https://doi.org/10.48368/bgs-2021.1.N3

Determination of deformations of the Earth's crust by DInSAR occurred after the earthquake in the Larissa region on March 3 2021

Mila Atanasova[1], *Hristo Nikolov*[2]

[1] *National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 1113, Bulgaria*, e-mail: *mila_at_zl@abv.bg*
[2] *Institute of Space Research and Technology, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 1113, Bulgaria*, e-mail: *hristo@stil.bas.bg*

Abstract
Earthquakes are a natural disaster, causing damage that is measured by human lives and destruction of natural and infrastructural sites. Direct consequences of their occurrence cause activation of landslides, ruptures and vibrations of the Earth's surface, tsunamis, etc. In this study, we focused on determining the surface deformation that occurred after the Mw 6.0 earthquake as registered by NOA and USGS /, which occurred on March 3, 2021 at 20 km northwest of the Greek city of Larissa. A valuable source of data on the current state of large land areas of the ground surface is the EU's Copernicus program. One of its components is the two-satellite Sentinel-1 mission, which provides synthesized aperture radar (SAR) data. Based on their data it is possible to determine the deformations of the Earth's crust. In this study, they were used to determine the parameters of deformations caused by a series of earthquakes. SAR data were used to produce information regarding the ground displacements that have occurred after the earthquakes by creating interferometric images from them.

Key words: DinSAR, deformations of the Earth's crust, earthquake

Определяне на деформациите на земната кора посредством DInSAR настъпили след земетресението в района Лариса от 3 март

Мила Атанасова[1], *Христо Николов*[2]
[1] *Национален институт по геофизика, геодезия и география, Българска академия на науките, София 1113, България*
e-mail: *mila_at_zl@abv.bg*
[2] *Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките, София 1113, България*,
e-mail: *hristo@stil.bas.bg*

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

Резюме
Земетресенията са природно бедствие, причиняващо щети, които се измерват с човешки животи и разрушения на природни и инфраструктурни обекти. Преки последствия от тяхното настъпване са предизвиканите, активизиране на свлачища, разкъсвания и вибрации на земната повърхност, цунами. В това изследване сме се фокусирали върху определяне на настъпилите повърхностни деформации след земетресение Mw 6.0 /определено от NOA и USGS/, което се случи на 3 март 2021 г. на 20км северозападно от гръцкия град Лариса. Ценен източник на данни за текущото състояние на земната повърхност в райони е програмата „Коперник“ на ЕС. Един от нейните компоненти е съставената от два сателита мисия Sentinel-1, които осигуряват данни от радар със синтезирана апертура (РСА). Благодарение на тях е възможно определянето на деформации на земната кора. В това изследване те са използвани за определяне параметрите на деформациите настъпили вследствие на земетресението. Данните от РСА бяха използвани за регистриране на настъпилите земни премествания посредством създаването на интерферометрични изображения, от които бе извлечена информация за причинените от земетресението пропадания.

1. Въведение

В сеизмичната зона до Лариса в Гърция на 3 март 2021г. беше регистрирано силно земетресение с магнитуд от 6.0 по Рихтер, което беше усетено и в много южни градове на България както и на поредица последващи земни трусове през следващите дни. Земетресението причини щети по сгради и инфраструктора, но за щастие няма човешки жертви. На фигура 1 е показан епицентъра на земетресението, както и района около него.



Фигура 1 Епицентър на земетресението близо до гр. Лариса 03.03.2021

В Таблица 1 е представена извадка на основното и вторичните земетресения с магнитуд над 5.0 M за периода 3-21 март 2021г. На базата на тях ще се търси обосновка на откритите деформации по данни от PCA на земната повърхност за периодите до затихване на вторичните трусове.

Таблица 1. Параметри на сеизмични събития с магнитуд над 5.0 за района на г. Лариса - март 2021 г.

