28	31
26-Sep-16	4	3	3	2	3	3	4	5	21	27
27-Sep-16	5	3	3	5	5	5	4	3	33	33
28-Sep-16	4	3	3	4	4	4	6	4	31	32
29-Sep-16	3	4	3	3	4	5	5	3	26	30
30-Sep-16	3	3	3	3	3	4	5	2	20	26
01-Oct-16	3	3	2	2	2	4	5	4	19	25
02-Oct-16	3	2	2	2	4	3	5	3	18	24
03-Oct-16	1	3	3	1	2	3	4	4	14	21
04-Oct-16	3	4	3	4	3	2	4	4	20	27
05-Oct-16	3	2	3	2	2	3	2	3	11	20
06-Oct-16	2	1	1	1	1	3	3	2	7	14
07-Oct-16	2	1	1	1	1	2	3	1	6	12
08-Oct-16	2	3	2	2	1	1	2	2	7	15
09-Oct-16	2	1	1	1	2	1	3	2	6	13
10-Oct-16	3	2	2	2	2	3	4	1	11	19
11-Oct-16	0	1	1	1	0	0	1	1	2	5
12-Oct-16	1	0	1	2	1	1	2	3	5	11
13-Oct-16	3	3	4	4	4	5	5	5	32	33
14-Oct-16	6	4	3	3	2	2	2	1	20	23
15-Oct-16	3	2	2	2	2	3	2	3	10	19
16-Oct-16	3	2	2	3	3	3	5	4	19	25
17-Oct-16	3	2	3	4	2	3	4	4	18	25
18-Oct-16	2	2	3	2	1	2	2	3	9	17
19-Oct-16	3	1	1	1	1	1	2	1	5	11
20-Oct-16	2	0	1	1	0	0	2	0	3	6
21-Oct-16	0	0	1	1	1	0	0	1	2	4
22-Oct-16	1	1	1	1	1	2	2	2	5	11
23-Oct-16	0	3	2	1	1	3	3	3	9	16
24-Oct-16	4	3	2	2	4	3	3	4	18	25
25-Oct-16	3	3	3	4	6	7	5	5	49	36
26-Oct-16	3	3	3	5	5	6	4	5	37	34
27-Oct-16	4	3	3	2	3	5	4	4	23	28

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

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

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

In Table 2 are given days with K-indices equal to or larger than 5 which means geomagnetic storm conditions. Indices above the “threshold” value are marked in red. For 2016 there are 62 days with K-index ≥ 5 , 11 days with K-index ≥ 6 and 1 day with K-index =7 (25 Oct 2016).

Table 2 Days with K-index ≥ 5 registered in 2016 at the Panagjurishte observatoryError! Not a valid link.

DD-MM-YY	00-03	03-06	06-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-24	Ak [nT]	ΣK
01-Jan-16	5	4	5	3	2	1	2	1	20	23
06-Jan-16	5	3	2	3	2	3	3	4	19	25
20-Jan-16	0	1	2	4	4	5	4	4	21	24
21-Jan-16	4	4	4	3	3	4	5	4	27	31
24-Jan-16	2	2	2	1	2	3	5	1	12	18
08-Feb-16	5	4	3	2	1	1	1	1	14	18
15-Feb-16	2	1	2	2	2	1	2	5	11	17
16-Feb-16	4	2	2	4	5	5	6	4	34	32
17-Feb-16	4	3	3	3	3	4	5	5	26	30
18-Feb-16	4	3	3	4	3	3	5	4	24	29
06-Mar-16	1	2	3	3	3	6	6	6	37	30
07-Mar-16	4	4	3	2	3	4	4	5	24	29
11-Mar-16	1	2	2	4	6	3	4	4	24	26
14-Mar-16	2	1	1	1	1	3	5	4	14	18
15-Mar-16	4	3	3	3	1	3	5	4	21	26
16-Mar-16	5	2	2	3	3	2	4	5	22	26
02-Apr-16	2	1	1	1	3	5	4	4	17	21
07-Apr-16	2	1	2	2	1	3	5	6	21	22
13-Apr-16	5	3	3	3	4	4	4	3	24	29
14-Apr-16	3	2	2	3	3	5	4	4	20	26
08-May-16	5	5	5	4	4	4	4	6	42	37
09-May-16	5	3	2	3	3	3	4	4	21	27
05-Jun-16	1	2	2	4	5	4	5	4	24	27
14-Jun-16	2	2	2	2	2	3	5	4	16	22
19-Jul-16	1	1	1	1	1	1	1	5	9	12
20-Jul-16	5	5	3	2	2	3	2	1	19	23
02-Aug-16	2	2	2	2	3	4	4	5	18	24
03-Aug-16	5	5	4	4	4	5	3	2	31	32
24-Aug-16	5	3	1	3	3	2	2	4	17	23
30-Aug-16	2	2	3	2	2	4	4	5	18	24
01-Sep-16	4	2	3	2	4	4	5	5	26	29
02-Sep-16	5	4	3	3	5	4	3	5	30	32

25-Sep-16	4	4	2	4	3	4	5	5	28	31
26-Sep-16	4	3	3	2	3	3	4	5	21	27
27-Sep-16	5	3	3	5	5	5	4	3	33	33
28-Sep-16	4	3	3	4	4	4	6	4	31	32
29-Sep-16	3	4	3	3	4	5	5	3	26	30
30-Sep-16	3	3	3	3	3	4	5	2	20	26
01-Oct-16	3	3	2	2	2	4	5	4	19	25
02-Oct-16	3	2	2	2	4	3	5	3	18	24
13-Oct-16	3	3	4	4	4	5	5	5	32	33
14-Oct-16	6	4	3	3	2	2	2	1	20	23
16-Oct-16	3	2	2	3	3	3	5	4	19	25
25-Oct-16	3	3	3	4	6	7	5	5	49	36
26-Oct-16	3	3	3	5	5	6	4	5	37	34
27-Oct-16	4	3	3	2	3	5	4	4	23	28
10-Nov-16	2	2	2	2	3	5	3	3	15	22
13-Nov-16	3	3	2	3	3	4	5	4	21	27
24-Nov-16	4	2	2	3	5	3	5	4	24	28
25-Nov-16	4	4	4	3	5	4	5	2	28	31
08-Dec-16	3	3	3	3	3	5	5	5	27	30
09-Dec-16	3	2	3	4	3	5	5	5	28	30
21-Dec-16	2	2	1	3	4	6	4	4	24	26

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). Furthermore, there are also effects of additional sources which could influence the magnetic records as for example thunderstorms (Chamati and Andonov, 2021). Approximate description of the strength of different external variations however, are provided by geomagnetic indices. A quantitative measure of 2016 local geomagnetic activity in the form of 3 hour *K*-index is published here, based upon the range of fluctuations at the PAG observatory records. Table 2 shows that 2016 has less disturbed geomagnetic field with 62 disturbed days. The most active months are September and October, each of them having 8 days with recorded geomagnetic storm. The most strong event during 2016 is one – between 25-27 October with largest *K*-index 7. The observed activity is quite reasonable because 2016 is already in the declining part of the 24th Solar cycle. Data are checked and verified according to IAGA requirements (Jankowski and Sucksdorff, 1996).

Secular trend of the Declination (D), Inclination (I), Horizontal (X and Y), and Vertical (Z) field components, as well as of the Total field intensity measure in the Panagjurishte observatory up to 2016 is plotted in the next figure:

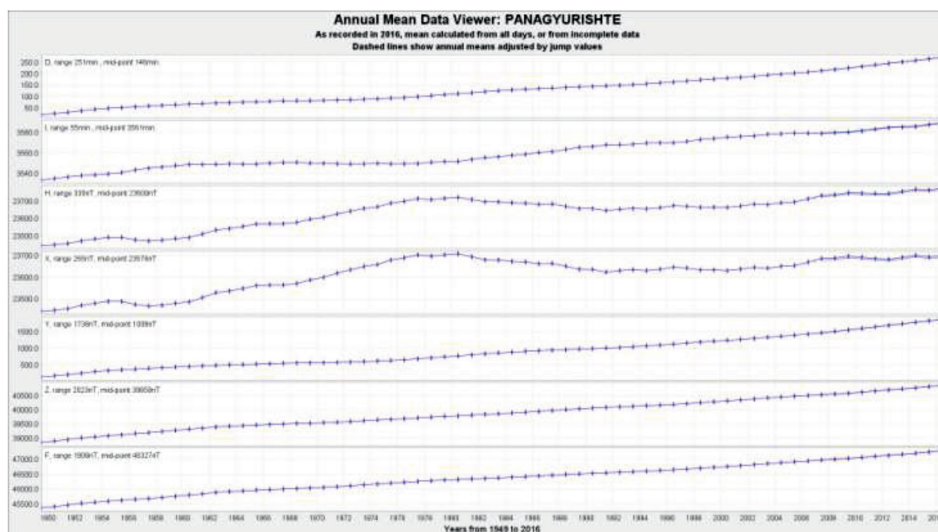


Fig. 1. Annual mean values of D [min], I [min], H [nT], X [nT], Y [nT], Z [nT] and F [nT] registered at PAG observatory from 1948 up to 2016.

