https://doi.org/10.48368/bgs-2023.1.N1

Determination of coseismic deformations in the Balkan Peninsula area based on SAR data

Mila Atanasova
National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 1113, Bulgaria,
mila_at_zl@abv.bg

Abstract
The Balkan Peninsula is one of the dangerous seismic zones on Earth, where several seismic events with a magnitude above 7 have occurred in the last 50 years. Most of the seismic events were generated near or in the fault zone. Area known as the Hellenic arc is located near the territory of Bulgaria, and earthquakes that occur there are often felt. In this study, we focused on determining the deformation of the Earth's surface that occurred in the Balkan Peninsula region after several earthquakes with a magnitude greater than Mw 6.5 occurred in the last 5 years, recorded by NOA and USGS / along the Hellenic Arc. Thanks to InSAR technology, is possible to determine the coseismic deformations of the earth's crust. The SAR data was used to record the ground motions that occurred by creating interferometric images, from which information was extracted about the subsidence and uplift caused by the earthquake.

Определяне на косеизмични деформации в района на Балканския полуостров по данни на SAR

Мила Атанасова,
Национален институт по геофизика, геодезия и география, Българска академия на науките, София 1113, България
mila_at_zl@abv.bg

Ключови думи: *DinSAR, деформации на земната кора, земетресение*

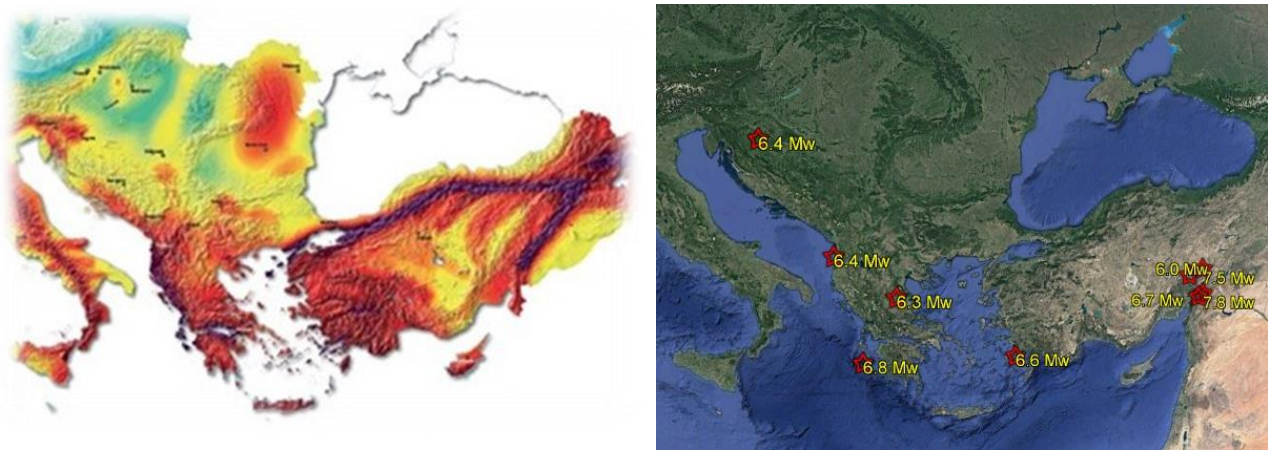
Резюме
Балканският полуостров е една от опасните сеизмични зони на Земята, където през последните 50 години са се случили няколко сеизмични събития с магнитуд над 7. Повечето от сеизмичните събития са генерирани в близост или в зоната на разломи. Такава зона, известна като Гръцка арка, се намира близо до територията на България и често се усещат земетресения, които се случват там. В това изследване ние се съсредоточихме върху определянето на деформацията на земната повърхност, настъпила в района на Балканския полуостров след няколко земетресения с магнитуд над Mw 6,5 случили се през последните 5 години, регистрирани от NOA и USGS / по протежение на Средиземноморската сеизмична зона. Благодарение на InSAR технология е възможно определяне на косеизмичните деформации на земната пожърхност. SAR данните бяха използвани за регистриране на настъпилите земни премествания посредством създаването на интерферометрични изображения, от които бе извлечена информация за причинените от земетресението пропадания и издигания.