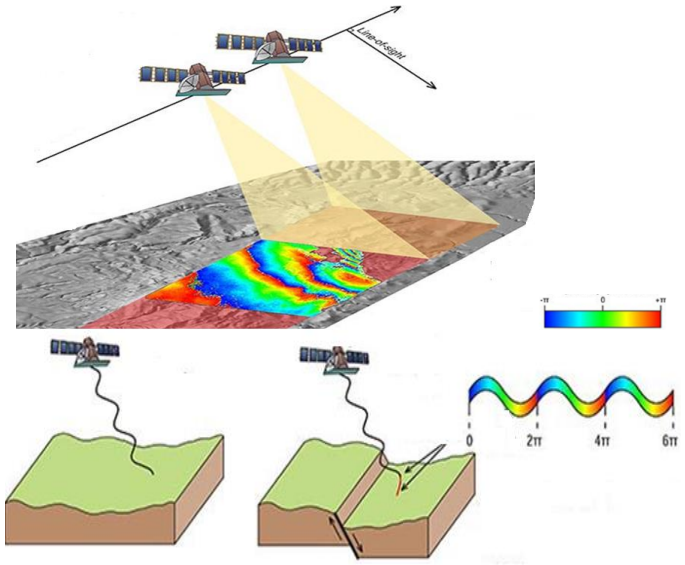
Магнитуд	Дата и час	Географска дължина	Географска ширина
6.0	3. Март 2021 10:16	22.2102	39.7591
5.1	3. Март 2021 11:45	22.2478	39.6996
5.2	3. Март 2021 18:24	22.1013	39.7316
5.9	4. Март 2021 18:38	22.1260	39.7993
5.1	4. Март 2021 19:23	21.9424	39.8373
5.2	12. Март 2021 12:57	22.0134	39.8387

2. Метод и данни

Диференциалната интерферометрия за обработка на PCA 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 на 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 е възможно точно измерване на относителните разстояния до конкретен обект. В процеса на обработка на SAR данните

се извършва съвместна регистрация на използваните изображения и след това се генерира диференциална интерферограма, която показва настъпилата деформация въз основа на промяната във фазовия сигнал.

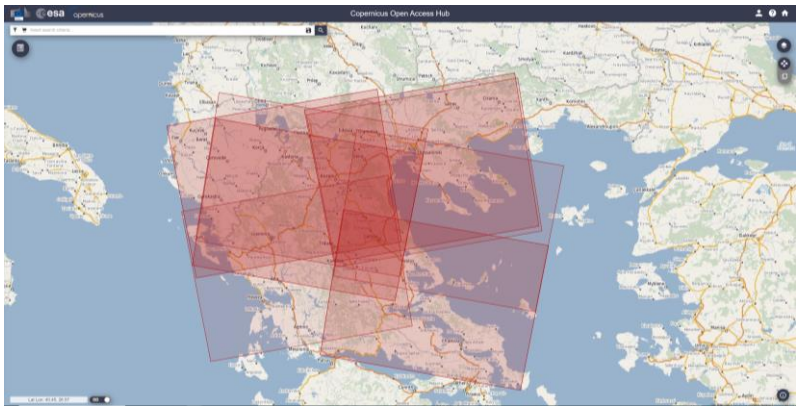
Следва да се има в превид, че регистрираните премествания се определят количествено по посоката на визирната линия на радара (Line of sight-LoS), която се определя от положението на сателита. Във вектора по LoS са включени както хоризонталните, така и вертикалните премествания. За количествено определяне на деформациите за конкретното събитие е прието, че доминира вертикалното движение /потъването/ и измерените премествания по LoS основно се проектират вертикално.