References

- Buchvarov I., 2006. Field and observatory geomagnetic measurements in Bulgaria. in Rasson and Delipetrov (eds.) *Geomagnetics for Aeronautical Safety*, Springer, p. 61-62.
- Chamati, M. 2020. ULF geomagnetic observation at Panagjurishte, Bulgaria as a tool for investigation of the magnetosphere-ionosphere-lithosphere system. *BGJ*, Vol. 43, pp. 89-97.
- Chamati M. and B. Andonov 2021. Effects of a Strong Thunderstorm on the ULF Geomagnetic Field Variations, Conference Proceedings, 11th Congress of the Balkan Geophysical Society, 10-15 Oct 2021, Volume 2021, Bucharest, Romania, EAGE, DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202149BGS5>
- 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.
- Matzka, J., Bronkalla, O.; Tornow, K.; Elger, K.; Stolle, C., 2021a. Geomagnetic Kp index. V. 1.0. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/Kp.0001>
- Matzka, J., Stolle, C., Yamazaki, Y., Bronkalla, O., & Morschhauser, A., 2021b. The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity. *Space Weather*, 19, e2020SW002641. <https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
- Metodiev, M., & Trifonova, P. (2019). Annual report of the observed geomagnetic activity in Panagjurishte Observatory for 2014. *Bulgarian Geophysical Journal*, Vol. 42, p. 62-76. <https://doi.org/10.34975/BGJ-2019.42.6>
- 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 2016

М. Методиев, П. Трифонова

Резюме: Записите на магнитните вариации показват различни стойности и поведение във всяка обсерватория. Те зависят основно от географската ширина на обсерваторията и местното време.

Тази статия представя окончателните геомагнитни данни, получени в обсерватория Панагюрище през 2016 г., изготвени под формата на локални геомагнитни индекси. Както вече е добре известно, Слънчев цикъл 24 е бавно нарастващ с умерена амплитуда. Той се характеризира с двоен слънчев максимум, като при първия пик е достигнат брой на слънчевите петна 99 през 2011 г., а във втория пик през април 2014 г. броят на петната е 101.

Изчислените индекси показват, че през 2016 г. има 62 дни с условия, определящи ниво „буря“ на геомагнитното поле, но са достигнати само умерени нива. Само за един ден, 25.10.2016 г., е изчислен К-индекс 7. Това е очаквано и разбираемо поради факта, че броят на слънчевите петна през тази част от Слънчевия цикъл продължава да намалява.

ANNUAL REPORT OF THE OBSERVED GEOMAGNETIC ACTIVITY AT PANAGJURISHTE OBSERVATORY FOR 2017

M. Metodiev, P. Trifonova

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

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.8

Abstract. Magnetic variations shows different records at each observatory. They depend mainly on the latitude of the observatory and the local time. This paper reports the definitive geomagnetic data obtained at Panagjurishte Observatory in 2017, prepared in the form of local geomagnetic indices. In 2017, the Solar cycle 24 is already in his decreasing phase (<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>). It had a “double-peaked” solar maximum, with the first peak reaching sunspot number of 99 in 2011 and the second peak in April 2014 with 101.

Calculated indices show that 2017 had 50 days with “storm” level conditions of the geomagnetic field but only moderate levels have been reached. Only two days, on 22 February and 08 September, picked at K-index 7. This weak activity is reasonable due to the fact that the sunspot numbers that year continue to decline.

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, 2017.

Introduction

The Geomagnetic observatory in Panagjurishte (PAG, 24.177°EN, 42.515°N) 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 observato-

ry was equipped with digital systems for the recording of geomagnetic field element's variations. Three different magnetometers are installed which operates in 24/7 regime: two tri-axial fluxgate magnetometers model FGE (DTU Space) – one of standard type in which the three fluxgate sensors are mounted on a $12 \times 12 \times 12$ cm³ marble cube placed on a three legged aluminium base, and a second version, in which the marble cube is suspended in two crossed phosphor-bronze strips to compensate any tilt of the sensor foundation. The third instrument is a three-axial search coil magnetometer used for studies on the longitudinal propagation of ULF signal (Chamati, 2020). It provides real time measurements at a sampling period of 0.01s which are integrated at a period of 1 s.

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) and automatically reported to INTERMAGNET. The present paper provides definitive geomagnetic data which are checked and processed to comply with the IAGA standards for observatory practices.

Local geomagnetic indices (K , A_K , ΣK) calculated at PAG observatory

Geomagnetic irregular variations or so called geomagnetic disturbances are driven by the solar wind. Globally, they are evaluated by the Kp-index which is predicted and later on determined by the world data centers (Matzka et al., 2021a). 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 (Sq). 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. By definition, the K-limit scales for all observatories are proportional to the Niemegk scale (Matzka, 2021b).

The eight three-hourly K numbers (after Bartels, 1939) 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 Ak [nT] which is determined by converting K –indices into eight 3-hour equivalent linear amplitudes a_K , and calculating the mean value. The ranges of the individual K numbers at PAG observatory and the 3-hour equivalent amplitude a_K which is assigned for each K value are defined in Metodiev and Trifonova, 2019. ΣK is the daily sum of the eight K numbers.

The calculated local geomagnetic indices (K , Ak , ΣK) at PAG observatory for 2017 are presented in Table 1.

Table 1. Local geomagnetic indices (K , A_K , ΣK) calculated at PAG observatory in 2017

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

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

07-Mar-17	2	2	3	3	3	4	4	3	16	24
08-Mar-17	3	1	2	2	3	2	4	4	14	21
09-Mar-17	3	2	#	4	3	2	4	3	14	21
10-Mar-17	2	2	3	3	2	2	1	2	9	17
11-Mar-17	1	0	1	1	1	1	2	4	6	11
12-Mar-17	3	3	1	1	2	1	1	1	7	13
13-Mar-17	0	1	1	2	1	1	0	1	3	7
14-Mar-17	1	1	1	1	2	2	2	2	5	12
15-Mar-17	1	1	1	2	1	1	2	4	7	13
16-Mar-17	3	2	0	0	1	1	2	2	5	11
17-Mar-17	0	1	1	1	0	1	1	2	3	7
18-Mar-17	1	0	0	0	1	1	1	2	2	6
19-Mar-17	0	0	1	1	0	1	2	2	3	7
20-Mar-17	0	0	1	0	0	1	1	1	2	4
21-Mar-17	2	3	4	2	2	5	5	4	23	27
22-Mar-17	4	2	2	2	4	4	5	5	25	28
23-Mar-17	4	3	2	2	2	2	1	2	10	18
24-Mar-17	1	2	2	1	3	3	1	0	7	13
25-Mar-17	0	1	1	1	1	1	0	1	2	6
26-Mar-17	2	0	1	1	1	1	1	2	4	9
27-Mar-17	2	4	4	5	5	5	6	4	39	35
28-Mar-17	3	4	2	3	3	3	4	4	19	26
29-Mar-17	3	3	3	3	3	4	3	3	17	25
30-Mar-17	3	3	2	2	3	4	4	4	18	25
31-Mar-17	4	3	3	4	3	4	3	4	21	28
01-Apr-17	2	2	2	3	2	4	3	3	13	21
02-Apr-17	2	2	2	2	2	3	1	1	7	15
03-Apr-17	0	1	2	2	2	2	0	1	4	10
04-Apr-17	2	3	3	3	3	1	1	3	11	19
05-Apr-17	2	1	1	2	2	3	3	4	11	18
06-Apr-17	2	1	1	2	3	3	2	1	8	15
07-Apr-17	3	1	2	2	1	2	3	3	9	17
08-Apr-17	3	3	3	2	2	2	3	4	14	22
09-Apr-17	3	3	3	2	2	3	2	2	11	20

10-Apr-17	2	1	1	2	2	1	1	1	5	11
11-Apr-17	1	1	2	3	2	2	4	3	11	18
12-Apr-17	3	1	1	1	0	1	1	0	4	8
13-Apr-17	1	0	1	0	1	2	3	1	4	9
14-Apr-17	3	3	2	2	2	3	4	2	13	21
15-Apr-17	3	1	2	1	1	2	2	1	6	13
16-Apr-17	1	1	1	1	0	1	2	2	4	9
17-Apr-17	0	1	2	3	2	1	0	1	5	10
18-Apr-17	2	1	1	1	2	2	2	2	6	13
19-Apr-17	3	3	3	1	1	3	4	4	15	22
20-Apr-17	3	5	3	4	3	3	3	3	21	27
21-Apr-17	0	1	1	1	2	4	5	5	17	19
22-Apr-17	3	4	3	4	5	5	4	5	32	33
23-Apr-17	4	3	4	5	5	5	4	4	33	34
24-Apr-17	3	3	3	2	2	3	4	3	15	23
25-Apr-17	3	2	2	3	3	3	3	3	13	22
26-Apr-17	3	1	2	1	1	3	3	3	10	17
27-Apr-17	2	2	2	2	1	2	2	1	6	14
28-Apr-17	1	1	1	1	2	2	1	2	5	11
29-Apr-17	2	1	2	2	1	1	3	3	8	15
30-Apr-17	1	1	1	1	1	2	2	3	6	12
01-May-17	3	2	1	2	1	1	2	2	7	14
02-May-17	1	2	2	2	1	1	0	2	5	11
03-May-17	2	0	1	1	1	2	0	0	3	7
04-May-17	0	2	1	2	1	1	2	4	7	13
05-May-17	3	2	1	2	1	1	1	1	6	12
06-May-17	1	2	2	2	1	0	2	1	5	11
07-May-17	1	2	2	2	1	1	3	2	7	14
08-May-17	2	2	2	2	2	2	2	2	7	16
09-May-17	2	2	1	2	3	3	2	2	9	17
10-May-17	2	1	1	1	3	2	2	2	7	14
11-May-17	1	3	2	1	2	2	2	2	7	15
12-May-17	2	2	2	2	3	1	1	2	7	15
13-May-17	1	2	1	2	2	1	1	2	5	12

