

Приложение на сателитни SAR данни за установяване деформации на земната кора след земетресения

Христо Николов¹, Мила Атанасова², Валентина Протопопова²

¹*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките*

²*Национален институт по геофизика, геодезия и география – Българска академия на науките*
e-mail: mila_at_zl@abv.bg, hristo@stil.bas.bg

Ключови думи: *DInSAR, природни бедствия, земетресения*

Резюме: *Сателитнобазираните радарни апартурни комплекси предоставят данни, на базата на които е възможно да се получи информация за размера на настъпили движения на земната повърхност от порядъка на сантиметри. Подобна информация е от изключително значение за оценка на последиците от природни бедствия или такива с антропогенен произход. Тъй като земетресения се случват постоянно и не е възможно да бъдат предсказани всяка допълнителна информация относно обхвата на конкретни сеизмично събитие е от изключителна важност за местните и национални власти, които са отговорни за отстраняване на щетите причинени на населението, инфраструктурата и ландшафта след такива събития. В това изследване са представени резултатите получени след съвместна обработка на два набора SAR данни, допълнени и с данни от други източници, на чиято основа се формират две интерферометрични изображения, които предоставят информация за настъпилите деформационни процеси в райони от земната повърхност след поредица от земетресения, станали на три различни места на Балканския полуостров - едният в близост до остров Кос и град Бодрум, другият близо до остров Закинтос и третият на Йонийското крайбрежие на Албания. Получените карти, отразяващи деформациите на земната кора след споменатите събития, се основават на данни от възходяща и низходяща орбита на спътника Sentinel-1, който е част от програмата „Коперник“ на ЕС за наблюдение на Земята. Получените резултати за трите изследвани събития включени в това проучване доказаха своята надеждност тъй като бяха сравнени с in-situ измервания. Тази констатация дава основание да се твърди, че на базата на получените резултати е възможно на компетентните национални органи да се предостави надеждна информация относно настъпилите деформации на земната кора в региони, които са проблематични за директни теренни проверки, които имат за задача да установят настъпилите деформации.*

Application of satellite SAR data to detect deformations of the Earth's crust after earthquakes

Hristo Nikolov¹, Mila Atanasova², Valentina Protopopova²

¹*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences*

²*National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences*
e-mail: mila_at_zl@abv.bg, hristo@stil.bas.bg

Keywords: *DInSAR, natural disasters, earthquakes*

Abstract: *The data provided by satellite-based active radar instruments after appropriate thematic processing are transformed into information that reflects the amount of movements on the Earth's surface of the order of centimeters. Such information is of crucial importance for assessing the consequences of natural or anthropogenic disasters. Because earthquakes occur constantly and it is not possible to predict them any additional information about the scope of a particular seismic event is essential for local and national authorities who are responsible for mitigating the damages caused to the population, to the infrastructure and to the landscape following such events. This study presents the results obtained by jointly processing two sets of SAR data with other additional data to obtain two interferometric images that provide information on the deformation processes after a series of earthquakes that occurred on three different locations at the Balkan peninsula – one close to island of Kos and Bodrum town, the other close to the island of Zakynthos and the third on Ionian coast of Albania. The obtained maps reflecting the deformations of the Earth's crust after the mentioned events are based*

on data from the ascending and descending orbits of the satellite Sentinel-1 under Copernicus EU program, which were compared with in-situ data to increase the reliability of the drawn conclusions. The results of the all researched events included in this study proved to be reliable as they were compared with in-situ measurements. This finding suggest that on the basis of those results it would be possible to provide reliable information to the national authorities on the deformations of the Earth's crust and most specifically in that regions which are problematic for direct field inspections needed to establish the occurred ground deformations.

The obtained maps of the deformations of the earth's crust are based on data from the ascending and descending orbits of the satellite Sentinel1 under the EU program "Copernicus", which were compared with field data to increase the reliability of the drawn conclusions. The results of the study proved to be reliable as they were compared with in-situ measurements, which in turn suggest that on the basis of the results it would be possible to provide reliable information to national authorities on the deformations of the Earth's crust and most specifically in those regions which are problematic for direct field inspections aimed at establishing the occurred deformations.

1. Въведение

Земетресенията са природни бедствия, които причиняват сериозни щети на обществото, включително загуба на човешки животи, наранявания и материални щети водещи до икономически загуби. Така изброените вредни въздействия е възможно да бъдат значително намалени, чрез осигуряване на надеждна и навременна информация относно размера на събитието, която позволява да бъдат подобрени предприеманите мерки за отстраняване на последствията от него. В настоящата статия е направен преглед на възможностите за създаване на интерферометрични карти на засегнатите от земетресенията части от земната повърхност предоставяни от информационните продукти получавани след тематична обработка по метод DInSAR базирани на данни от радари със синтезирана апертура (РСА) разположени на сателитни платформи. Тези информационни продукти могат да подпомогнат националните и местни власти при вземане на решения за отстраняване на настъпилите след събитието последствия и при предприемане на спасителни операции. Разгледани са три отделни събития, които ясно показват предимствата на избрания подход – възможност за оценка на настъпилите в резултат на събитието земни премествания на големи площи (повече от 200 km²), регистриране на сравнително малки премествания (~ 1 cm), както за получаване на данни независимо от метеорологичните условия и сравнително малките интервали на повторно преминаване на сателита над един и същ район от повърхността на Земята.