Фигура 2 Основни принципи на метода DInSAR

3. Данни от РСА по метод DInSAR

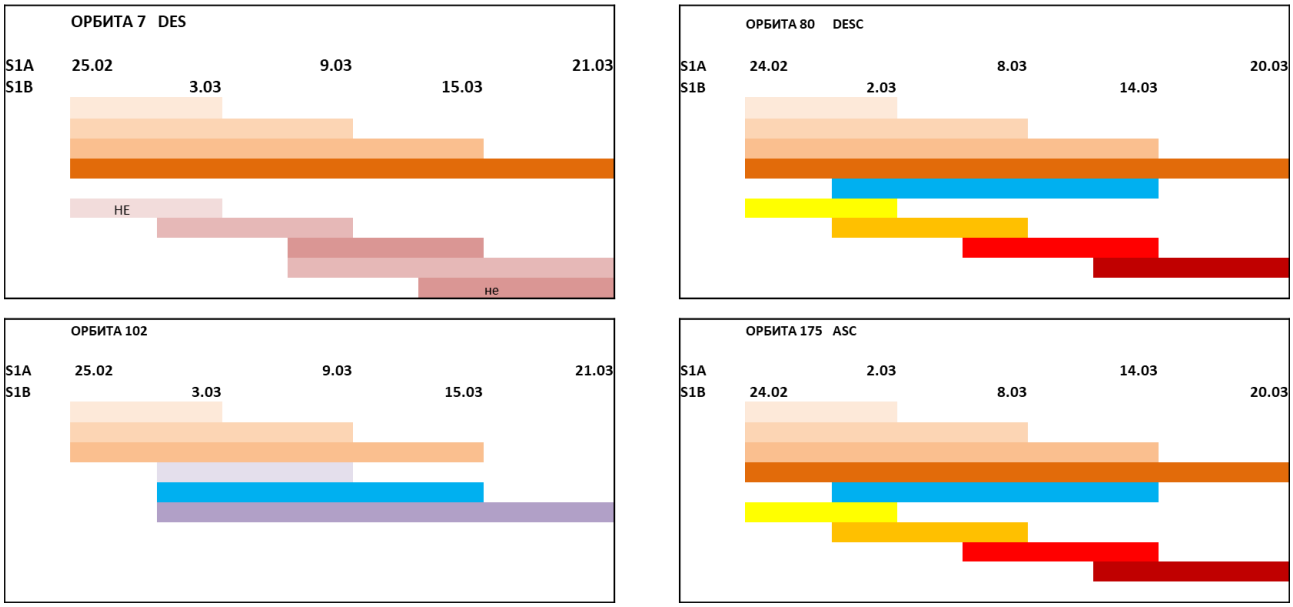
В това изследване основен източник на данни за регистриране на геодинамичните движения са данните от РСА разположен на борда на сателита Sentinel-1A , работещ в С обхват (5.4 GHz). С оглед получаване на достоверна информация относно преместванията настъпили вследствие на земетресението от хранилището за данни поддържано от ЕКА[1] бяха изтеглени изображения, които са от тип SLC[2] получени в режим на РСА.



Фигура 3 Сцени от РСА данни от възходящи 175 и 102 и низходящи 7 и 80 орбити на Sentinel-1A/B, включващи района на епицентъра

[1] Европейска космическа агенция

[2] В този тип данни се съдържа информация за амплитудата и фазата на радиосигнала.



Фигура 4 Орбити и дати на регистриране на SAR изображенията, формиранищи интерферограми