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

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

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

22-Aug-17	4	4	3	2	3	3	3	4	19	26
23-Aug-17	3	3	2	3	4	5	5	3	24	28
24-Aug-17	3	3	2	2	2	2	1	1	8	16
25-Aug-17	0	1	2	1	2	1	1	2	4	10
26-Aug-17	1	1	2	1	1	2	2	1	5	11
27-Aug-17	2	1	1	3	1	3	4	4	13	19
28-Aug-17	1	1	1	1	1	1	0	1	3	7
29-Aug-17	1	1	1	2	1	3	4	3	10	16
30-Aug-17	2	2	2	1	1	1	1	0	4	10
31-Aug-17	2	4	6	5	4	4	4	3	32	32
01-Sep-17	3	2	3	4	4	2	2	4	17	24
02-Sep-17	4	4	4	3	2	3	3	3	19	26
03-Sep-17	2	2	0	2	3	3	1	2	8	15
04-Sep-17	3	3	2	2	3	3	4	5	19	25
05-Sep-17	4	3	3	2	2	2	3	1	12	20
06-Sep-17	2	2	2	4	5	3	1	4	18	23
07-Sep-17	3	4	3	3	2	1	3	6	22	25
08-Sep-17	7	4	5	5	6	6	5	4	62	42
09-Sep-17	2	2	1	2	2	0	0	0	4	9
10-Sep-17	0	0	1	1	1	3	2	3	6	11
11-Sep-17	3	2	2	1	2	3	3	3	11	19
12-Sep-17	2	1	2	2	3	3	5	5	19	23
13-Sep-17	6	2	3	3	2	1	2	0	17	19
14-Sep-17	3	2	2	3	4	6	4	4	26	28
15-Sep-17	4	3	4	3	3	4	5	4	25	30
16-Sep-17	4	4	3	3	4	4	3	3	21	28
17-Sep-17	2	2	2	3	5	4	3	2	17	23
18-Sep-17	4	3	3	3	3	3	3	4	18	26
19-Sep-17	2	1	1	2	1	2	3	2	7	14
20-Sep-17	3	2	2	2	3	2	3	1	10	18
21-Sep-17	1	1	2	2	2	1	2	3	7	14
22-Sep-17	1	0	2	1	1	1	3	3	6	12
23-Sep-17	1	1	1	1	1	1	3	2	5	11
24-Sep-17	1	1	1	1	1	2	3	3	7	13

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

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

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

Error! Not a valid link.

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

In Table 2 are given days with K-indices equal to or larger than 5 which means geomagnetic storm conditions. Indices above the “threshold” value are marked in red. For 2017 there are 50 days with K-index ≥ 5 , 7 days with K-index ≥ 6 and 2 days with K-index =7 (22 Feb and 08 Sep 2017).

Table 2. Days with K-index ≥ 5 registered in 2017 at the Panagjurishte observatory

Error! Not a valid link.

DD-MM-YY	00-03	03-06	06-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-24	Ak [nT]	ΣK
26-Jan-17	1	1	2	3	4	5	4	3	18	23
31-Jan-17	3	2	3	3	3	4	4	5	21	27
01-Feb-17	4	3	3	3	4	5	4	5	28	31
17-Feb-17	2	3	3	4	2	4	3	5	20	26
18-Feb-17	5	3	2	1	2	2	4	3	16	22
22-Feb-17	3	2	3	7	5	3	2	1	31	26
01-Mar-17	2	3	2	4	4	5	5	5	28	30
02-Mar-17	4	3	3	4	5	4	5	3	28	31
05-Mar-17	3	2	2	2	3	3	5	4	18	24
06-Mar-17	4	3	1	3	5	4	5	4	26	29
21-Mar-17	2	3	4	2	2	5	5	4	23	27
22-Mar-17	4	2	2	2	4	4	5	5	25	28
27-Mar-17	2	4	4	5	5	5	6	4	39	35
20-Apr-17	3	5	3	4	3	3	3	3	21	27
21-Apr-17	0	1	1	1	2	4	5	5	17	19
22-Apr-17	3	4	3	4	5	5	4	5	32	33
23-Apr-17	4	3	4	5	5	5	4	4	33	34
27-May-17	1	1	0	1	2	4	3	5	13	17
28-May-17	5	5	3	3	3	2	2	1	20	24
11-Jun-17	1	2	2	2	4	5	5	3	20	24
16-Jun-17	1	3	4	4	4	4	3	5	24	28
09-Jul-17	4	3	2	5	3	3	4	3	21	27
16-Jul-17	2	2	5	4	4	5	5	4	30	31
17-Jul-17	3	4	3	3	4	5	2	2	20	26
18-Aug-17	4	3	2	3	4	4	5	3	23	28

19-Aug-17	4	2	4	4	4	5	3	4	26	30
23-Aug-17	3	3	2	3	4	5	5	3	24	28
31-Aug-17	2	4	6	5	4	4	4	3	32	32
04-Sep-17	3	3	2	2	3	3	4	5	19	25
06-Sep-17	2	2	2	4	5	3	1	4	18	23
07-Sep-17	3	4	3	3	2	1	3	6	22	25
08-Sep-17	7	4	5	5	6	6	5	4	62	42
12-Sep-17	2	1	2	2	3	3	5	5	19	23
13-Sep-17	6	2	3	3	2	1	2	0	17	19
14-Sep-17	3	2	2	3	4	6	4	4	26	28
15-Sep-17	4	3	4	3	3	4	5	4	25	30
27-Sep-17	3	3	4	3	3	4	5	5	26	30
28-Sep-17	5	4	4	3	4	4	4	4	28	32
11-Oct-17	4	3	4	3	5	5	4	4	29	32
12-Oct-17	5	2	4	4	5	4	3	5	31	32
13-Oct-17	3	3	1	3	5	5	5	5	30	30
14-Oct-17	5	3	4	4	4	4	3	3	25	30
24-Oct-17	1	0	3	3	5	5	3	4	21	24
07-Nov-17	1	2	3	3	4	4	6	5	28	28
08-Nov-17	4	4	3	4	5	5	4	5	33	34
24-Nov-17	3	2	1	1	0	1	5	4	13	17
04-Dec-17	0	1	1	2	2	3	4	5	14	18
05-Dec-17	3	3	3	4	5	5	4	4	28	31
12-Dec-17	3	2	2	2	1	4	5	3	16	22
17-Dec-17	3	3	4	3	3	3	5	4	22	28

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). Furthermore, there are also effects of additional sources which could influence the magnetic records as for example thunderstorms (Chamati and Andonov, 2021).

Approximate description of the strength of different external variations however, are provided by geomagnetic indices. A quantitative measure of 2017 local geomagnetic activity in the form of 3 hour *K*-index is published here, based upon the range of fluc-

tuations at the PAG observatory records. Table 2 shows that the number of data having disturbed geomagnetic field in 2017 is decreasing down to 50 (for comparison - in 2016 there were 62). The most active period began on August 31 and led to 10 stormy days in September. The strongest events during 2017 were on 22 February and 08 September with largest K-index 7. The observed activity is quite reasonable because 2017 is already in the declining part of the 24th Solar cycle.

Data are checked and verified according to IAGA requirements (Jankowski and Sucksdorff, 1996).

Secular trend of the Declination (D), Inclination (I), Horizontal (X and Y), and Vertical (Z) field components, as well as of the Total field intensity measure in the Panagjurishte observatory up to 2017 is plotted in the next figure:

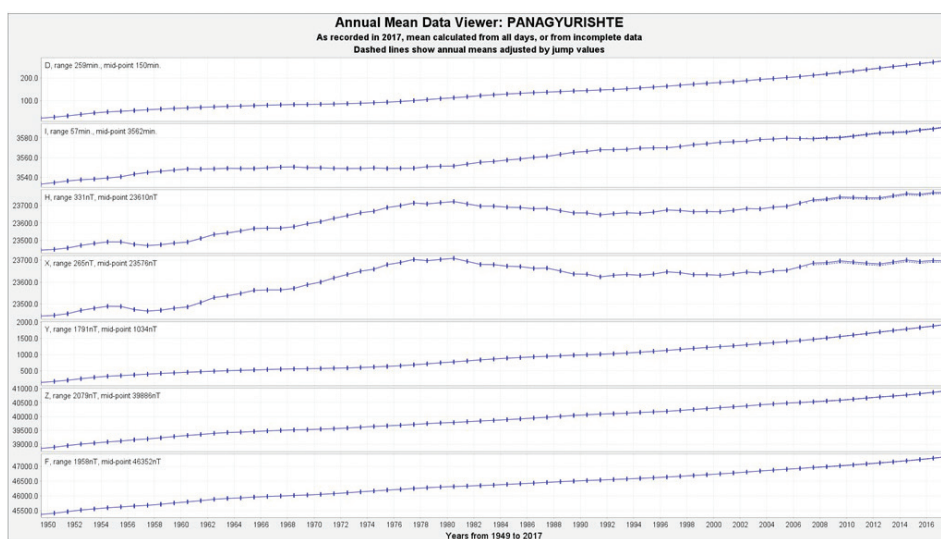


Fig. 1. Annual mean values of D [min], I [min], H [nT], X [nT], Y [nT], Z [nT] and F [nT] registered at PAG observatory from 1948 up to 2017

References

- Bartels, J., N. H. Heck and H. F. Johnston, 1939. The three-hour-range index measuring geomagnetic activity, *Terr. Magn. Atmos. Elec.*, 44, 455.
- Buchvarov I., 2006. Field and observatory geomagnetic measurements in Bulgaria. in Rasson and Delipetrov (*eds.*) *Geomagnetics for Aeronautical Safety*, Springer, p. 61-62.
- Chamati, M. 2020. ULF geomagnetic observation at Panagjurishte, Bulgaria as a tool for investigation of the magnetosphere-ionosphere-lithosphere system. *BGJ*, Vol. 43, pp. 89-97.
- Chamati M. and B. Andonov 2021. Effects of a Strong Thunderstorm on the ULF Geomagnetic Field Variations, *Conference Proceedings, 11th Congress of the Balkan Geophysical Society*, 10-15 Oct 2021, Volume 2021, Bucharest, Romania, EAGE, DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202149BGS5>

- 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.
- Matzka, J., Bronkalla, O.; Tornow, K.; Elger, K.; Stolle, C., 2021a. Geomagnetic Kp index. V. 1.0. GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/Kp.0001>
- Matzka, J., Stolle, C., Yamazaki, Y., Bronkalla, O., & Morschhauser, A., 2021b. The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity. *Space Weather*, 19, e2020SW002641. <https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
- Metodiev, M., & Trifonova, P. (2019). Annual report of the observed geomagnetic activity in Panagjurishte Observatory for 2014. *Bulgarian Geophysical Journal*, Vol. 42, p. 62-76. <https://doi.org/10.34975/BGJ-2019.42.6>
- 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 2017

М. Методиев, П. Трифонова

Резюме: Записите на магнитните вариации показват различни стойности и поведение във всяка обсерватория. Те зависят основно от географската ширина на обсерваторията и местното време.