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 (по данни на NOAA, KOERI). Епицентърът на земетресението се намира в Егейско море, на около 1 km 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 цунамието 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. (Yaçınera,2017)

На 25 октомври 2018 на около 45 km югозападно от остров Закинтос бе регистрирано земетресение с магнитуд по сеизмичен момент Mw 6.8 и на дълбочина 10 km. То беше предшествано от форшок с Mw = 4.1 на 17 октомври 2018 г. (т.е. една седмица преди основното събитие) и последвано от вторични трусове, разпространяващи се в голяма офшорна зона на западната Хеленидска дъга (Ganas, 2020).

На 26 ноември 2019 в северозападната част на Албания се случи най-опустошителното земетресение за последните 40 години, което бе второто подобно събитие за период от три месеца. В резултат на него около 50 души загубиха живота си и повече от 5000 останаха без подслон. Местоположението на най-силното земетресение е на около 8 km североизточно от пристанищния град Дуръс, където няколко сгради се срутиха. Общите щети причинени от това събитие, все още са неуточнени, тъй като за много от сградите все още се извършват проверки за да се установи тяхната структурна здравина и безопасност за обитаване.

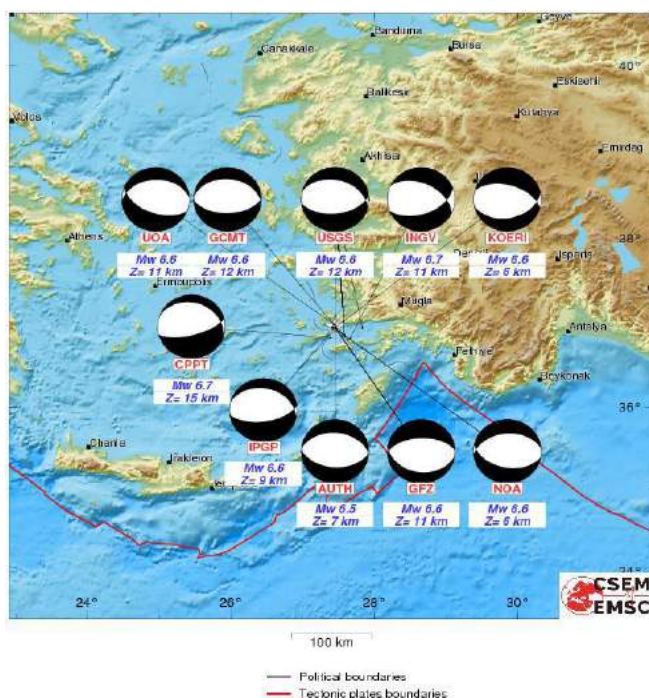
Горепосочените събития са причината авторите да решат да извършат това изследване – да установят дали има настъпили измествания по земната повърхност (деформации) вследствие на тези екстремни събития в рамките на големи площи, които могат да се използват като индикатор кои от намиращите се в засегнатите райони сгради и инфраструктурни обекти се очаква да бъдат по-податливи на щети. В голям брой научни статии (Roland, 1999), (Motagh, 2010) е посочено, че информацията за движения на земната повърхност получена по метод DInSAR е надеждна и може да бъде успешно интегрирана в процеса на вземане на решения от компетентните власти след сеизмични събития. Трябва да се посочи, че за изследваните три конкретни събития тази информация беше получавана в рамките на относително малки времеви периоди след земетресението благодарение на политиката на ЕКА за отворени данни и краткия период от време за повторно преминаване на двойката сателити от мисията Sentinel-1. Основна задача на това проучване беше да се установи величината на деформациите по земната повърхност и да се изготвят карти на преместванията. За постигането на тази цел въз основа на данни извлечени от EMSC (EMSC, 2020) беше създаван кратък каталог на земетресенията с магнитуд по-голям от Mw 3 за период от две седмици преди и след всяко едно от събитията. Конкретните дати за тези каталози се подбираха в зависимост от наличието на използваните изходни данни от PCA. Необходимо е да се подчертае, че резултатите, представени в тази статия, отразяват кумулативния ефект причинен от поредица земетресения в рамките на всеки един от изследваните райони, а не отразяват проучване на единично събитие.