1. Въведение

Територията на България принадлежи към относително опасните земетръсни зони на Земята. България се намира в близост до средиземноморската сеизмична зона – втората по активност в света. През миналия век на територията на страната ни са регистрирани няколко разрушителни земетресения с магнитуд над 7.0. За щастие те се случиха в началото на двадесети век, но тези събития не могат да бъдат предвидени и никоя територия не е имунизирана от възможността този ужасен сценарий да се повтори. Последното силно земетресение в България беше през 2012 г. с магнитуд 5,8 в близост до столицата София и беше усетено. Земетресенията са природно бедствие, което причинява щети, които се измерват с човешки животи и разрушения на инфраструктура. Важна задача след настъпването на подобно събитие е изготвянето на план за преодоляването им, базиран на данни за състоянието на територията. Земетресенията най-често се случват по тектоничните плочи, в зоните на субдукция. В района на Европа най-силните земетресения са около Гръцката (Елинската) дъга, по-рядко се случват във вътрешността на Евразийската плоча. Чрез SAR сателитните технологии е наблюдавана деформацията на земната повърхност, причинена от земетресения, вулкани, свлачища, слягания поради добив на подземни води и други техногенни дейности. В това изследване ние се съсредоточихме върху определянето на деформацията на земната повърхност, настъпила в района на Балканския полуостров след 6 броя земетресения с магнитуд над 6,5 регистрирани /от NOA и USGS / през последните 5 години по протежение на Гръцката арка. Основната задача е да се демонстрира

https://doi.org/10.48368/bgs-2023.1.N1

оперативна готовност, да се определи големината на деформациите на земната повърхност, засегнатите площи и да се изготвят карти на преместванията.. На фигура 1 са показани и обхвата на Средиземноморската сеизмична зона с фрагмент от карта на рисковете от сеизмична активност в Европа и епицентрите на изследваните земетресения



Фигура 1 Средиземноморската сеизмична зона и местоположения на епицентрите на изследваните земетресения и техните магнитуди.

Таблица 1. Извадка на основните параметри на сеизмични събития с магнитуд над 6.5 за района на Средиземноморската сеизмична зона по данни EMSC.

	Географска ширина	Географска дължина	Mw	Дати, час/UTC
Kos-Bodrum Greece -Turkish	36.96 N	27.45 E	6.6	20 юли 2017
Zakynthos -IONIAN SEA	37.53 N	20.62 E	6.8	25 октомври 2018 22:54:51.5
Durast - Albania	41.38 N	19.47 E	6.4	26 ноември 2019
Petrinya -Croatia	45.42 N	16.12 E	6,4	29 декември 2020
Larissa - Greece	39.76 N	22.21 E	6.3	03 март 2021
CENTRAL TURKEY	38.07 N	36.47 E	6.0	6 февруари 2023 г 12:02:11.9
CENTRAL TURKEY	38.11 N	37.24 E	7.5	6 февруари 2023 г 10:24:49.6
CENTRAL TURKEY	37.13 N	36.81 E	6.7	6 февруари 2023 г 01:28:19.9
CENTRAL TURKEY	37.17 N	37.08 E	7.8	6 февруари 2023 г 01:17:36.1

2. Метод и данни

Диференциалната интерферометрия за обработка на РСА данни (DInSAR) получени от дистанционни наблюдения на Земята е метод, който може да се използва за количествено определяне на малки премествания на повърхността. Използвайки данни от сателита Sentinel и прилагайки DInSAR се извършва картографиране топографията на големи площи, както и регистриране на премествания по повърхоността. В основата на метода DInSAR е използването на две изображения на отразения от земната повърхност фазов сигнал получени в един и същ регион по различно време и на базата на него е възможно точно измерване на относителните разстояния до конкретен обект.