Тази статия представя окончателните геомагнитни данни, получени в обсерватория Панагюрище през 2017 г., изготвени под формата на локални геомагнитни индекси. През 2017 г. Слънчевият цикъл 24 вече е в своята намаляваща фаза (<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>). Той се характеризира с двоен слънчев максимум, като при първия пик е достигнат брой на слънчевите петна 99 през 2011 г., а във втория пик през април 2014 г. броят на петната е 101.

Изчислените индекси показват, че през 2017 г. има 50 дни с условия, определящи ниво „буря“ на геомагнитното поле, но са достигнати само умерени нива. Само два дни, на 22 февруари и 08 септември 2017 г., е изчислен К-индекс 7. Това е очаквано и разбираемо поради факта, че броят на слънчевите петна през тази част от Слънчевия цикъл продължава да намалява.

SPECTRAL CHARACTERISTICS IN ULF RANGE OF GEOMAGNETIC STORM OBSERVED AT PANAGJURISTE, BULGARIA ON 27-28 SEPTEMBER 2017

M. Chamati

National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences,
ul.Acad.G.Bonchev, bl3, Sofia1113, Bulgaria, e-mail: mchamati@geophys.bas.bg

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.9

Abstract. On 27-28 September 2017 at Geomagnetic Observatory Panagjuriste (PAG), Bulgaria the geomagnetic storm - class G2 increasing to G3 was observed. It caused disturbances over the ultra-low frequency (ULF) geomagnetic field variations. The time series of the collected data along the X (north-south), the Y (east-west) and Z (vertical) directions are analyzed. Trough Morlet wavelet analysis the dynamic spectra for the X and the Y components are obtained. They show disturbances strongly corresponding with geomagnetic activity and covers all investigated time scales (1-600s). The two most powerful interferences are recorded on 28 September- 09UTC and 21UTC- along the Y component which strongly correspond with Kp index, but not with local K index. They don't appear along the other two components. It is found that during the time interval 00-03UTC on 28 September the pulsations are recorded along the X component with periodicity that covers time scales 40-110s and main period about 85s, and they are most likely related to injections of energetic plasma.

Key words: ULF variations, spectral properties, geomagnetic storm, Panagjuriste.

Introduction

The geomagnetic field variations, in particular ULF variations, recorded by the different types of magnetometers provide very useful information about the Sun and magnetosphere/ionosphere processes (Blagoveshchensky and Sergeeva, 2018; Borovsky, 2020; Chamati, M., 2018). Many centers for scientific information collecting geophysical data, such as National Geoinformation Center include in their database information on different geophysical fields (Miloshev et al., 2019) as well as information about geomagnetic field elements (Metodiev and Trifonova, 2020).

The geomagnetic storms are natural phenomena which are directly linked with the Solar activity. Depending on the latitude, they cause disturbances in the Earth's magnetic field which can be recorded on the ground. The records include among other "noises" of different type of sources, such as magnetospheric/ionospheric, atmospheric, lithospheric and anthropogenic (Chamati and Botev, 2019; Klimenko et al., 2018; McPherron, 2005; Nenovski et al., 2013; Villante and Vellante, 1998). By studying of the geomagnetic field variations and disturbances caused by natural phenomena the useful information about the Solar-terrestrial interactions is provided (Blagoveshchensky and Sergeeva, 2018; Borovsky, 2020). Irregular short-term geomagnetic variations of the geomagnetic field due to storms and substorms have peculiar spectral characteristics covering a multitude of periods ranging from a part of second to a few minutes (Chapagain, 2017; Kleimenova et al., 2019; Watermann and Gleisner, 2009).

Measuring instrument

At the Geomagnetic Observatory Panagjuriste, Bulgaria (geographic coordinates: 42.51N/24.18E) operate a tri-axial search-coil magnetometer. It is designed to measure and collect data of the Earth's magnetic field variations, specific geomagnetic events and long-term study of ULF signals. The sensitivity of the measuring instrument is in range 10 mV/nT – 100 mV/nT. The frequency band is 5 mHz – 20 Hz and its intrinsic noise is 0.05 pT/ $\sqrt{(\text{Hz})}$ at 1 Hz. The timing is provided via GPS.

Data set

The acquisition system records original data sets associated with X (north-south), Y (east-west) and Z (down/vertical) directions. They are sampled at 100 Hz, organized in files with duration one hour. With the aid of some software packages, it performs verifications of the data files and transform them into data files, sampled at 1 Hz. The data sets collected for the X and the Y components of the ULF geomagnetic field variations for the period 27-28 September 2017 are analyzed. The data sets for the values of the local K (Metodiev, M. and Trifonova, P., 2021) and the global K_p indices for the above mentioned period were downloaded from: <http://www.niggg.bas.bg/observatories-bg/geomagnetic-observatory-pag/%D0%BB%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D0%B-B%D0%BD%D0%B8-%D0%BA-%D0%B8%D0%BD%D0%B4%D0%B5%D0%BA%D1%81%D0%B8/> <https://www.spaceweatherlive.com/en/auroral-activity/top-50-geomagnetic-storms/year/2017.html>

Results and discussion

On 27 September, 2017 at 08:48 UTC a Minor geomagnetic storm level (G1) took place. Later at 20:24 UTC on 27 September it was followed by a G2 - Moderate level storm and then increased to G3 - Strong one on 28 September, 2017. On Figure 1 the ULF

geomagnetic field variations along the X (north-south), the Y (east-west) and the Z (vertical) directions are presented. It is visible that variations along the three directions during the whole investigated period – 27/28 September 2017 are disturbed.

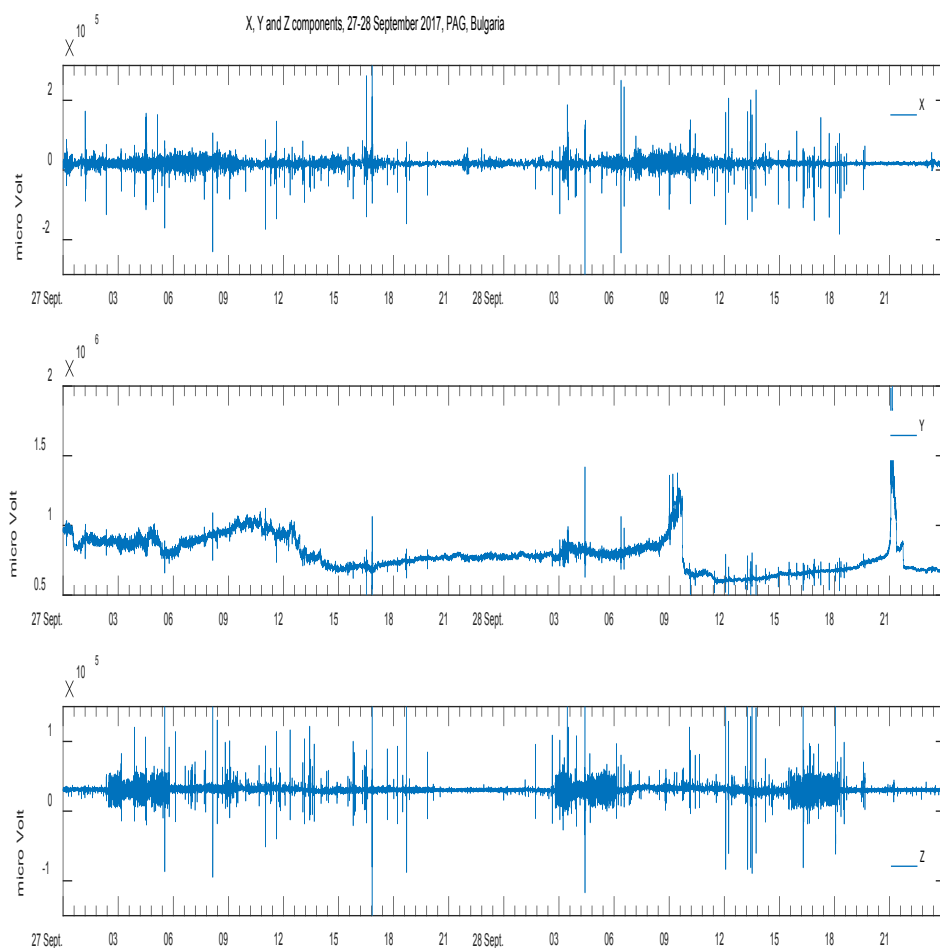


Fig. 1. ULF variations along the X, the Y and the Z components on 27-28 September 2017

Figure 2 shows K_p index (<https://www.spaceweatherlive.com/en/auroral-activity/top-50-geomagnetic-storms/year/2017.html>) calculated for the investigated period.