2. Данни и метод

Сеизмологични данни за изследваните събития

Земетресение о-в Кос (Гърция)

Според всички сеизмични центрове подали информация за механизъм на земетресението от 20 юли 2017 г. в близост до остров Кос (вж. Фигура 1) 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



Фигура 1. Механизъм на земетресението от 20 юли 2017 г., в близост до остров Кос (<https://www.emsc-csem.org>)

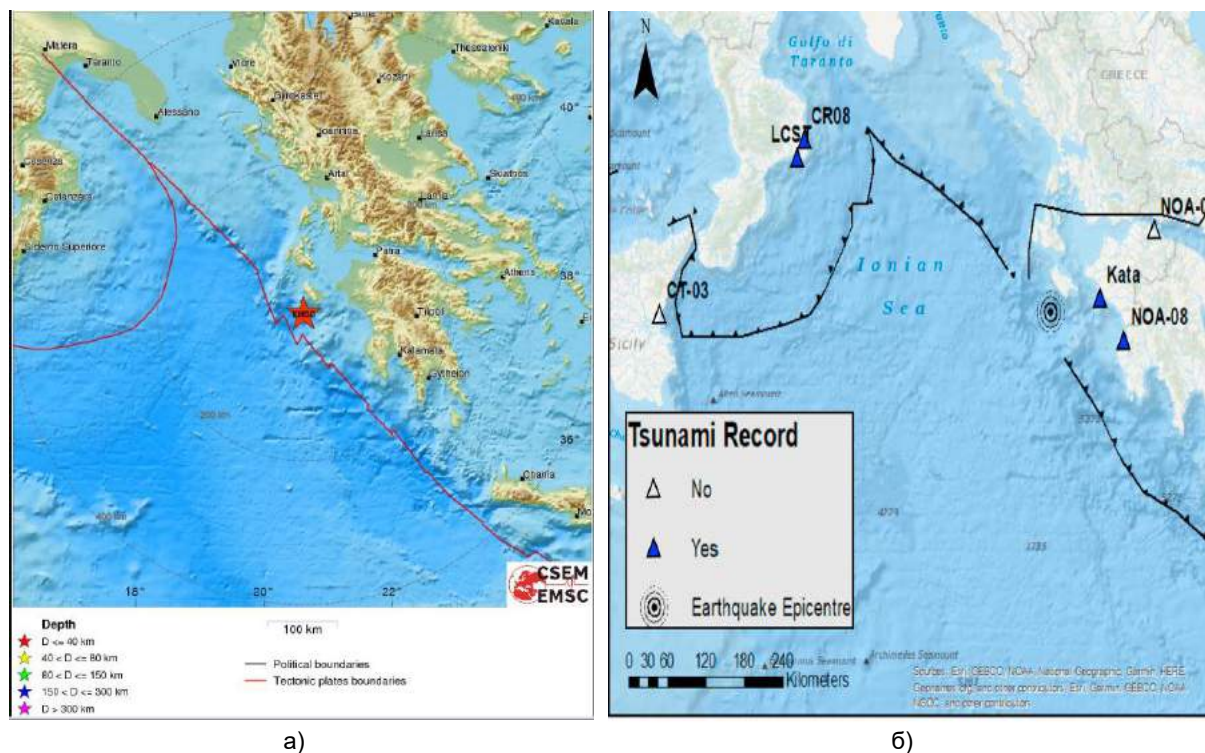
отседна компонента, но нито едно събитие няма чисто отседен характер. Това показва, че причините за произход на катастрофалното земетресение са причинени от екстензията на земната кора в Егейско-Анатолийската област, а не порди ковергенцията на Егейската плоча с микроплочата Нубиа.

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. (вж. Фигура 1)

Земетресение о-в Закинтос (Гърция)

На 25 октомври 2018 се случи голямо плитко земетресение в западната Хеленидска дъга (WHA), ~ 40 км югозападно от остров Закинтос, Йонийско море, Гърция. Основният шок беше регистриран от Гръцката обединена сеизмологична мрежа (HUSN). Неговата моментна величина, изчислена от Националната обсерватория в Атина (NOA) е $M_w = 6.7$ (по данни от NOA и други източници) (вж. Фигура 2 а). Нанесени бяха незначителни щети на къщи и част от пристанището на острова. Съобщено бе се за свлачища на няколко места по западното и южното крайбрежие на острова. Малко цунами е регистрирано от две мареографни станции в Калабрия (Италия) и две в Пелопонес (Фигура 2 б).

Районът на Закинтос се намира в сложен граничен регион, където две основни тектонски плочи, Нубия и Евразия, се сближават, образувайки образуването на Хеленидската дъга. Комплексният характер на движението се дължи на комбинацията от движения: субдукция на север на по-тежката океанска (Нубия) плоча и континентален сблъсък на Адрия (континентален фрагмент на Нубия) с Евразия (Ganas, 2020).



