



Determination of deformations of the Earth's crust after an earthquake by DInSAR

Mila Atanasova^{1*}, Hristo Nikolov², Valentina Protopopova¹

¹ National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 1113, Bulgaria, mila_at_zl@abv.bg

² Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 1113, Bulgaria

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

Abstract

Earthquakes are a natural disaster causing damage that is measured by human lives and destruction of natural and infrastructural sites. The direct consequences of their occurrence are tsunamis, landslides activation, earth ruptures and ground vibrations. An important task after the occurrence of such event is preparation of a plan to manage them, based on the current status of the territory. A valuable source of data about the current state of earth surface is the EU Copernicus program. One of its components is the two-satellite Sentinel-1 mission that provides data from synthesized aperture radar (SAR). Thanks to these data it is possible to determine deformations of the Earth's crust. In this study SAR data were used to determine the deformation parameters of the Aegean earthquake affecting the Greek island of Kos and the town of Bodrum located in the southwest of Turkey on 20 July 2017, the magnitude of which was determined by NOAA and KOERI to be Mw6.6. SAR data was used to register the Earth's crust movements creating set interferometric images. Based those images information on subsidence caused by the earthquake was obtained.

Определяне на деформациите на земната кора след земетресение посредством DInSAR

Мила Атанасова^{1*}, Христо Николов², Валентина Протопопова¹

¹ Национален институт по геофизика, геодезия и география, Българска академия на науките, София 1113, България
mila_at_zl@abv.bg

² Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките, София 1113, България

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 цунами, активизирането на свлачища, разкъсвания и вибрации на земната повърхност. Важна задача след настъпване на подобно събитие е изготвянето на план за тяхното преодоляване, в основата на който са данни за състоянието на територията. Ценен източник на данни за текущото състояние на участъци от земната повърхност е програма „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 в Егейско море засегнало гръцкия остров Кос и гр. Бодрум в югозападната част на Турция на 20 юли 2017 г., чийто магнитуд е определен от NOAA и KOERI на Mw 6.6. 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 провадания.

Въведение

На 20 юли 2017 г в близост до остров Кос стана земетресение с магнитуд по сеизмичен момент Mw 6.6 и на дълбочина 2 км (NOA, KOERI). Епицентърът на земетресението се намира в Егейско море, на около кимолетър южно от необитаемия остров Караада, като засегнати са гръцкия остров Кос и гр. Бодрум в югозападната част на Турция (вж. фигура 1). След земетресението е наблюдавана вълна цунами, която залива бреговете на гр. Бодрум. Според констатациите направени след полеви проучвания и доклади на очевидци, в западната част на полуостров Бодрум почти отсъства движение на водата. Ефектите от вълната цунами са наблюдавани по южния бряг на полуостров Бодрум, само от 27.255E до 27.528E географска дължина, както и по североизточното крайбрежие на остров Кос. Максималната височина на вълната цунами е около 1,9 м, наблюдавана в устието на малък сух поток в залива Гумбет (Gumbet bay), който е най-силно засегнат от цунамито на полуостров Бодрум. Интересен е фактът, че по крайбрежието на залива Битез (Bitez bay), намиращ се западно от залива Гумбет и по пристанище Бодрум, намиращ се на изток, не са наблюдавани разрушения, което показва, че основните въздействия от цунами са локализирани в залива

Гумбет. При терените проверки и по данни от оптичния сензор на борда на сателита Sentinel2A не са установени големи свлачища нито на гръцка, нито на турска територия [1].