On 27 September in the time interval 06-09 UTC K_p index reached a value 5 and the local K index reached a value 4 (Figure 3). Later, when the storm increased to Moderate level-G2 and $K_p=6$, the local index takes value $K=5$. Finally, the storm reaches its Strongest level on 28 September when K_p becomes value 7 in the time interval 06-09 UTC.

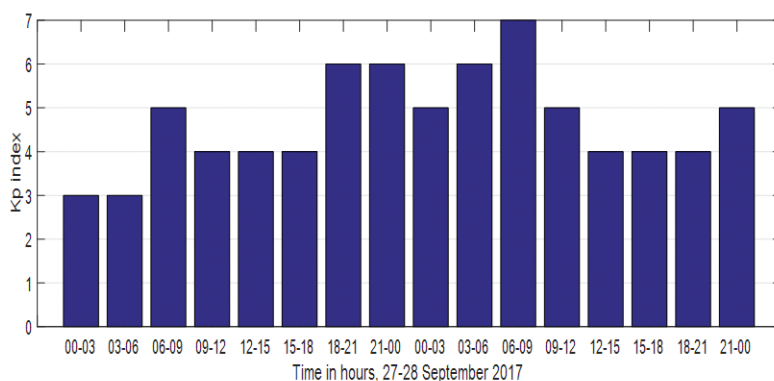


Fig. 2. *Kp* index, 27-28 September 2017

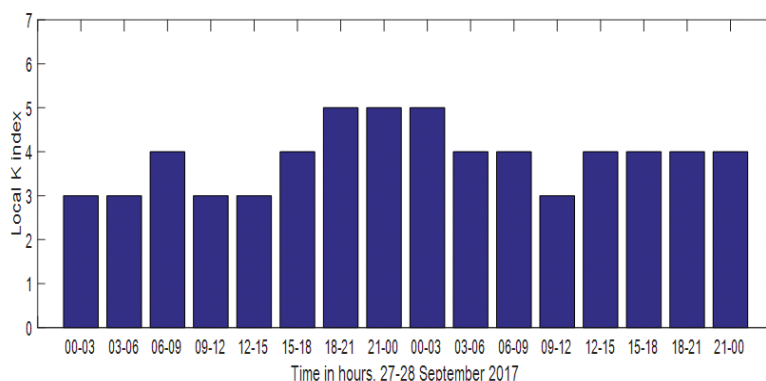


Fig. 3. The local *K* index, Panagjuriste, 27-28 September 2017

Morlet wavelet analysis is applied on time series with recorded data along the two investigated directions (X and Y) of the ULF geomagnetic field variations. The time scales 1-600s (in range of continuous *Pc1*-5 and irregular (*Pi 1*-2) pulsations (partly in *Pc1* and *Pi1*)) are analyzed. On Figure 4 the results obtained for the X component are presented. All investigated time scales are disturbed and the power of the disturbances is greatest when *Kp* index reaches the highest values. Figure 5 shows the results obtained for the Y component. Here, simultaneous but weaker disturbances compared to those of the X component are observed. Two powerful disturbances stand out- the first one about 09 UTC on 28 September and the second one about 21 UTC at the same day. They fully correlate with *Kp*=7 and *Kp*=5. The X component, during above mentioned hours, does not reflect such powerful interference.

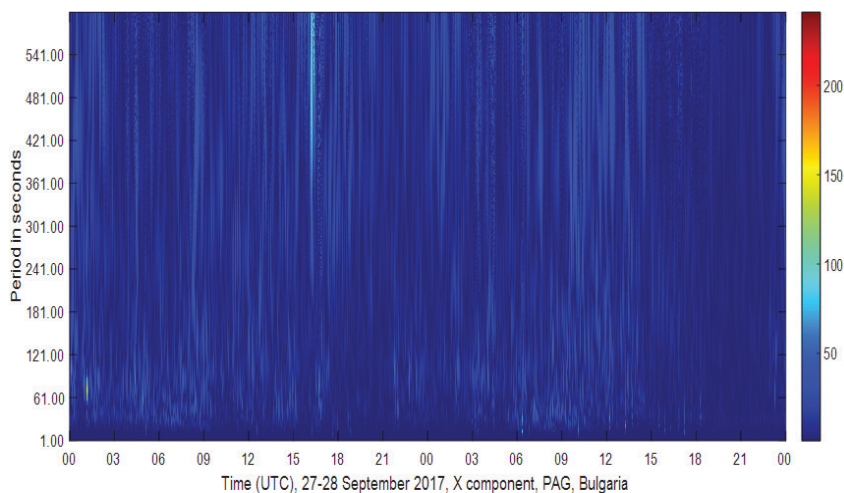


Fig. 4. Dynamic spectrum, X component on 27-28 September 2017, PAG station

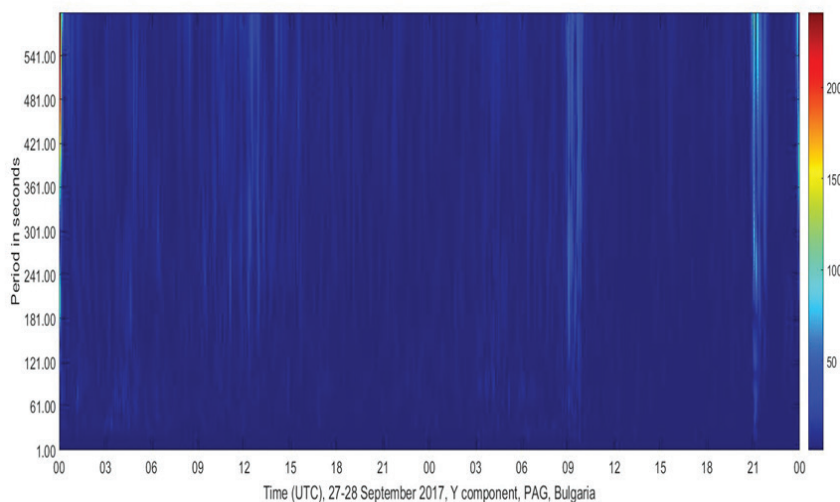


Fig. 5. Dynamic spectrum, Y component on 27-28 September 2017, PAG station

The time interval 00-03 UTC (27 September 2017) on Figure 4 shows disturbances along the X component in time scales about 60-120s, which are not observed at the same time along the Y component (Figure 5).

On Figure 6 are presented ULF variations along the X component (top panel) and dynamic spectrum (bottom panel) for the same component on 27 September 2017 for the time interval 00-03 UTC. About 00:10 UTC and 01:10 UTC are observed pulsations

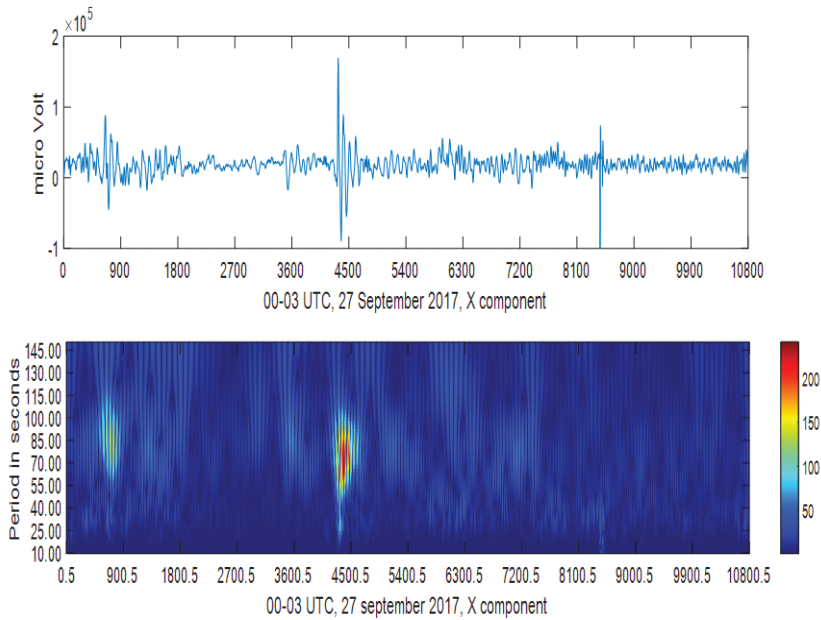


Fig. 6. ULF variations, X component (top panel) and dynamic spectrum (bottom panel), X component on 27 September 2017, 00-03 UTC, PAG station, time in seconds

which lasting a few minutes. On the bottom panel on Figure 6 the dynamic spectrum shows that these pulsations have periodicity covers time scales 40-110s and main period about 85s (in *Pc4* range, possible related to injections of energetic plasma).

Conclusions

On 27-28 September 2017 the geomagnetic storm was recorded at Geomagnetic Observatory Panagjuriste. The storm begins as a Moderate level-G2 on 27 September and on 28 September increasing to Strong level-G3. At Panagjuriste Observatory the storm reached level G2. To investigate the spectral characteristics of the storm Morlet wavelet analysis is applied over the time series which contain data records of ULF geomagnetic variations along the X and Y components. The time scales (1-600s) corresponding to both continuous (*Pc1* (partly) - *Pc5*) and irregular (*Pi1* (partly) - *Pi2*) pulsations are analyzed. The obtained results show that along the X and Y components all investigated scales are disturbed and it agrees with local and planetary *K* indices. The most powerful interferences along the Y component (at 09UTC and 21UTC on 28 September) strongly correspond with the value of *Kp* index, but not with that of the local *K* index. It was found that on 27 September 2017 in time interval 00-03 UTC pulsations in *Pc4* range appeared. They have periodicity which covers time scales 40-110s and main period about 85s and they are most likely related to injections of energetic plasma.