В това изследване основен източник на данни за регистриране на геодинамичните движения са данните от РСА разположен на борда на сателита Sentinel-1A [1] . В процеса на тяхната обработка бяха формирани интерферометрични двойки (ИФД) за проследяване на последствията от събитието, като получената информация е изцяло базиарана на промените във фазовата съставяща от радарния сигнал отразен от повърхността на Земята. Тази информация, записана във формата на интерферометрични изображения (ИФИ), позволи да се определят стойностите на появилите се деформации.

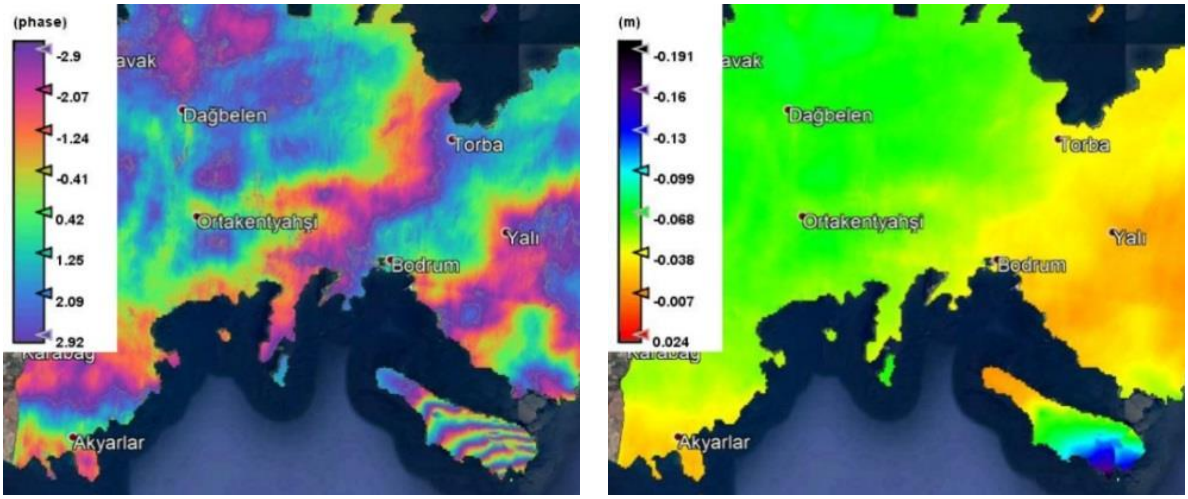
https://doi.org/10.48368/bgs-2023.1.N1

Тематичната обработка на данните от РСА беше извършена изцяло посредством създадения и предоставян за свободно ползване програмен продукт SNAP [2], докато за по-добра визуализация и допълнителни анализи бяха използвани и други програмни продукти.
На ИФИ бяха локализирани интерференчните ивици[1] (фиг. 2, 4-6), показващи площите, където са протекли деформационни процеси. Всяка ивица съответства на деформация от 28mm и както се вижда на

Фигура 6. А) Интерферометрично изображение на района на земетресенията от 6 февруари 2023 г., епицентрове на събитията, активните разломи и карти на вертикалните деформации -Б за областите в близост до епицентъра се наблюдава поредица ивици. След прилагане на процедура за разгъване на фазата от ИФИ бяха получени нови изображения, в които се съдържа информация за абсолютните стойности на деформациите на земната кора в метрична система. Получените премествания бяха определени количествено по посоката на визирната линия сателита – LoS. Във вектора по LoS са включени както хоризонталните така и вертикалните измествания.

3. Резултати от обработката на данните от РСА за изследваното събитие

В този раздел са представени фрагменти от получени ИФИ за различни земетресенията от двата типа орбити преди разгъването на фазата, където се виждат фазовите разлики предизвикани от събитието (фиг. 2-6).
На 20 юли 2017 г в близост до остров Кос стана земетресение с Mw 6.6 и дълбочина 2 км. Епицентърът на земетресението се намира в Егейско море, на около 1 km южно от необитаемия остров Карада, като засегнати са гръцкия остров Кос и гр. Бодрум в югозападната част на Турция. Създадени са карти на преместването и са определени стойностите на потъване на южната час на остров Карада в посока LOS от низходяща и възходяща орбити (фиг. 2), [3] [4],