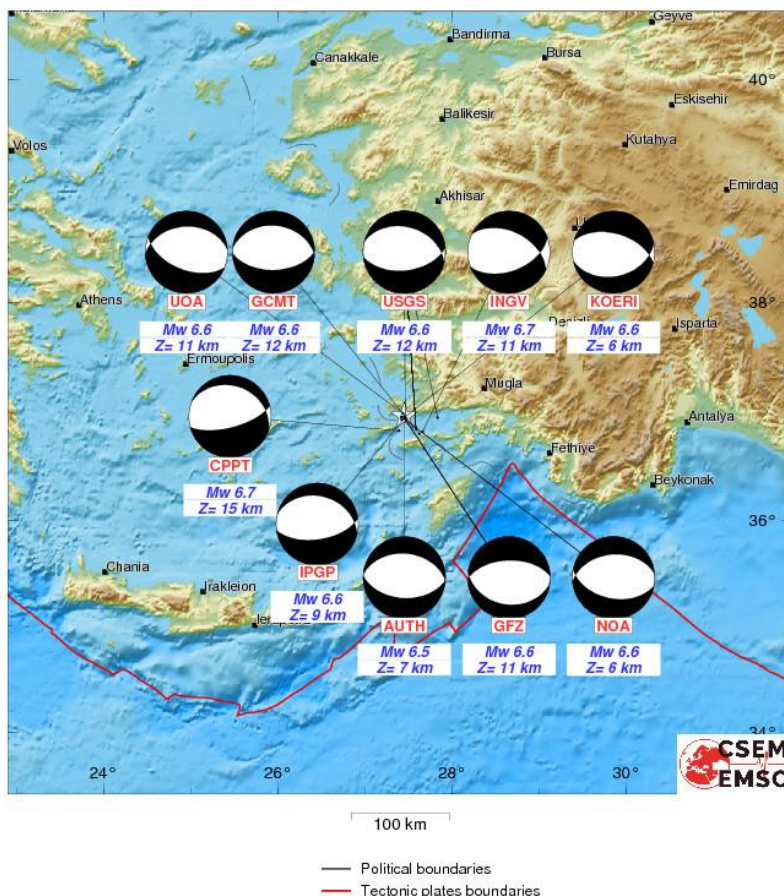
Фигура 1 Епицентър (Karaada) и максимално ниво на цунами (Gumbet bay).

Земната деформация в областта е ориентирана предимно по посока севр-юг ($\pm 20^\circ$), характерна за Егейската/Анатолийската екстензия на земната кора, определена въз основа на ориентацията на направляващата GPS екстензионна ос, както и на главните оси на напреженията на земната кора получени по механизми на земетресения, показващи екстензия в посока север-юг. Според локални проучвания в залива Гьокова (Kerameikos) е определена екстензия с около 4 мм/год. В тази област са наблюдавани също известни разседни тектонски движения, които се дължат на взаимодействието на Егейската плоча с микроплочата Нубиа. Последните сеизмични данни предоставят доказателства за млади отседни движения [1].

Механизъм на земетресението

Според всички сеизмични центрове поддали информация за механизъм на земетресението от 20 юли 2017 г. (фигура 2), в близост до остров Кос, движението е с нормален разседен характер, без или с много малка отседна компонента. Всички по-силни афтершоци имат същия тип механизъм на разломяване, като някои показват по-силно изразена отседна компонента, но нито едно събитие няма чисто отседен характер. Това показва, че причините за произход на катастрофалното земетресение са причинени от екстензията на земната кора в Егейско-Анатолийската област, а не порди ковергенцията на Егейската плоча с микроплочата Нубиа.

Трудно може да се каже, единствено от фокалните механизми, коя от двете нодални равнини е разломна, но по-вероятно е разломната нодална равнина да е тази, която затъва на юг, с проекция на повърхността разположена между полуостров Бодрум (на север) и остров Караада (на юг) и ъгъл на затъване около 50° , съдейки от ефектите от вълната цунами и от InSAR резултатите.



Фигура 2. Механизъм на земетресението от 20 юли 2017 г., в близост до остров Кос (<https://www.emsc-csem.org>)

Обработка на данни от PCA по метод DInSAR

В това изследване основен източник на данни за регистриране на геодинамичните движения са данни от PCA работещ в С обхват (5.4 GHz) и разположен на борда на сателита Sentinel-1A. С оглед получаване на достоверна информация относно преместванията настъпили вследствие на земетресението от хранилището за данни поддържано от ЕКА¹ бяха изтеглени 4 изображения, които са от тип SLC² получени в режим IW на PCA (вж. таблица 1). От тях бяха формирани интерферометрични двойки (ИФД) за проследяване на последствията от събитието.

| ИФД | Тип орбита/номер | В _{рег} [m] | Modeled coherence |
|-------------------------|------------------|----------------------|-------------------|
| 12.07.2017 – 24.07.2017 | възходяща/ 131 | 33,24 | 0,96 |
| 18.07.2017 – 30.07.2017 | низходяща/36 | 5,51 | 0,98 |

Таблица 1. Данни за използваните PCA изображения.