Acknowledgments. This work is supported by Contract No D01-404/18.12.2020 (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>
- Borovsky, J. E., 2020. What magnetospheric and ionospheric researchers should know about the solar wind. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 204, 105271. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105271>
- 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>
- Chapagain, N., 2017. Analysis of Geomagnetic Storms Using Wavelet Transforms., *Journal of Nepal Physical Society Volume 4*, 119–124. <https://doi.org/10.3126/jnphysoc.v4i1>
- 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>
- Klimenko, M. V., Klimenko, V. V., Despirak, I. V., Zakharenkova, I. E., Kozelov, B. V., Cherniakov, S. M., Andreeva, E. S., Tereshchenko, E. D., Vesnin, A. M., Korenkova, N. A., Gomonov, A. D., Vasiliev, E. B., Ratovsky, K. G., 2018. Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30°E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Variability of the Sun and Its Terrestrial Impacts* 180, 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017>
- 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>
- Metodiev, M., Trifonova, P., 2021. Local geomagnetic K- indices calculated at PAG observatory since 2007. *National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.34975/ctlg-2021.k-ind.v.1>
- Metodiev, M., Trifonova, P., 2020. Geomagnetic field elements of the bulgarian territory for 2020.0 EPOCH. Presented at the International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, pp. 543–550. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.2/s05.069>
- Miloshev, N., Trifonova, P., Georgiev, I., Marinova, T., Slabakova, V., Dobrev, N., Milusheva, V., Guerov, T., 2019. National geoinformation center - Scientific infrastructure for dissemination of accurate, durable and reliable geodata and products. Presented at the 10th Congress of Balkan Geophysical Society, BGS 2019. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902671>
- 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>

- Villante, U., Vellante, M., 1998. An analysis of working days contamination in micropulsation measurements. *Annali Di Geofisica* 41.
- Watermann, J., Gleisner, H., 2009. Geomagnetic variations and their time derivatives during geomagnetic storms at different levels of intensity. *Acta Geophys.* 57, 197–208. <https://doi.org/10.2478/s11600-008-0045-7>

Спектрални характеристики в ултра-нискофреkwотен диапазон на геомагнитната буря от 27-28 септември 2017 г., наблюдавана в Геомагнитна обсерватория Панагюрище

М. Шамати

Резюме. Изследвани са геомагнитните смущения и техните спектрални характеристики, причинени от геомагнитната буря от клас G1 нарастващ до G3, наблюдавана на 27-28 септември 2017 г. Анализирани са данни за ULF вариациите на X и Y компонентите на земното магнитно поле, записани в Геомагнитната Обсерватория „Панагюрище“, България, с резолюция 1 секунда. Представени са записите на ULF вариациите от 00:00 до 23:59 UTC за двата, изследвани дни, локалният и глобалният K-индекси и динамичните спектри в ULF диапазона. Установено е, че спектралните характеристики на геомагнитните вариации, намерени за двете хоризонтални (X(север-юг) и Y(изток-запад)) геомагнитни компоненти, имат сходства по отношение на времето на възникване, времевите скали, в които се проявяват, а именно 1-600 секунди, като смущенията кореспондират по време с локалния и глобалния K индекси. По направлението север-юг в часовете 09UTC и 21UTC на 28 септември 2017 се наблюдават смущения, които кореспондират с глобалния K индекс, но не и с локалния. На същия ден в часовия диапазон 00-03UTC са намерени пулсации, които имат основен период около 85 секунди и се наблюдават единствено по направлението север-юг.

СЕЙЗМИЧНОСТ НА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ И ПРИЛЕЖАЩИТЕ ЗЕМИ ПО ДАННИ НА НОТССИ ЗА 2021

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

Национален институт по Геофизика, Геодезия и География, БАН, ул. "Акад. Георги Бончев",
бл.3, София, България, e-mail: m.popova022@gmail.com

DOI: 10.34975/bgj-2021.44.10

Абстракт. В настоящото проучване е изследвана сеизмичността през 2021 г. Представено е разпределението на епицентрите на 258 земетресения, с магнитуд $M \geq 2.5$, наблюдавани през разглеждания период на територията на България и близките околности (в периметър, 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). Определени са пространствените, дълбочинни и енергетични параметри на разглежданите събития. В изследвания период се наблюдават прояви в почти всички сеизмогенни зони на страната, като е отчетена най-висока активност в югозападната част от територията на България.

Ключови думи: България, земетресение, сеизмичност

Въведение

Земетресението е природно явление, определящо се от голям брой фактори, които не могат да бъдат непосредствено наблюдавани. За сеизмично застрашените области, земетресенията представляват неделима част от околната среда. Ефектите от този тип събития са функция на редица фактори, вариращи в широки граници, които могат да бъдат адекватно моделирани въз основа на физически съображения и надеждни сеизмологични наблюдения.

Балканският полуостров е един от активните райони в Алпо-Хималайския сеизмичен пояс. Основната част от земетресенията в този район са с дълбочини до 60-70 km. Сравнително малката дълбочина на земетресенията силно увеличава

степената на въздействие върху земната повърхност. Междиннофокусни събития (с дълбочина 100-200 km) се генерират само в района на Вранча и Хеленската арка. Хеленската арка се счита за сложна зона на субдукция на Африканската плоча под Евроазиатската. Голямата дълбочина на земетресенията в района на Вранча силно увеличава площта на въздействие.

България е разположена в централната част на Балканския полуостров, който от тектонска гледна точка е част от континенталната граница на Евразия. Тази граница се намира между Европейския континент (Мизийска платформа) на север и офиолитовите структури (Вардар и Измир-Анкара) на юг. Неотектонските движения на Балканския полуостров са контролирани от екстензионалният колапс на късния алпийски ороген и са под влиянието, както на процесите, протичащи зад Егейската арка, така и на сложните вертикални и хоризонтални движения в Панонския регион (Solakov et al, 2019). От сеизмологична гледна точка България е разположена в Алпо-Хималайския сеизмичен пояс, който се характеризира с висока сеизмична активност.

България е страна характеризираща се с умерена сеизмична активност. През вековете на територията на страната са генерирани няколко силни земетресения. Първото добре документирано земетресение на територията на България е земетресението от I в. пр. н. е. в Черно море край град Каварна. В югозападна България на 4 април 1904 г. е регистрирано и едно от най-силните плиткни земетресения на територията на континентална Европа от 20-ти век (в началото на 20 век от 1901 до 1928 г. на територията на страната се реализират 6 силни земетресения с магнитуд по сеизмичен момент $M_w \geq 6.0$).

Началото на българската сеизмология датира от 1891 г. и е поставено от Спас Вацов. По това време той е директор на Централна метеорологична станция в София. Спас Вацов организира мрежа от кореспонденти за наблюдение на усетените земетресения в България (Watzof S., 1902). Периодът на българската историческа ера завършва през 1905 г., когато сеизмографът тип Omorri-Voch е монтиран в първата сеизмологична станция в град София.

Националният институт по геофизика, геодезия и география (НИГГГ) - БАН осъществява непрекъснат мониторинг на сеизмичността чрез Национална сеизмична мрежа – НОТССИ. НОТССИ е основана в края на 1980 г. В началото данните от сеизмичните станции са предавани в реално време чрез аналогови телефонни линии до центъра за данни, а параметрите на регистрираните сеизмични събития са оценявани ръчно. През 2006 г. както сеизмологичната мрежа, така и информационният център са модернизирани със съвременен цифров оборудване и е организирана автоматична обработка на данни (Christoskov, 2019). В центъра данните се събират в реално време от 26 български станции и редица станции от съседни страни, което повишава точността на хипоцентралните оценки. Между 2005 и 2010 г. почти всички станции са модернизирани и оборудвани с широколентови сеизмометри. Данните в Националния Сеизмологичен център в НИГГГ - БАН се предават в реално време. След това те се архивират във формат PASSCAL и допълнително в широко използваемия формат miniSEED. Данните се обработват автоматично (разпознават се съответните сигнали и се оценяват параметрите на земетресението) от

програмата Seismic Network Data Processor - SNDP. През последните години броят на сеизмичните станции нараства значително и в края на 2019 г. е 40. В момента сеизмологичният център е модернизирал със софтуер SeisComP3 за реално времеви трансфер и автоматична обработка на данни, който се използва широко в сеизмологичната общност и центровете за данни (Christoskov, 2019).

Високата чувствителност на сеизмографите позволява регистриране и обработка на голям брой регионални и локални земетресения. Установени са различни по магнитуд долни прагове за надеждно определяне на регионални и локални земетресения: с магнитуд по сеизмичен момент $M_w=2.5$ за територията на България, $M_w=3.0$ за централната част на Балканите и $M_w=5.0$ за регионални събития.

Трябва да се отбележи, че с повишаване качеството на регистрацията на събитията, се подобрява анализа на разпределението им в пространството, времето и се предоставя възможности за прилагане на по-сложни методи като оценка на полето на напрежение (наред с други изследвания в Simeonova 2015 и Protopopova 2020) и оценка на параметрите на сеизмичния източник с помощта на спектралните характеристики (както са представени в Raykova 2019, 2020a, 2020b).

Настоящата работа съдържа обобщена информация за резултатите от обработката и предварителния анализ на изходните данни за регистрираните от НОТССИ сеизмични събития за 2021 година.