Фигура 2. Основно събитие в близост до о-в Закинтос. (фигура б) е по (Ganas, 2020))

Земетресение в близост до гр. Дуръс (Албания)

Силното земетресение ($M_w 6.3$) удари албанското крайбрежие на Адриатическо море близо до град Дуръс в 2:54 UTC. Усетени бяха и няколко по-слаби форшока, най-силният сред тях се случи в 1:47 UTC ($M_L 4.4$). Основният шок беше последван от дълга афтершокова последователност с повече от 25 земетресения с магнитуд по-голям от 4 само през първата седмица.

Решението на фокусния механизъм на основния шок показва чисто обратно приплъзване (Фигура 3). Движението е по разлом с поска северозапад-югоизток (около 330°), което е в съответствие с тектониката на региона (Фигура 3). Това показва, че „стъпалото“ е разположено под Адриатическо море, а подвижната „висяща стена“ е разположена върху континенталната земна кора (на територията на Албания). Като се има предвид системата от паралелни разломи в региона с насочена в посока запад и ориентация на разломи североизток-югозапад, както и хипоцентърът на земетресението от Дуръс проектиран върху Адриатическото крайбрежие може да се заключи, че проекцията на повърхността разкъсването на разлома е

позиционирана към Адриатическо море. Това се потвърждава и от резултатите от InSAR, които показват издигане по бреговата ивица и липса на потъвания по земната повърхност.

Фокалните механизми на по-силните вторични трусове ($M > 4,5$) имат подобно обратно приплъзване и удар подобен като този на основния трус. Някои от тези по-силни събития (особено по-плитките) също могат да причинят малки повърхностни деформации, дори ако не всички от тях се случват по един и същи разлом. Повърхностните деформации видими в интерферометричните изображения (ИФИ) получени от PCA данните отразяват кумулативния ефект от всички по-силни земетресения, настъпили в региона в периода между 15 ноември - 02 декември 2019 г. и не са в резултат само от основното събитие.



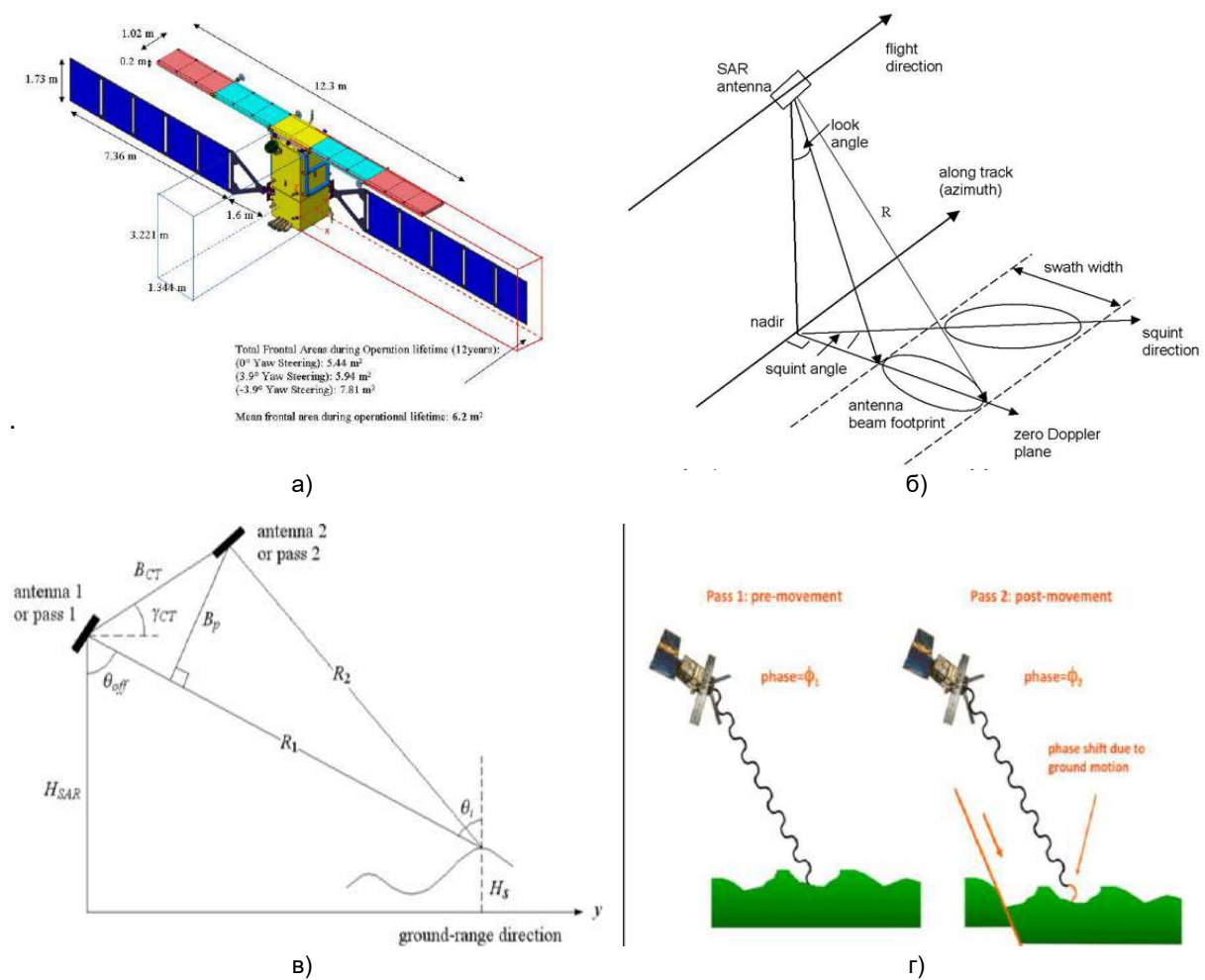
Фигура 3. Основно събитие в близост до гр. Дуръс