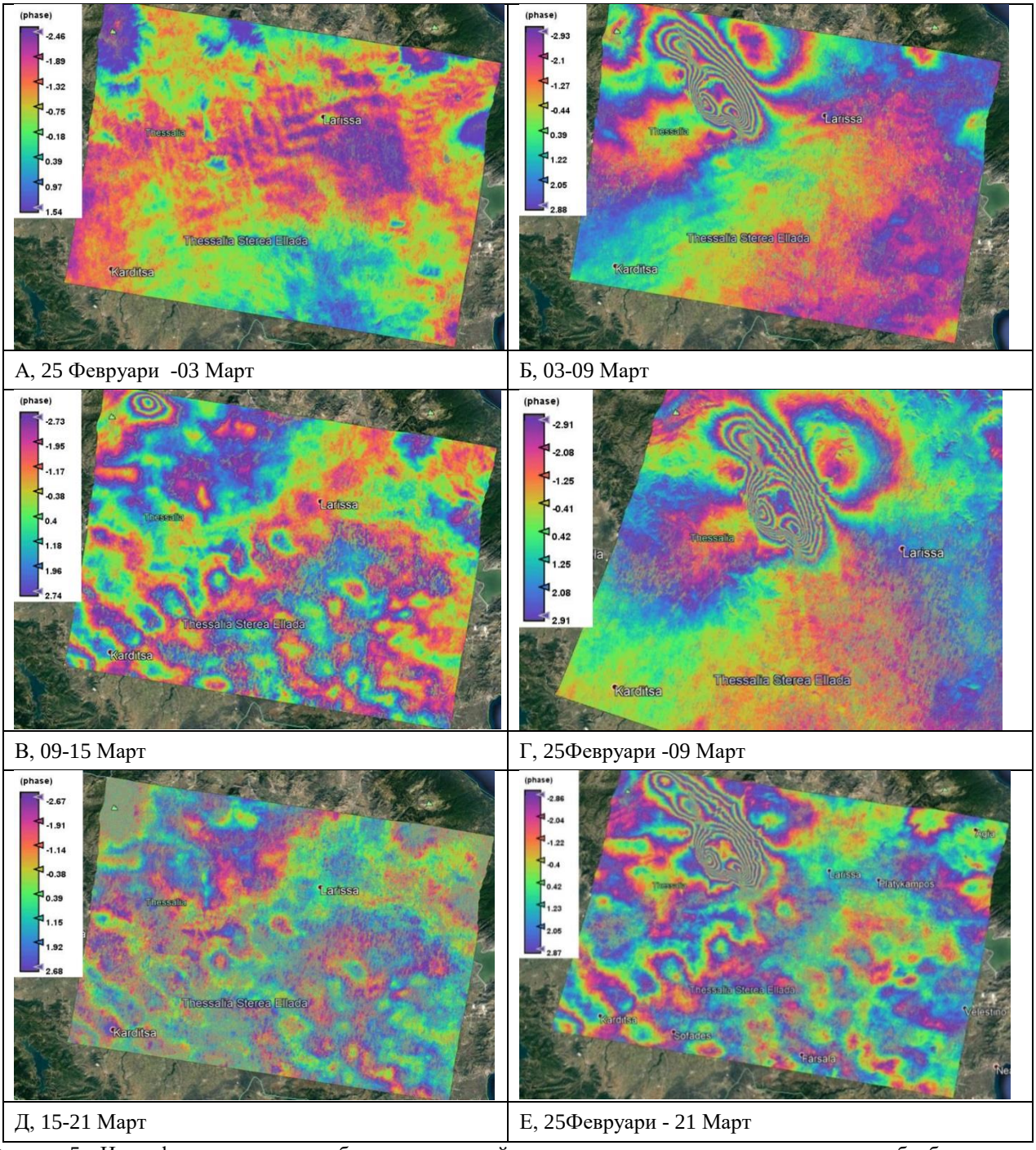
В процеса на тяхната обработка бяха формирани интерферометрични двойки (ИФД) за проследяване на последствията от събитието, като получената информация е изцяло базирана на промените във фазовата съставяща от радарния сигнал отразен от повърхността на Земята. Тази информация, записана във формата на интерферометрични изображения (ИФИ), позволи да се определят стойностите на появилите се деформации. Времевият интервал между ИФД беше подбран така, че да се осигури минимална времева декорелация. Вследствие на това се получиха високи стойности за оценената кохеретност на всяка ИФД още на етапа на тяхното формиране, което бе гаранция за качеството на получаваните от тях резултати на следващите етапи.

Друга особеност при обработката на РСА данните бе избора на типа на използваните орбити – възходяща (посока Ю-С) и низходяща (посока С-Ю). Този избор е важен, защото носителя на РСА винаги насочва приемо-предавателната антена в посока дясно спрямо посоката на движението му. Това определя ъгъла, от който се наблюдават обектите от земната повърхност и посоката на регистрираните относителни премествания, която се определя спрямо носителя на РСА. Тъй като за това конкретно изследване предварително посоката и типа на деформациите не бяха известни се наложи да бъдат обработени данни и от двата типа орбити (вж. фиг. 3 и 4).

Тематичната обработка на данните от РСА беше извършена изцяло посредством създадения и предоставян за свободно ползване програмен продукт SNAP [1], докато за по-добра визуализация и допълнителни анализи бяха използвани и други програмни продукти.

За отстраняване на топографските ефекти в процеса на създаване на интерферометричните изображения бе използван референтен ЦМТ от SRTM[3] с хоризонтална разделителна способност 1arcsec (~30m в хоризонтална равнина). С цел подобряване на съотношението сигнал/шум бе приложен адаптивен филтър към спектрална плътност на мощността на сигнала, който намалява широкоспектърния шум наличен в данните за сметка на намаляване на разделителната способност на изображението. Този филтър има важен принос за подобряване на крайните резултати, тъй като и малки изкривявани на фазовия сигнал водят до неточности.

[3] Shuttle Radar Topography Mission - https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html .