Методология при обработка на данните

Основните кинематични параметри и магнитудът на земетресенията се оценяват посредством адаптация на широко разпространения продукт НУРО'71 (Solakov, 1993). По настоящем магнитудът M_p се определя по формулата (Christoskov et al, 2011a, b):

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

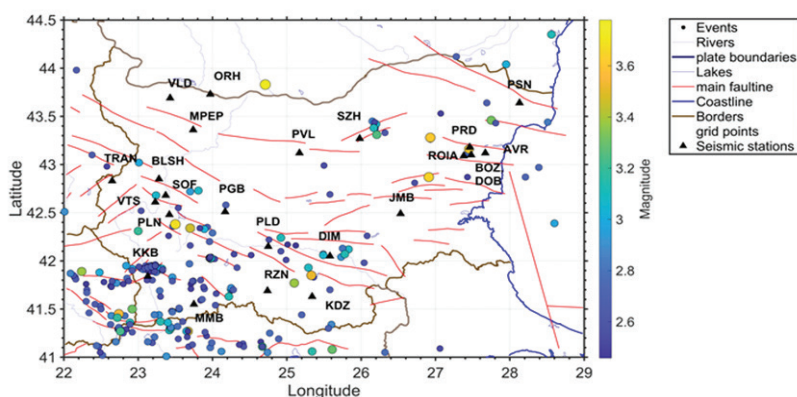
където $\left(\frac{A}{T} \right)_{\max} = \frac{V_{\max}}{2\pi}$, A е амплитудата в μm , T е периода в секунди (s), а V_{\max} е максимална скорост в Р-фазата, регистрирана на вертикалната компонента на широколентовия сеизмограф на епицентрални разстояния по-малки от 10° , $\sigma_{BB}(\Delta)$ е калибровъчна функция; и s_j е j станционна магнитудна корекция.

В настоящето изследване M_p се трансформира в по-надеждната и по-широко използвана магнитудна скала M_w , което би позволило създаването на единен и хомогенизиран каталог на земетресенията, необходим за надеждна оценка на сеизмичния хазарт на територията на страната и околностите. Магнитудът M_p се трансформира в M_w чрез формулата (Solakov et al, 2018):

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

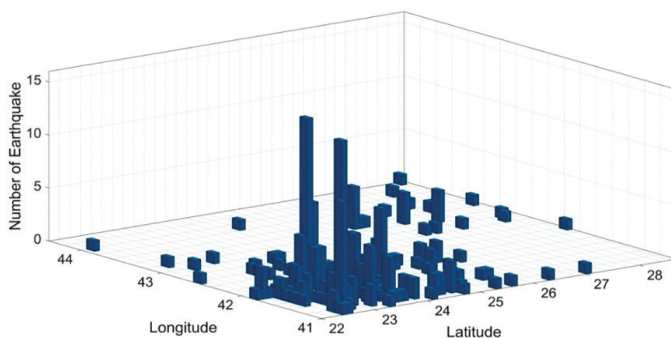
Пространствено – времево и енергетично разпределение на земетресенията

На фигура 1 е представено пространственото разпределение на епицентрите на земетресенията реализирани през 2021 г. Извадката съдържа 258 събития, в магнитуден интервал $2.5 \leq M_w \leq 4.0$, генерирани в пространствен прозорец с координати $41^\circ - 44.5^\circ \text{ N}$ и $22^\circ - 29^\circ \text{ E}$. На картата са изобразени и активните разломи в разглежданата територия по данни от: GEM Global Active Faults (<https://github.com/GEMScienceTools/gem-global-active-faults>).



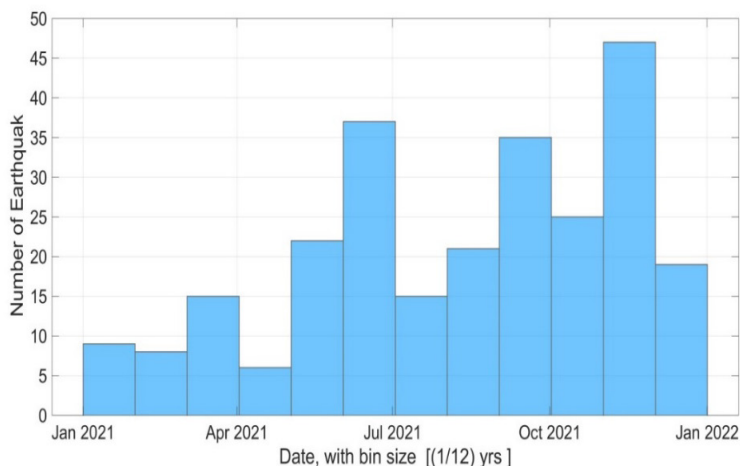
Фиг. 1. Епицентрална карта на земетресенията реализирани на територията на страната и прилежащите земи за 2021 г.

Фигура 1 илюстрира неравномерно пространствено разпределение на сеизмичността в България. Най-голяма концентрация на земетресения за 2021 г. се наблюдава в югозападния район на страната. Този извод се потвърждава и от Фигура 2, която представя пространственото разпределение на броя земетресения в мрежа от клетки с размер $0.1^\circ \times 0.1^\circ$.



Фиг. 2. 3D визуализация на брой земетресения и пространствено разпределение на епицентрите $[0.1^\circ \times 0.1^\circ]$

Фигура 3 илюстрира разпределението на сеизмичността във времето според броя на събитията по месеци. Най - голям брой земетресения се наблюдават през месеците юни и ноември, а най-малко през февруари и април.

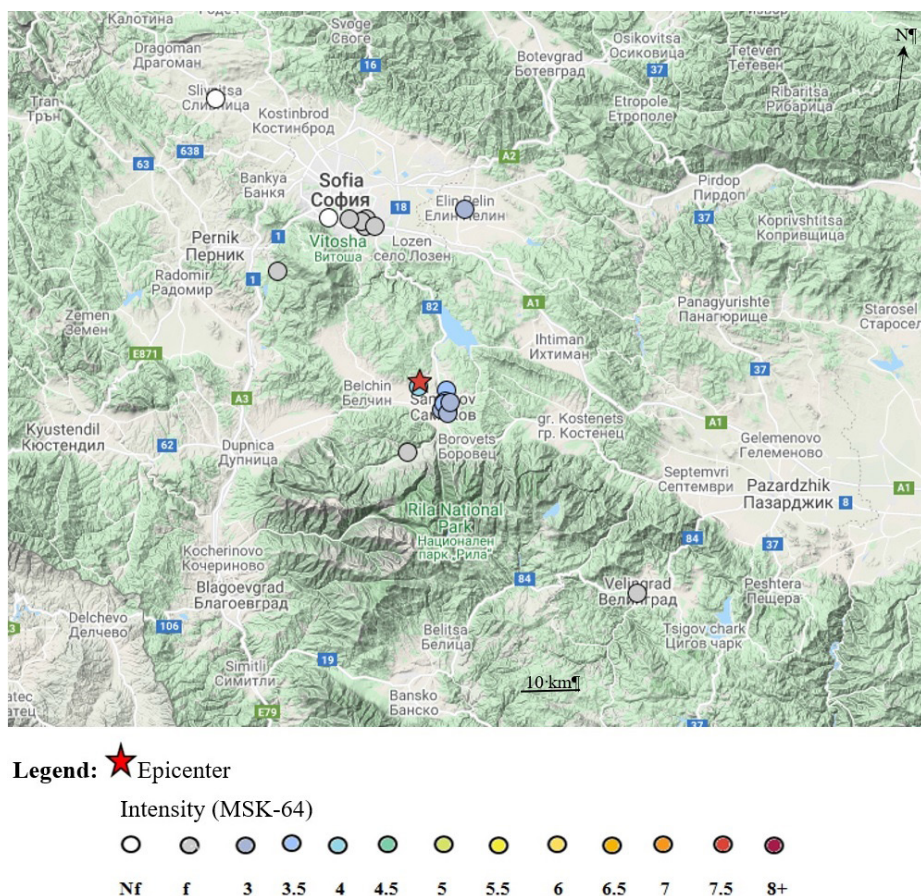


Фиг. 3. Времево разпределение на земетресенията реализирани през 2021 г. на територията на България и околностите и

През месец ноември е регистрирано и най-силното за територията на България земетресение. Земетресението от 25.11.2021 г. с епицентър в близост до град Самоков. Събитието е с магнитуд $M_w=3.7$, дълбочината на огнището 15 km и максималната интензивност в епицентралната зона: $I_{max}=4.0$ степен MSK64. Земетресението е било усетено в района на град Самоков, както и в някои части на град София. На фигура 4 са представени въздействията от земетресението установени след обследване на засегнатата област и оценени по интензивностната скала MSK64.

Повишената активност през месец ноември е свързана и с наблюдаваната сеизмична активност в района на град Велинград. Регистрираните сеизмични събития са в поредица от роев тип (Raykova 2020б). Регистрирани са около 15 земетресения с дълбочина до 15 км., като най-силното събитие от поредица е земетресението от 24.11.2021 г., с магнитуд $M_w=3.2$ и дълбочина 12 км. Според геоложките изследвания при последната оценка на сеизмичната опасност в района на град Велинград са дефинирани структури, които имат потенциал да генерират сеизмични събития (Solakov et al, 2019). В исторически план в този район е наблюдавана умерена сеизмична активност. Най-силното събитие регистрирано там е от 03.11.1977 г., с магнитуд по сеизмичен момент $M_w=5.5$. След земетресението са наблюдавани частични повреди в сградите и изменение в дебита на минералните извори. Последвала е интензивна афтъшокова поредица.