Обработка на данни от PCA по метод DInSAR

В рамките на настоящото изследване основен източник на данни за регистриране на резултатите от сеизмичните събития са от PCA апаратура работеща в С обхват (5.4 GHz) разположена на борда на двойката сателити Sentinel-1 (Фигура 4 а). Благодарение на доброто им управление в рамките на зададената им орбити и двата сателита формират тясна орбитална тръба с диаметър 100 m. Това е предпоставка за получаване на такава геометрия на радарния сигнал по време на получаването на данни (Фигура 4 б), която води до намаляване на геометричната декорелация налична в създаваните в процеса на обработка на данните до ИФИ. Регистрирания от приемната антена на радарната апаратура отразен от земната повърхност сигнал е комплексен и съдържа данни както за неговата амплитуда, така и за неговата фаза. Записаните на борда на носителя данни се прехвърлят към наземни станции за предварителна обработка. След като това бъде извършено те се записват в специфичен формат и се предоставят на крайните потребители за последваща тематична обработка посредством специализирани хранилища за данни (напр. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

За получаване на крайните резултати за настоящото изследване беше необходимо за всяко едно от изследваните събития да се осигурят необходимите изходни данни. За тази цел за всяко събитие беше набавен набор от PCA данни от възходящи (посока Ю-С) и низходящи (посока С-Ю) орбити, като по този начин се формираха по минимум две интерферометрични двойки (ИФД). Времевият интервал за всяка 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 получаваха високи стойности за оценената кохерентност (Росса, 1997) на всяка ИФД на още на етапа на тяхното формиране, което бе гаранция за високото качество на получаваните от тях резултати на следващите етапи на обработка.

За да се регистрират земните движения, дължащи се на земетресение е необходимо да се създаде ИФД. Всяка ИФД е резултат от две радарни изображения записани регистрирани в режим Interferometric Wide от различни зрителни ъгли (вж. Фигура 4 в) и записани в Single Look Complex (SLC) формат. В този формат са записани данни както за амплитудата, така и фазата на отразения радарен сигнал. А именно разликата във фазовия сигнал получен от преди и след сеизмичното събитие носи информация за настъпилите премествания по земната повърхност (вж. Фигура 4 г). Необходимо е да се обърне внимание на факта, че тази информация е само за настъпилите премествания по визирната линия на антената, а за получаването на преместванията в хоризонтална и вертикална равнини са необходими ИФД от двата типа орбити, както и прецизни данни за положението на носителя спрямо изследвания район от земната повърхност. Наличието на данни от двата типа орбити също така спомага за и намаляване неблагоприятните ефекти причинени от промени в релефа като например радарна сянка (shadow) или промени в размера на обектите, дължащо се на положението на радара спрямо изследваната част от земната повърхност (layover). След подходяща обработка от ИФД се получават интерферометрични изображения (ИФИ), в които като отделни слоеве са включени амплитудата, фазата и кохерентността на ИФД. Именно кохерентността е мярка за качеството на крайните резултати, съдържащи се крайното ИФИ. (Росса, 1997)



Фигура 4. Схема на сателита Sentinel-1 а), геометрия при получаване на данните б), принципна схема на работа по DInSAR метод и използване на фазовия сигнал за откриване на деформации по земната повърхност

Самата тематична обработка на данните от PCA беше извършена посредством създадения и предоставян за свободно ползване програмен продукт SNAP (SNAP,2020) по утвърдената методика описана в (Braun,2020). В тази методика се включват следните етапи – избор на единична под-сцена от двата изходни набора от данни SLC; прилагане на прецизни ефемеридни файлове; прецизна съвместна регистрация и формиране на интерферограма; премахване на изкривявания на фазовия сигнал, дължащи се на релефа и високочестотна филтрация; извличане на района на изследване; разгъване на фазовия сигнал (unwrap); получаване на преместванията по визирна линия и по вертикала; преминаване към желана

картографска проекция. За да получат вертикалните премествания за всеки един пиксел от ИФИ получени след разгъване на фазовия сигнал беше приложена следната формула:

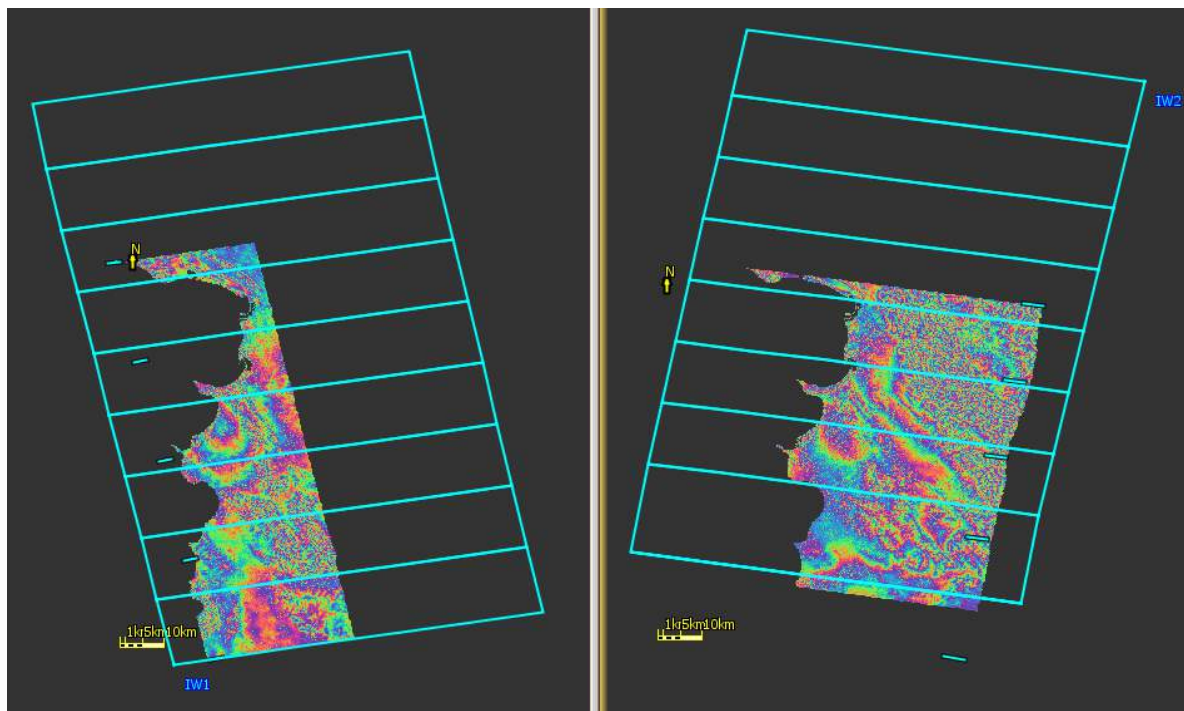
$$\text{vertical displacement} = \frac{\text{unwrapped phase} \times 0.056}{-4 + \pi + \text{rad}(\cos(\text{incidence angle}))} \quad [m] \quad (1)$$

След извършване на описаните процедури за тематична обработка на данните от РСА окончателните резултати бяха записвани и в други файлови формати за последваща визуализация и допълнителни анализи в други програмни продукти.

Важен елемент от тематичната обработка е още в самото нейно начало да се подберат само тези райони от земната повърхност, които са засегнати от конкретното земетресение. Затова от пълния набор изходни данни, състоящ се от 3 под-сцени (общо площта на цялата сцена е ~ 1000 км²) се избира само тази, която включва желанния район и даже е възможно да се изберат само онези ивици, в които попада района (вж. Фигура 5). На същата фигура са илюстрирани и геометрията при получаване на РСА данните за двата типа орбити.

Възможността за създаване на ИФД от двата типа орбити позволи да се направи оценка за наличието на вертикални движения в изследваните райони на всяко едно събитие. Друга предпоставка за това е процеса на създаване на ИФИ от всяка една ИФД на етапа на геометрично съвместяване, както и с оглед елиминиране влиянието на релефа върху крайния резултат, беше използван референтен ЦМТ от SRTM с разделителна способност в хоризонталната равнина 1arcsec (~30m). След това в самите ИФИ бяха локализирани цветово кодирани интерференчни ивици (познати и като *interferometric fringes*), показващи площите, където са протекли деформационните процеси резултат от събитието. При интерпретацията на всяко едно ИФИ се отчита, че една ивица съответства на деформация от 28mm по визирната линия и както се вижда на Фигури 6 а) и г), 7а) и б), 8 а) и г) за областите в близост до епицентъра се наблюдава по-гъста поредица такива ивици.

С цел подобряване на съотношението сигнал/шум (познат като ефект „сол/пипер“ характерен за радарните изображения и проявяващ се като наличие за резки промени в яркостта на ИФИ) след създаване на конкретно ИФИ бе прилаган адаптивен филтър към спектрална плътност на мощността на сигнала, който намалява широкоспектърния шум. Този шум е характерен за данните от РСА, а след прилагане на филтъра пространствената разделителна способност на изображението незначително се влошава. От друга страна този филтър допринася значително за подобряване на резултатите от следващите етапи на обработка, при които от стойностите на регистрирания фазов сигнал след прилагане на процедура за разгъване на фазата се преминава към метрична система.