А, 25 Февруари -03 Март | Б, 03-09 Март

В, 09-15 Март | Г, 25Февруари -09 Март

Д, 15-21 Март | Е, 25Февруари - 21 Март

Фигура 5. Интерферометрични изображения на района на земетресението получени от обработката на низходяща орбита 7 за различни времеви периоди

На този етап в самите ИФИ бяха локализирани интерференчните ивици[4] (фиг 5 Б, В, Г, Е), показващи площите, където са протекли деформационни процеси. Всяка ивица съответства на деформация от 28mm и както се вижда на

Фигура -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

[4] В литературата са познати като interferometric fringes.

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. За количествено определяне на слягането се приема, че доминира вертикалното движение /потъването/ и измерените измествания по LoS се проектират вертикално.
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 мисията Сентинел е минимум 6 дена. На интерферограмата показана на фигура 3-В (09-15 Март) ясно се виждат настъпилите промени по земната повърхност изобразени в три малки интерферометрични кръга на северозапад от епицентъра. Това може да се обясни с вторичния трус на 12 март с магнитуд 5.2, както и на по-слаби събития[5] (виж фигура 3-В и таблица 1)

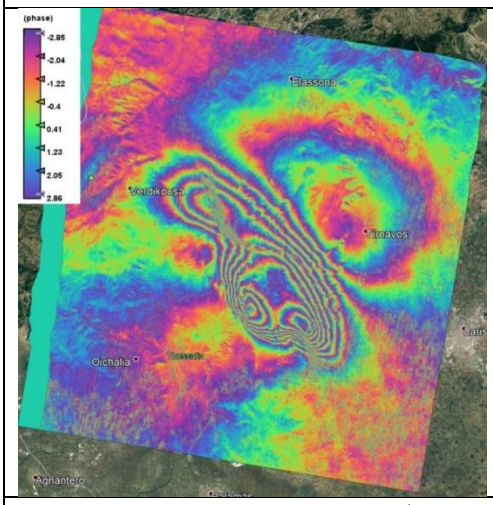
4. Резултати от обработката на данните от РСА за изследваното събитие

На **Error! Reference source not found.** са показани фрагменти от получените ИФИ за района за земетресението от двата типа орбити преди разгъването на фазата, където се виждат фазовите разлики предизвикани от събитието. Наличието на интерференчни ивици в изображенията показани на **Error! Reference source not found.** е свидетелство за факта, че регистрираната от РСА промяна във фазата на отразения радарен сигнал се дължи основно на сеизмичната дейност, а не се дължи на атмосферни смущения. Както се вижда броя интерференчни ивици от възходящата и низходящата орбити е различен. Този факт се обяснява с различната геометрия в момента на получаване на РСА данните т.е. на различната посока, в която е насочена приемната антена при двата типа орбити. И в двата случая регистрираните деформации са отчетени по посоката на наблюдение на РСА и са от порядъка на -10см;-30см с отрицателен знак. Оттук може да се направи заключението, че типа на регистрираната по данните от РСА деформация е пропадане.

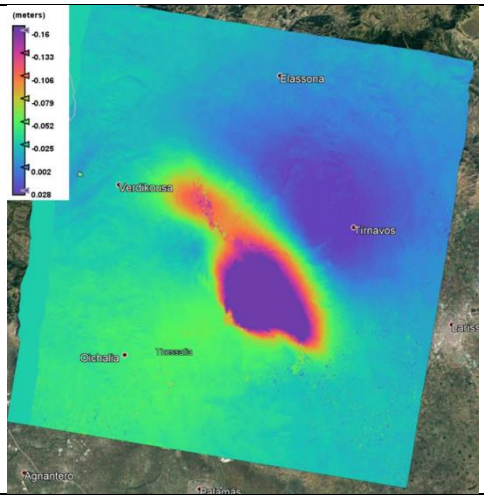
Низходящи орбити, при които LoS е в посока И-З