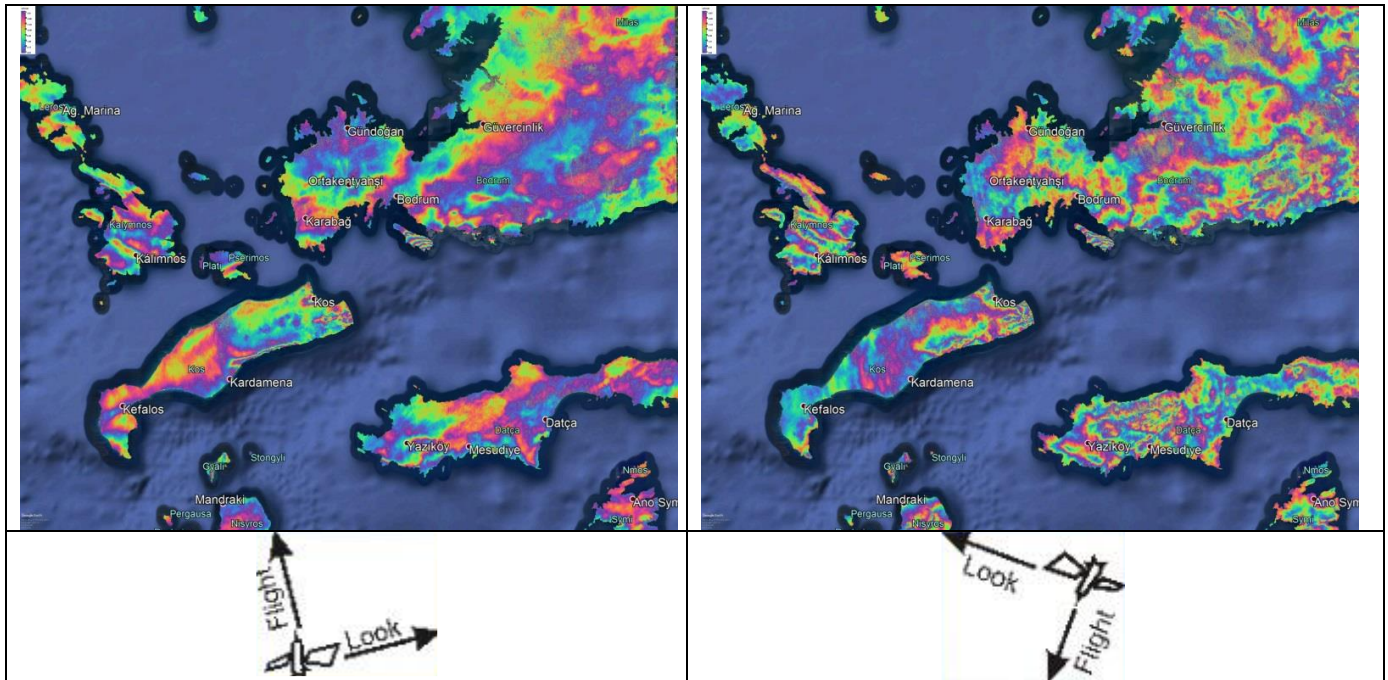
След тяхната тематична обработка беше извлечена информация за фазата на отразения от повърхността на Земята радарен сигнал. Тази информация, записана във формата на интерферометрични изображения (ИФИ), позволи да се определят стойностите на появилите се деформации. Времевият интервал между ИФД беше подбран така, че да се осигури минимална времева декорелация т.е. подбраните дати да са максимално близо преди и след събитието. Вследствие на това се получиха високи стойности за оценената кохерентност на всяка ИФД на още на етапа на тяхното формиране, което бе гаранция за качеството на получаваните от тях резултати на следващите етапи.

Друга особеност при обработката на PCA данните бе избора на типа на използваните орбити – възходяща (посока ЮС) и низходяща (посока СЮ). Този избор е важен, защото носителя на PCA насочва приемо-предавателната антена в посока дясно спрямо посоката на движението му. Това определя ъгъла, от който се

¹ Европейска космическа агенция

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

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. 2). Тематичната обработка на данните от РСА беше извършена посредством създадения и предоставян за свободно ползване програмнен продукт SNAP [3], докато за визуализация и допълнителни анализи бяха използвани и други програмни продукти. Тъй като изследвания район е с относително неголяма площ от изходните РСА данни бяха използвани само онези, които го включват и по този начин самата обработка бе извършена за по-малко време.