Фигура 5. Геометрично представяне на единични под-сцени във възходяща (ляво) и низходяща (дясно) орбити и наличието на ивици в тях

Резултати

При изучаването на отделните събития бяха поставени различни цели за изследване като например установяване на качеството на крайните ИФИ, варирайки с параметрите на процедурите прилагани в процеса на тематична обработка на данните от РСА.

Тъй като в тази статия се разглеждат еднотипни събития и при трите за намаляване ефекта на времевата декорелация датите на обработваните РСА данни използвани при интерферометричната обработка бяха избирани по такъв начин, че да удовлетворяват следните изисквания:

- да произхождат от един и същ спътник (в случая Sentinel-1A) – това беше наложено с цел минимизиране на перпендикулярната базова линия между двете преминавания на сателита (вж. Фигура 4 в)), тъй като колкото по-малка е базовата линия, толкова по-добра е корелацията в рамките на единичното ИФИ;

- да бъдат максимално близо до дата на основното събитие (преди и след него) за да се елиминира колкото е възможно повече влиянието на тропосферата върху конкретно ИФИ, което е от особена важност за конкретните събития, тъй като и трите са в близост до големи водни площи;

- да се намали времевата декорелация, причинена от промени в отразения сигнал поради движения или промени на обектите, намиращи се в рамките на единичен пиксел от ИФИ.

При оценка на качеството на отделните ИФИ беше използвано полученото за всяко едно от тях изображение със стойности на кохерентността. Тя представлява статистическа оценка на близостта между двете отделни РСА изображения, от които е създадено ИФИ, в комплексното пространство формирано от регистрирания амплитудни и фазови сигнали отразени от земната повърхност (Росса, 1997).

Друг общ елемент и при трите събития е относителния характер на получаваните резултати относно преместванията. Следва са отчете, че тези премествания са само за периода между двете дати на регистрация на РСА данните.

Земетресение о-в Кос (Гърция)

На Фигура 6 а) и г) са показани получените ИФИ за района за земетресението преди разгъването на фазата, на които се виждат разлики във фазовия сигнал, дължащи се на събитието. 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 достоверната информация за промените по терена за тази част от района би била резултат от интерпретацията на данни от низходящата орбита.

Получените резултати в рамките на обработка на ИФИ и от двата типа орбити са с високо качество, което е потвърдено от високите стойности на кохерентността за изследваните райони от сушата, за които те са над 0.4 (вж. Фигура 6 б) и д)). Те бяха очаквани, тъй като още на етапа на формиране на ИФД кохерентността беше оценена като висока и за двете – 0.96 за възходяща и 0.98 за низходяща орбита.

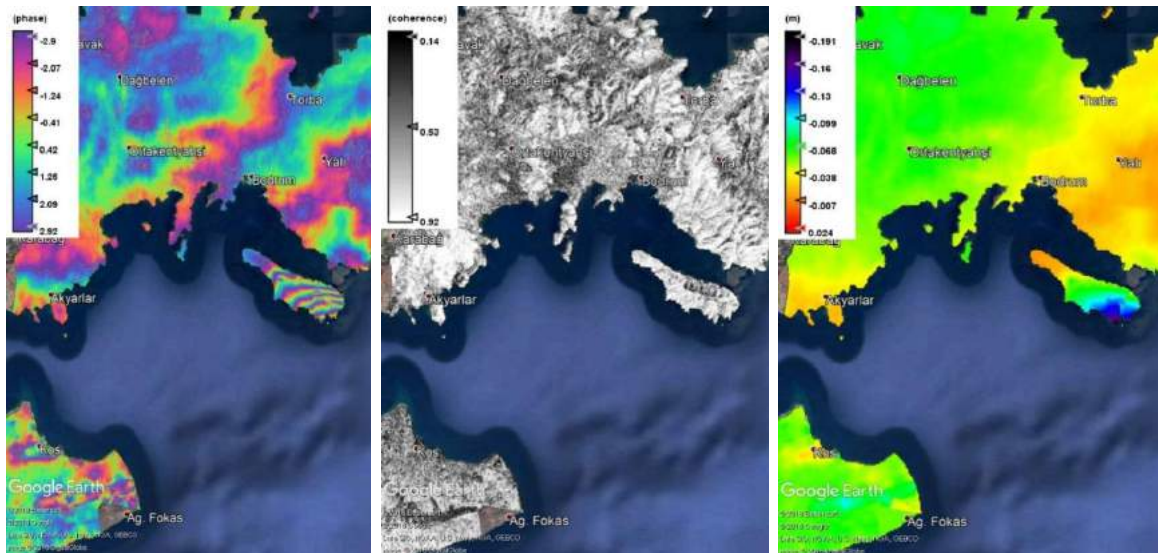
Наличието на интерференчни ивици и в двете изображения (Фигура 6 в) и е)) е доказателство за факта, че регистрираната от РСА промяна във фазата на отразения радарен сигнал се дължи на сеизмичната дейност, а не на атмосферни смущения. На същите фигури за райони около епицентъра на събитието се вижда, че броя интерференчни ивици по остров Караада от възходящата и низходящата орбити е различен съответно 7.5 и 6 ивици. Това е пример за влиянието на различната геометрия при двата типа орбити в момента на получаване на РСА данните т.е. на различния ъгъл, под който е насочена приемната антена за една и съща част от земната повърхност. От резултатите за двата типа орбити е видно, че регистрираните деформации отчетени по визирната линия на РСА са от порядъка на 20см с положителен знак. Оттук може да се направи заключението, че типа на регистрираната по данните от РСА деформация е понижение на терена, което е потвърдено и при теренните проверки (Yalçınara, 2017).