7 орбита 03-15 март



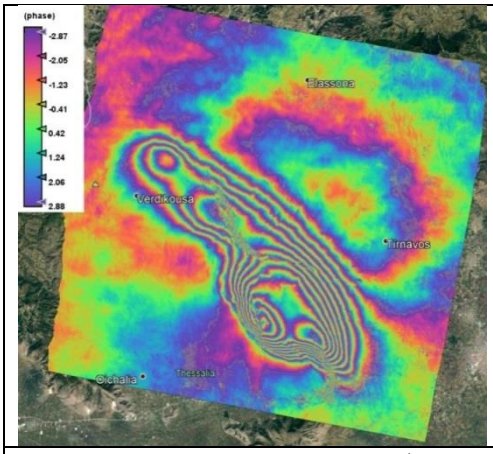
A



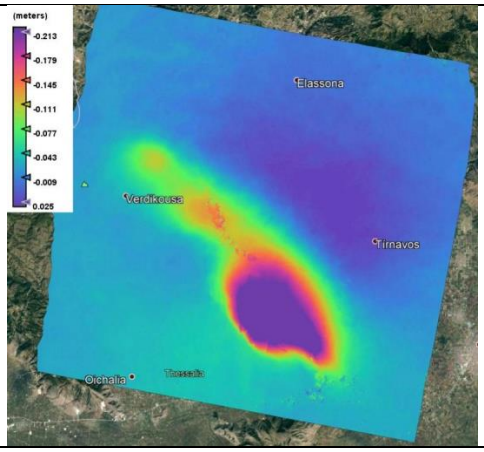
B

80 орбита 02-14 Март

[5] За този район за периода 02-21 март 2021г. са регистрирани повече от 100 труса с магнитуд над 3.



A

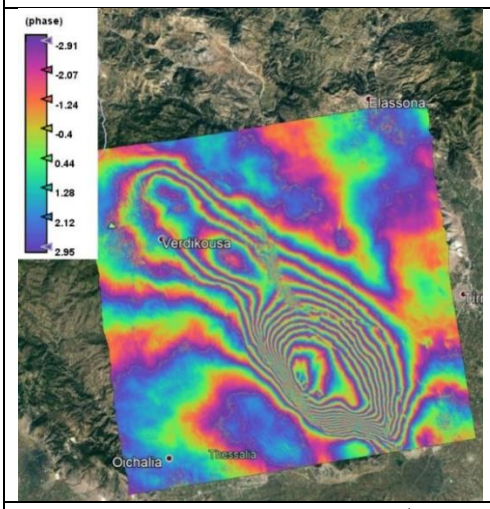


B

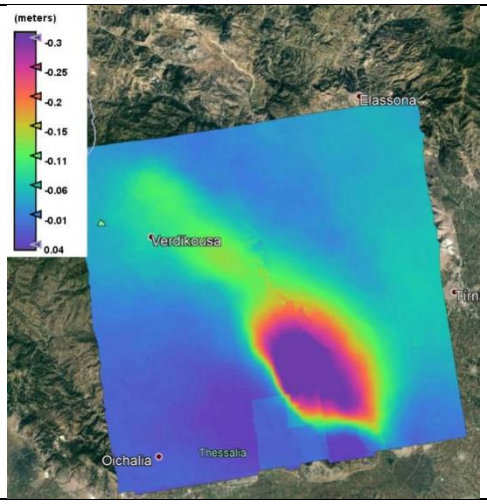
Възходящи орбити при които LoS е в посока З-И