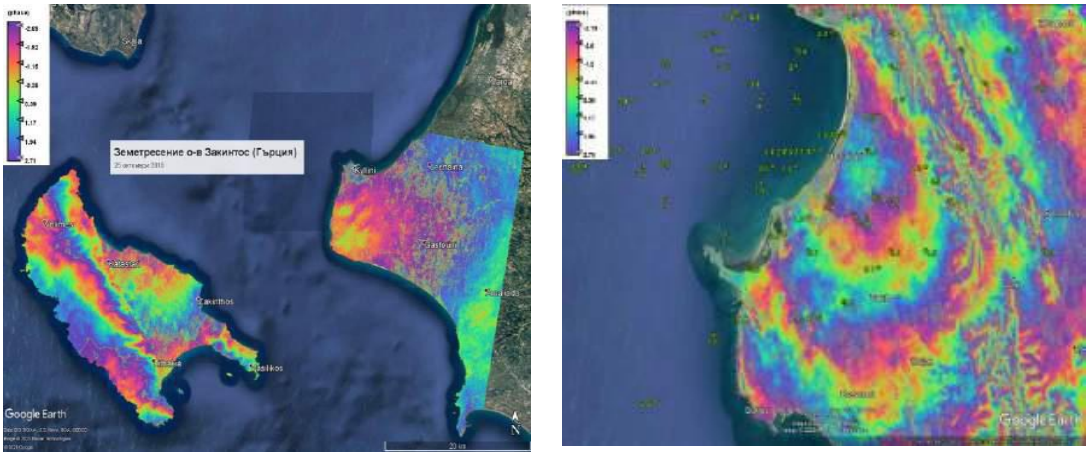
Фигура 2. Интерферометрично изображение на района на земетресението на остров Кос – Бодрум /Mw 6.6 /, възходяща орбита 131, от 12.07-24.07. 2017 и карта на деформациите по посока LOS [4]

Определяни са настъпилите повърхностни деформации след земетресение на 25 октомври 2018 локализирано на около 45 km югозападно от остров Закинтос с Mw 6.8 и дълбочина 10 km [5] на базата на изготвените интерферограми (Фигура 3а).
На 26 ноември 2019 в северозападната част на Албания се случи най-опустошителното земетресение за последните 40 години, което беше второто подобно събитие за период от три месеца и е

[1] В литературата са познати като interferometric fringes.

https://doi.org/10.48368/bgs-2023.1.N1

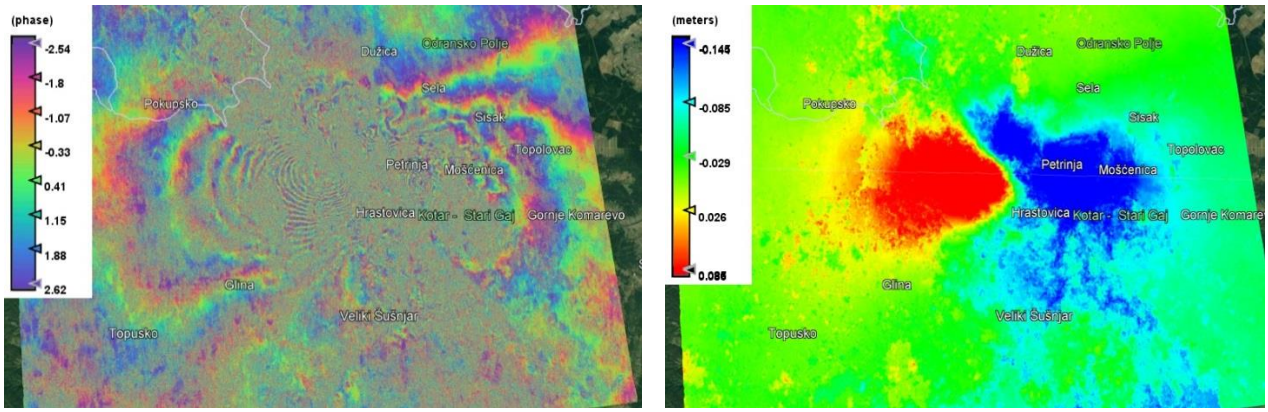
локализирано на около 8 km североизточно от пристанищния град Дуръс. На Фигура 3б е представена обработената интерферограма на събитието от дати 02.12–19.11.2020 от възходяща орбита 175 [5], [6].