От проследяването на магнитудите на събитията във времето представено на фигура 5 могат да се отбележат и месеците, в които са наблюдавани земетресенията с най-високи магнитудни оценки. Земетресението реализирано през месец януари,

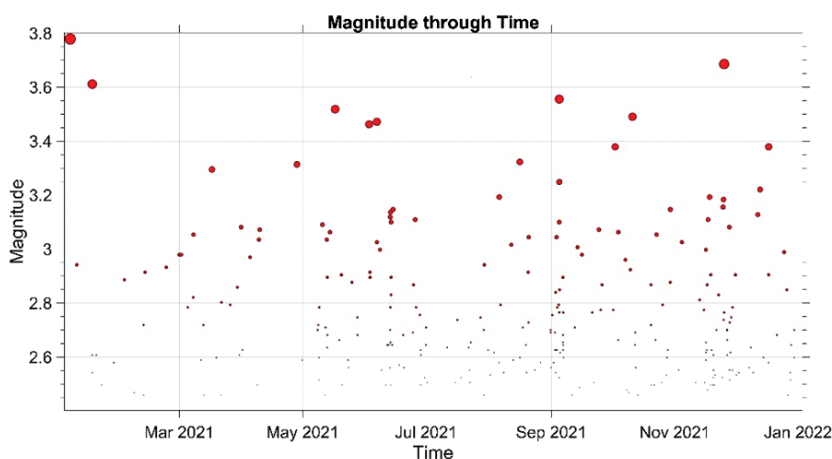


Фиг. 4. Сеизмични въздействия от най-силното за 2021г. земетресение ($M_w 3.7$), реализирано на 25.11.2021г. в близост до град Самоков

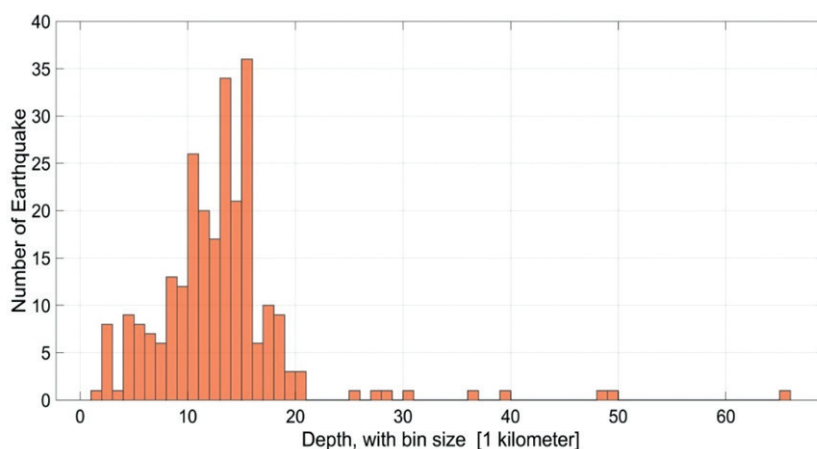
в границите на южна Румъния с магнитуд по сеизмичен момент $M_w = 3.8$, което е усетено с максимална интензивност на територията на страната ни с $I_{max} = 3.5$ МШК64. През месец ноември е регистрирано земетресението в района на град Самоков с магнитуд $M_w = 3.7$ и дълбочината на огнището 15 km. Максималната интензивност в епицентралната зона е $I_{max} = 4.0$ степен MSK64.

Броят на земетресенията групирани в магнитудни интервали: $M_w = 2.5-3.0$ са 204 събития, с магнитуд в интервала $M_w = 3.1-3.5$ са 50 събития и с магнитуд в интервала $M_w = 3.6-4.0$ са реализирани 4 събития (фиг. 5). Подробен анализ на сеизмичността в отделните сеизмични зони е трудно да се извърши поради недостатъчното количество събития и тесния магнитуден диапазон на земетресенията.

Тук нулевото ниво трябва да се счита за относително, имайки предвид, че не са взети под внимание земетресения с магнитуди под 2.5.



Фиг. 5. Магнитудно – времево разпределение.



Фиг. 6. Разпределение на броя събития според дълбочината.

Графиката на дълбочинното разпределение на фигура 6 показва, че по-голямата част от събитията се реализират в диапазона от 5-20 км дълбочина. Броят на събитията не намалява плавно с увеличаване на дълбочината. В същото време броят на земетресенията реализирани на дълбочина 5-15 км е най-голям. Разпределението на магнитудите на събитията в дълбочина позволява да се отбележи известна диференциация на дълбочинните „етажи” с нарастване на магнитуда - максимумите могат да се проследят за интервала на дълбочината от 5 до 20 км. По-силните събития, например с магнитуд $M_w \geq 3.5$, имат дълбочина в диапазона 10-20 км. Всички огнища са разположени в земната кора.

Заклучение

Територията на България, разположена в източната част на Балканския полуостров е типичен пример за район характеризиращ се с висок сеизмична опасност. През вековете на територията на страната са наблюдавани силни земетресения, като едно от тях е най-силното земетресение в Европа през 20-ти век.

От представеният анализ на 258 земетресенията с магнитуд $M_w \geq 2.5$, възникнали в България и околностите през 2021 г., може да се направят следните заключения:

- 2021 г. се характеризира със слаба сеизмичност - доминират събития с магнитуд под 3.0, само четири земетресения са с магнитуд над 3.5, като най-силното от тях е с магнитуд 3.7
- пространствено-временното разпределение на земетресенията в България и околностите е неравномерно;
- хипоцентрите на земетресенията са разположени основно в горната кора (до 20 км). Най-голям брой земетресения са регистрирани в дълбочинния слой между 5 и 15 км;
- наблюдаваната сеизмична активност за разглеждания период е по-висока в сравнение с изминалите години. През 2021 г., са регистрирани 258 събития с магнитуд $M_w \geq 2.5$, което е приблизително два пъти повече в сравнение с 2020 г., и 2019 г. (Popova et.al. 2021).

Благодарности: Авторите изразяват своите благодарности към Е. Ботев, Бл. Бабачкова, Т. Илиев, Р. Вълков, П. Кирилов които са работили в NOTССИ през 2021 г.

Литература

- Christoskov L., L. Dimitrova, D. Solakov, 2011a. Magnitude determinations of P wave by digital broadband seismometers of NOTSSI network for local and regional events. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, Vol 65, No 5, pp. 653-660.
- 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.
- Christoskov L., Dimitrova L., Solakov D., Simeonova S., 2019. FORTY YEARS NATIONAL OPERATIVE TELEMETRIC SYSTEM FOR SEISMOLOGICAL INFORMATION, *Bulgarian Geophysical Journal*, Vol. 42, DOI: 10.34975/bgj-2019.42.8, pp. 83-93.
- Popova Mariya, Dragomir Dragomirov, Emil Oynakov, Valentin Buchakchiev, Yordan Milkov. SEISMICITY IN BULGARIA AND SURROUNDINGS IN THE FIRST 20 YEARS OF THE TWENTY-FIRST CENTURY. 21th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021, под печат 2021.
- Protopopova, V., Botev, E., 2020. Evaluation and comparative analysis of stress and deformations in seismic hazard zones in Bulgaria and adjacent lands, *Annals of Geophysics*, 63(2), SE224, pp. 1-15.

- Raykova P., Solakov D., Simeonova S., 2019. Seismic moment, stress drop and source radius for the seismic cluster of the 2009 earthquake in Valandovo seismogenic zone, Problem of geography, BAS, ISSN:2367-6671, 0204-7209, pp. 29-40.
- Raykova P., 2020 a). ESTIMATION OF EARTHQUAKE SOURCE PARAMETERS USING P AND S-WAVES SPECTRA CASE STUDY THE 2012 SEISMIC CLUSTER IN SOFIA SEISMOGENIC ZONE, Bulgarian Geophysical Journal, Vol. 43, DOI: 10.34975/bgj-2020.43.6, pp. 71-80.
- Raykova P., 2020 б) Estimation of source parameters for swarm type of seismicity, Bulgarian Geophysical Journal, Vol. 43, DOI: 10.34975/bgj-2020.43.10, pp.110-122. (in Bulgarian)
- Simeonova, S., Solakov D., Aleksandrova I., Raykova P., Protopopova V., 2015. The 2012 Mw5.6 earthquake in Sofia seismic zone and some characteristics of the aftershock sequence, Bulgarian Chemical Communications, 47, spec. issue B, pp. 397-404.
- Solakov D., Simeonova S., Trifonova P., Georgiev I., Raykova P., Metodiev M., Aleksandrova I., [2019] Building Seismic Risk Management, Part 1: Probabilistic Seismic Hazard Assessment BAS Publ. House, S., ISBN 978-954-322-988-8, 13-110 (in Bulgarian).
- Solakov D., S. Simeonova, P. Raykova, I. Aleksandrova, 2018. 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, DOI:10.7546/CRABS.2018.08.09, 1076-1085.
- Solakov, D., 1993. An algorithm for hypocenter determination of near earthquakes. Bulg. Geophys. J. 19 (1), 56-69
- Styron, Richard, and Marco Pagani. "The GEM Global Active Faults Database." Earthquake Spectra, vol. 36, no. 1_suppl, Oct. 2020, pp. 160-180, doi:10.1177/8755293020944182.
- Watzof S., 1902. Earthquakes in Bulgaria during XIX century, Central Meteorological Station, Imprimerie de l'Etat, Sofia, pp. 93. (in Bulgarian and French).

Seismicity on the territory of bulgaria and the adjacent lands recorded by notssi in 2021

M. Popova, E. Oynakov, Y. Milkov, V. Buchakchiev, D. Dragomirov

Abstract. Spatial and temporal distribution of the seismicity observed on the Bulgarian territory in 2021 is presented. The list includes 258 earthquakes with magnitude $M > 2.5$, observed in Bulgaria and the surrounding area within latitude 41° - 44.5° N and longitude $\lambda = 22^{\circ}$ - 29° E which are registered by the National Operating Telemetry System for Seismological Information (NOTSSI). 2021 is characterized by weak seismicity - dominated by events of magnitude less than 3.0. Only four earthquakes had magnitudes larger than 3.5, the strongest of which happened on the 25.11.2021 with $M_w=3.7$. As observed in the previous years, the highest activity is reported in the southwestern part of the territory of Bulgaria.

Key words: Bulgaria, earthquake, seismicity