Фигура 3. Интерферометрични изображения на района на земетресението получени от обработката на възходяща и низходяща орбити.

За отстраняване на топографските ефекти в процеса на създаване на интерферометричните изображения бе използван референтен ЦМТ от SRTM³ с хоризонтална разделителна способност 1arcsec (~30m). 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 допринася значително за подобряване на резултатите от следващата стъпка, при която от стойности за фазата се преминава към метрична система. След това в самите ИФИ бяха локализирани интерференчни ивици⁴, показващи площите, където са протекли деформационни процеси. Всяка ивица съответства на деформация от 28mm и както се вижда на Фигура 3 за областите в близост до епицентъра (о. Караада – фиг.3 Б)) 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.

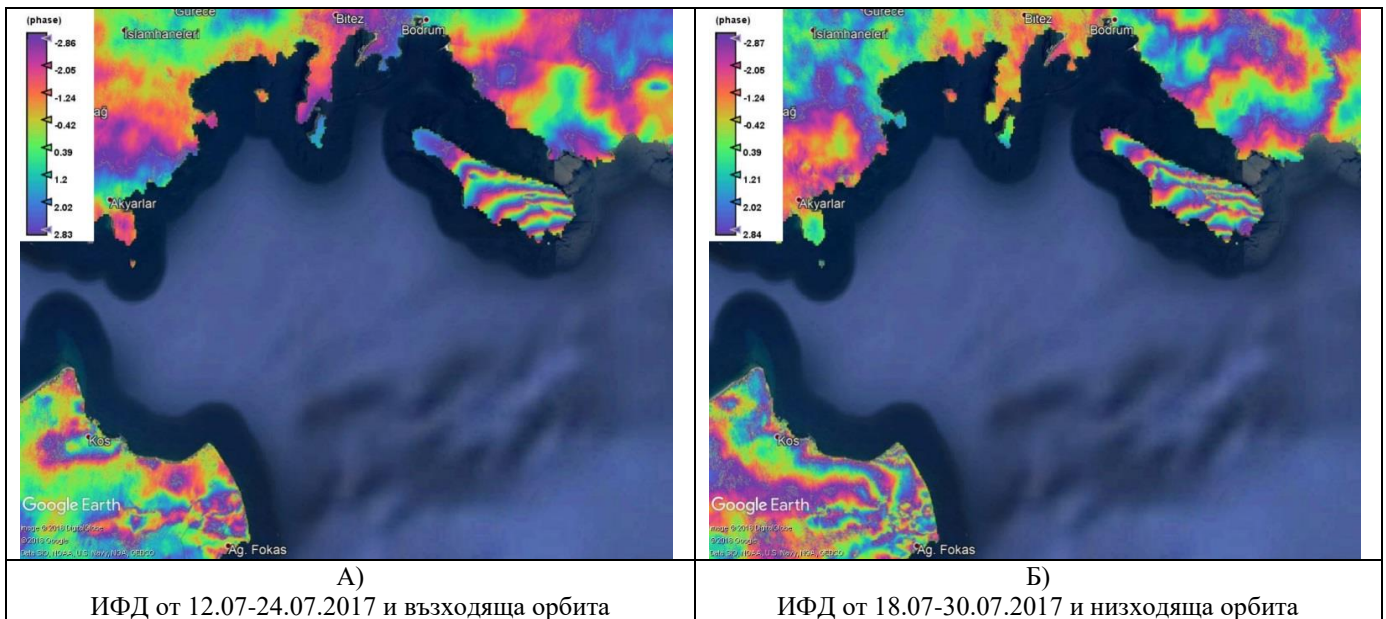
Резултати от обработката на данните от РСА за изследваното събитие

На Фигура 2 са показани получените ИФИ за района за земетресението преди разгъването на фазата, където се виждат фазовите разлики предизвикани от събитието. Получените след последващата обработка на ИФИ резултати и от двата типа орбити са с високо качество, което е потвърдено от високите стойности на кохерентността (вж. Фигура 4 Б)) за изследваните площи. Наличието на интерференчни ивици и в двете изображения показани на Фигура 2 е свидетелство за факта, че регистрираната от РСА промяна във фазата на отразения радарен сигнал се дължи на сеизмичната дейност, а не се дължи на атмосферни смущения. На Фигура 3 са показани фрагменти от ИФИ от двата типа орбити, съдържащи епицентъра на събитието. Както се вижда броя интерференчни ивици по остров Караада от възходящата и низходящата орбити е различен