а) Остров Закинтос с Mw 6.8 [5] б) град Дуръс възходяща орбита 175[6]

Фигура 3. Интерферометрични изображения на района на земетресенията а) остров Закинтос б) град Дуръс

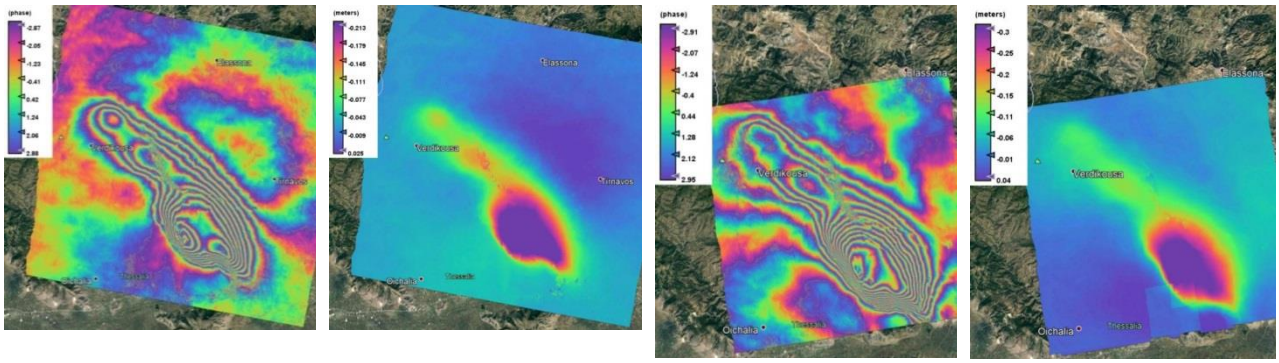
Разрушителното земетресение което удари Хърватска на 29 декември 2020 г беше с магнитуд 6,4 по скалата на Рихтер. Неговият епицентър (45.42 N, 16.12 E) се намира близо до село Страшник на дълбочина 4 km и 6 km югозападно от Петриня и 65 km юг-югоизточно от Загреб. Това е най-голямото земетресение в Хърватия регистрирано прес последното столетие. Земетресение с подобен размер е станало през 1880 г. близо до Загреб. Три земетресения с магнитуд 6 и по-големи са се случили от 1900 г. до днес, в рамките на 200 километра от епицентъра на земетресението от 29 декември 2020г.. Основният трус и по-голямата част от вторичната сеизмичност са разположени върху разлома на Петриня, който е добре описан в Европейската база данни за сеизмогенни разломи (EDSF). Това събитие е изследвано от данни от InSAR (виж фиг. 4) допълнени със сеизмологични и геоложки изследвания.



Фигура 4. Интерферометрично изображение на района на земетресението на гр. Петриня - Хърватска на 29 декември 2020 г. и карта на деформациите по посока LOS

Определяни са настъпилите повърхностни деформации след земетресение Mw 6.0, което се случи на 3 март 2021 г. на 20км северозападно от гръцкия град Лариса. При изучаване на този тип събития в много редки случаи е възможно да се разграничат деформациите на земната кора настъпили вследствие само на основния трус от последвалите афтършокове.Обикновено използвайки приложения метод се регистрират сумарните изменения на земната кора за периода между две преминавания на сателитите, който за мисията Сентинел (за 2021г.) е минимум 6 дена [7], [8].