175 орбита 02-14 Март

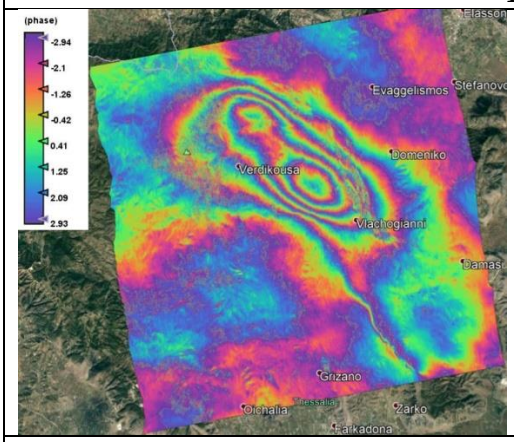


A

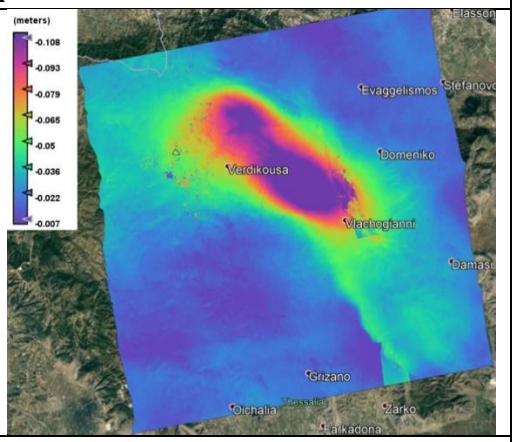


B

102 орбита 03-15 Март



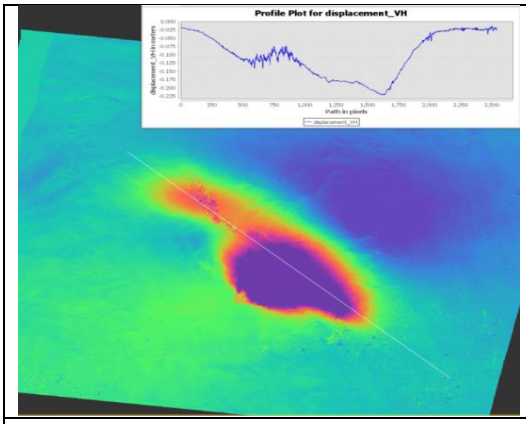
A



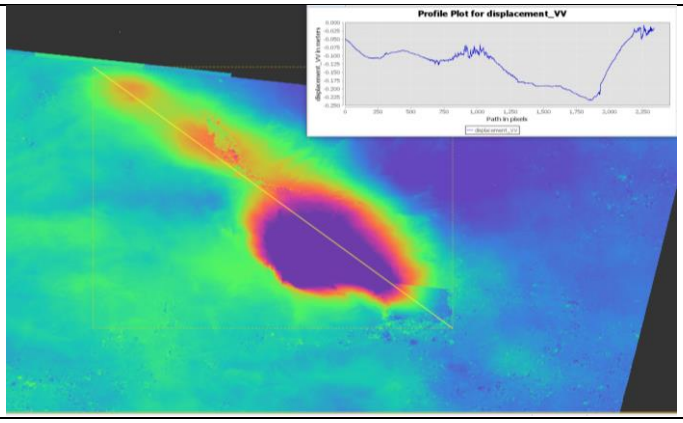
B

Фигура 6. Получени ИФИ и карти на деформацията след разгъване на съответната интерферограма от двата типа орбити за различни времеви интервали

На **Error! Reference source not found.** и са показани фрагменти от ИФИ (А) и ИФИ след разгъване на фазата (В, които представят настъпилите деформации на земната повърхност вследствие на събитието, а най-високите стойности за тях ~30cm са получени от 175 орбита за периода 02-14 Март. Разликите в стойностите от различните орбити потвърждават необходимостта при изучаване на деформации получени след земетресения, да се изготвят ИФИ и от двата типа орбити с цел получаване на по-добра представа за тях и последващото им сравнение с теренни измервани или резултати от други източници. Ясно видимо е от фиг. 6, че дори за конкретна орбитална пътечка се получават различни стойности за всяко едно ИФИ



А)
25Февруари -09 Март



Б)
25Февруари -21 Март

Фигура 7. Карти на деформацията получени от орбита 7 и профили на относителните деформации за интервала време между двете сцени.

На фигури 7 с помощта на надлъжни профилни линии по направление северозапад - югоизток са определени относителните стойности на преместванията по земната повърхност. Тези относителни премествания се свързват с интервала време между двете изображения формиращи интерферограмата.

Заключение

Приложеният в конкретното изследване метод DInSAR е подходящ за измерване на пространствения обхват и степента на настъпилите повърхностни деформации, дължащи се на природни опасности (земетресения, вулкани, свлачища, тектонски движения). От представените резултати след обработка на данни от PCA по този метод, може да се направи заключение, че те са един допълнителен източник на информация за настъпилите деформации на земната кора, дължащи се на земетресения. Като техни предимства следва да бъдат изтъкнати, че се получава информация за преместванията в рамките на големи райони и в сравнително кратък времеви период след събитието. Тази информация 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 на това конкретно събитие.

Литература

1. 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
2. http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/
3. https://scihub.copernicus.eu/