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

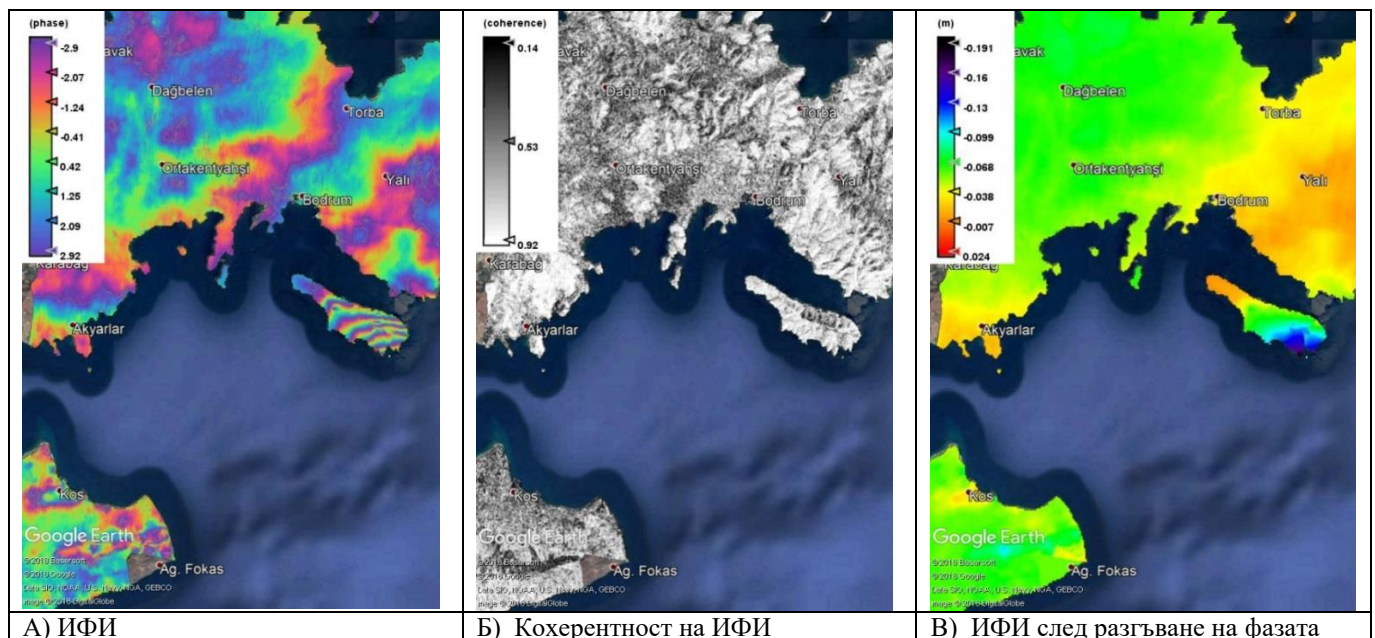
⁴ В литературата са познати като interferometric fringes.

съответно 7.5 и 6 ивици. Това се дължи на 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 20см с положителен знак. Отгук може да се направи заключението, че типа на регистрираната по данните от РСА деформация е пропадане, което е потвърдено и при теренните проверки [1].



Фигура 4. Фрагменти от ИФИ, на които ясно се вижда поредицата от интерферометрични ивици, дължащи се на земетресението.