https://doi.org/10.48368/bgs-2023.1.N1



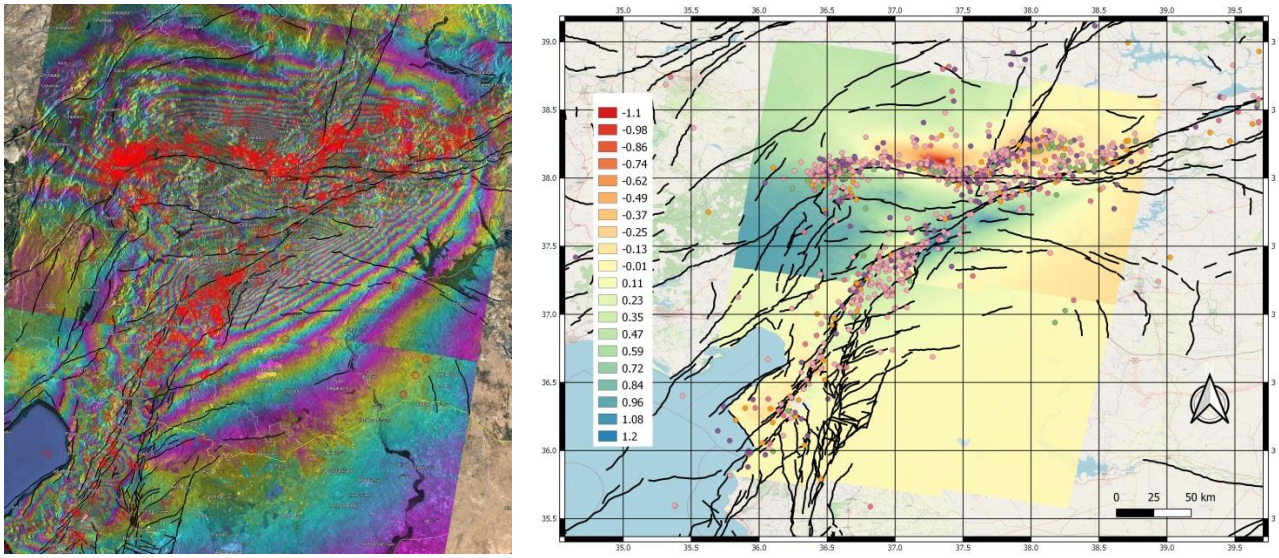
А) низходящи орбити 80 орбита 02-14 Март 2021 Б) възходящи орбити 175 орбита 02-14 Март

Фигура 5. Интерферометрични изображения на района на земетресението гр.Лариса и карти на деформациите по посока LOS определени от двата типа орбити [7], [8].

Разликите в стойностите на настъпили премествания на земната кора определени от различните орбити потвърждават необходимостта при изучаване на деформации да се изготвят ИФИ и от двата типа орбити с цел получаване на по-добра представа за тях и съпоставянето и сравнението им с теренни измервани или резултати от други източници

Последното предизвикателство бе регистрирането на деформациите на обширните площи, след двете опустошителни земетресения с магнитуди MW 7,8 и MW 7,5 които удариха Турция на 6 февруари 2023 г.. Земетресенията се случиха в зоната на източен анадолски разлом, западно от Газиантеп, Турция. Земетресението е последвано от интензивни вторични трусове. Това проучване представя първоначалните резултати от интерферометричната обработка на SAR данни от мисията Sentinel-1 на Европейската космическа агенция, разкриващи засегнатата зона и големината на деформациите, настъпили след земетресенията. Създадените карти са комбинирани данни от няколко източника, като епицентровете на събитията са от EMSC, а активните разломи са от EDAF, като и двете се считат за движещи сили на тези движения на земята SAR данни, използвани за получаване на информация, показваща действителните повърхностни измествания. Трябва да се подчертае, че споменатата информация отразява не последствията от едно сеизмично събитие, а ефекта от всички земетресения, случили се в изследвания регион между датите на регистриране от SAR инструмента [9]

.



Фигура 6. А) Интерферометрично изображение на района на земетресенията от 6 февруари 2023 г., епицентрове на събитията, активните разломи и карти на вертикалните деформации [9]

https://doi.org/10.48368/bgs-2023.1.N1

Заключение

От представените резултати след обработка на данни от РСА по метод InSAR може да се направи заключение, че те са един допълнителен източник на информация за настъпилите деформации на земната кора, дължащи се на земетресения. Тяхно предимство е, че тази информация се получава за големи райони и за сравнително малко време след събитието, което подпомага изготвянето на карти за преодоляване на неговите последствия. Приложената от авторите методика за обработка позволи да бъдат получени ИФИ, които нагледно представят настъпилите премествания около епицентъра.

Благодарност

Научните резултати в статията са част от работата по проект: „Национален геоинформационен център (НГИЦ)“, финансиран от Националната пътна карта за научна инфраструктура 2020-2027 г. на България. Договор № D01-164/28.07.2022г.

Литература

[1] https://scihub.copernicus.eu/

[2] http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/

[3] Атанасова М., Николов Х, Протопопова В.. Определяне на деформациите на земната кора след земетресение посредством DInSAR. IX Национална коонференция по геофизика - CD, 2018, ISSN:1314-2518 Национално академично издателство

[4] Atanasova M., Nikolov H., Protopopova V.. DInSAR in displacement detection after seismic events. Proceeding 10th Congress of Balkan Geophysical Society, 18-22 September 2019, Albena Resort, Bulgaria, EAGE, 2019, DOI: 10.3997/2214-4609.201902642, 1-4. SJR (Scopus):0.11

[5] Nikolov Hristo, Atanasova Mila, Protopopova Valentina. Application of satellite SAR data to detect deformations of the Earth's crust after earthquakes. Proceedings of 2nd National Workshop with International Participation on COPERNICUS, S, pace Research and Technology Institute - Bulgarian Academy of Sciences (SRTI-BAS), Sofia, Bulgaria, 2021, ISBN:978-619-7490-09-1, DOI:10.5281/zenodo.6497513, 25-37 https://zenodo.org/record/6497513#.YvpMD31Bymx

[6] Hristo Nikolov, Valentina Protopopova, Mila Atanasova. Studying seismic events via satellite interferometry. Proceedings Volume 11524, Eighth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2020);Paphos, Cyprus, 15241B, 11524, SPIE 2020, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2020, 11524, 115241B, 2020, ISBN:978-151063857-0, ISSN:0277786X, DOI:10.1117/12.2570676, 1-16. https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11524/2570676/Studying-seismic-events-via-satellite-interferometry/10.1117/12.2570676.short

[7] Atanasova M., Nikolov H., Oynakov E. CO-SEISMIC SURFACE DISPLACEMENTS AFTER THE EARTHQUAKES IN LARISSA, 3 MARCH 2021, DERIVED BY DINSAR. Proceedings of 21th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2021, Volume: 21, Book number: 2.1, International Multidisciplinary Scientific Geoconference, 2021, ISBN:1314-2704, ISSN:978-619-7603-22-4, DOI:10.5593/sgem2021/2.1/s10.64, 521-528. https://www.sgem.org/index.php/elibrary?view=publication&task=show&id=7916

[8] Атанасова Мила, Николов Х. Определяне на деформациите на земната кора посредством DInSAR настъпили след земетресението в района Лариса от 3 март 2021г. 10-ТА НАЦИОНАЛНА КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ГЕОФИЗИКА /Национален институт по геофизика, геодезия и география, БАН София, CD 10, Х, Дружество на геофизиците в България, 2021, ISSN:1314-2518, 1-8 Национално неакадемично издателство https://www.niggg-bas.com/periodicals/x-national-geophysical-conference-4th-june-2021/n3/

[9] Mila Atanasova, Plamena Raykova, Hristo Nikolov. Determining the Deformations of the Earth's Surface after the Earthquakes in Turkey-Syria of 06 February 2023 - Initial Results. Comptes rendus de l’Académie bulgare des Sciences, 76, 4, Bulgarian Academy of Sciences, 2023, ISSN:1310–1331, DOI:https://doi.org/10.7546/CRABS.2023.04.07, 554-562

[10] Atanasova Mila, Nikolov Hristo, A STUDY OF SEISMIC DISPLACEMENTS IN THE BALKANS FROM SATELLITE DATA, Proceeding XXX INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MODERN TECHNOLOGIES, EDUCATION AND PROFESSIONAL PRACTICE IN GEODESY AND RELATED FIELDS, Sofia, 02 – 04 November 2022 ISSN:2367-6051, 1-11