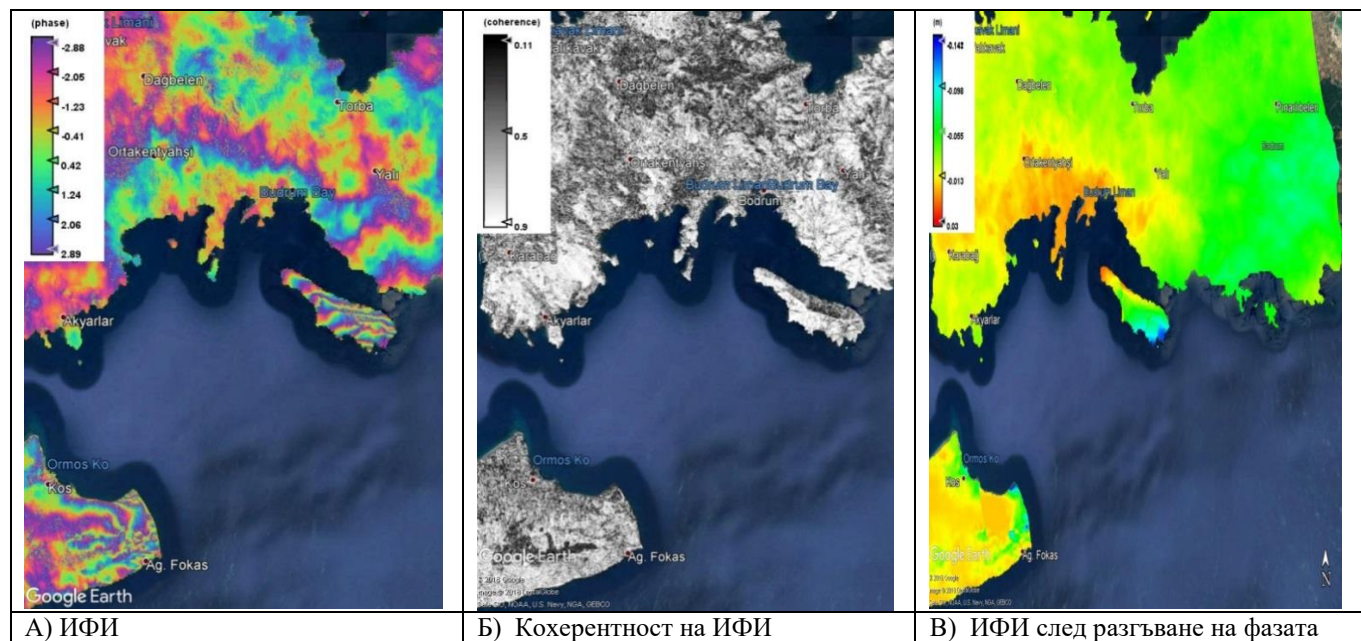
На същата фигура се вижда и североизточния бряг на остров Кос, но регистрираните от РСА данни от двете орбити за тази област се различават значително като това се дължи на посоката на наблюдение към терена от апаратурата. В този случай по-достоверната информация би била резултат от интерпретацията на данни от низходящата орбита.



Фигура 5. ИФД от 12.07-24.07. 2017 и възходяща орбита

На фигури 5 и 6 са показани фрагменти от ИФИ (А), изображения на кохерентността за всеки пиксел от ИФИ (Б) и ИФИ след разгъване на фазата (В). Стойностите за кохерентността съответстват на шума в ИФИ и са използва като критерий за качество. И при двете получени ИФИ и за двата типа орбити за районите от сушата тя има стойности над 0.4, което е прието да се счита, че от ИФИ може да се извлече достоверна

информация. На Фигура 5 В) са представени настъпилите вследствие на събитието деформации на земната повърхност, а най-високите стойности за тях (~20cm) са в близост до епицентъра (южната част на о. Караада).



Фигура 1. ИФД от 18.07-30.07.2017 и низходяща орбита

Показаните на Фигура 1 А) резултати са от низходящата орбита интерферометричните ивици са по-ясно забележими. Този факт потвърждава 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.

Заклучение

От представените резултати след обработка на данни от PCA 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. Тясно 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.

Благодарности:

Настоящото изследване е частично финансирано от ФНИ, ДН 14/1 от 11.12.2017.

ЛИТЕРАТУРА

- Yalçinera A. et al., The 20th July 2017 (22:31 Utc) Bodrum/Kos Earthquake and tsunami; post tsunami field survey report, <http://users.metu.edu.tr/yalciner/july-21-2017-tsunami-report/Report-Field-Survey-of-July-20-2017-Bodrum-Kos-Tsunami.pdf>
- Ganas A. et al., Co-seismic deformation and preliminary fault model of the July 20, 2017 M6.6 Kos earthquake, Aegean Sea, EMSC report, https://www.emsc-csem.org/Doc/Additional_Earthquake_Report/606346/Kos_report_30-7-2017.pdf
- <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>