Земетресение о-в Закинтос (Гърция)

При проведеното изследване на това събитие за цел беше поставено да се проучи влиянието на двата типа ефемеридни файлове върху получаваните ИФИ – възстановени и изчислени. Въз основа на тези файлове се определя местоположението на сателитната платформа във времето на регистрацията на данните спрямо референтния елипсоид със съответната точност. Възстановените позволяват обработка на данните от РСА в кратък времеви интервал след тяхното регистриране (този интервал обхваща периода от регистрация до записване в конкретното хранилище за данни), докато изчислените се предоставят след

един по-продължителен период. В този случай е необходимо да се отчете доколко е спешно да се получат крайните резултати от обработката – при необходимост за предоставяне на информация в кратък период след събитието използването на възстановените ефемеридни файлове ще даде добра оценка къде са настъпили премествания на земната повърхност. Докато в случай, че резултатите ще се използват за установяване на движения със стойности от порядък десетки милиметри е наложително при обработката да се използват изчислените ефемеридни файлове. Това е илюстрирано на Фигура 7 а) и б), на които добре е показана разликата при използване на двата типа ефемеридни файлове при създаване на ИФИ и е ясно различима по западните склонове на острова и брега срещу него.

ИФД от дати 12.07-24.07. 2017 възходяща орбита S-1

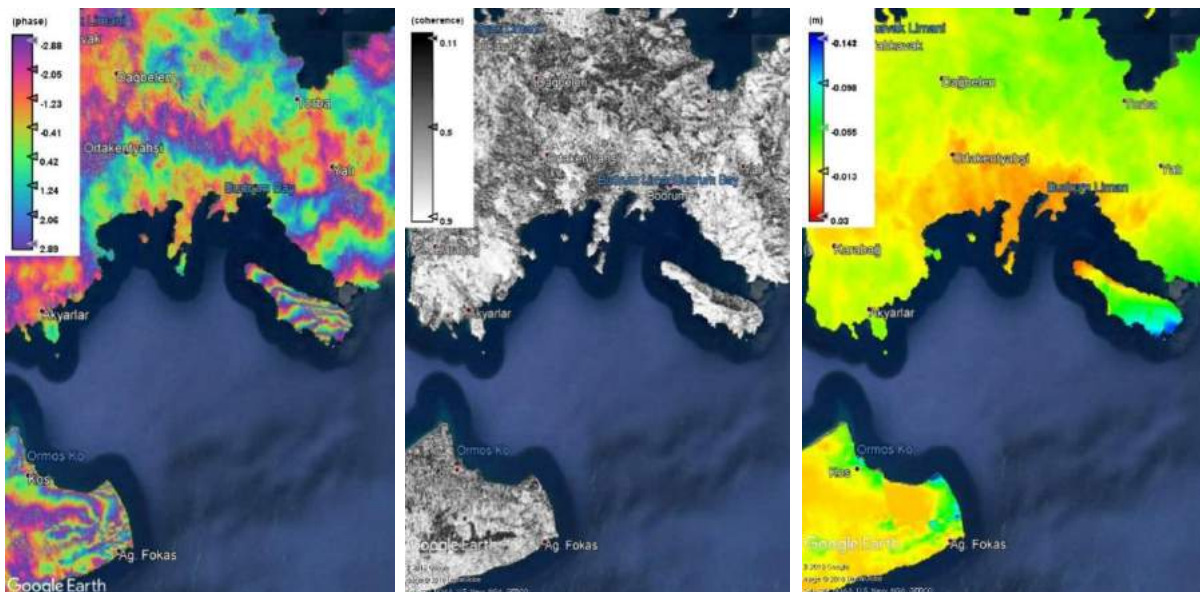


а) ИФИ

б) Изображение на кохерентността за ИФИ

в) ИФИ след разгъване на фазата

ИФД от дати 18.07 - 30.07.2017 от низходяща орбита на S-1

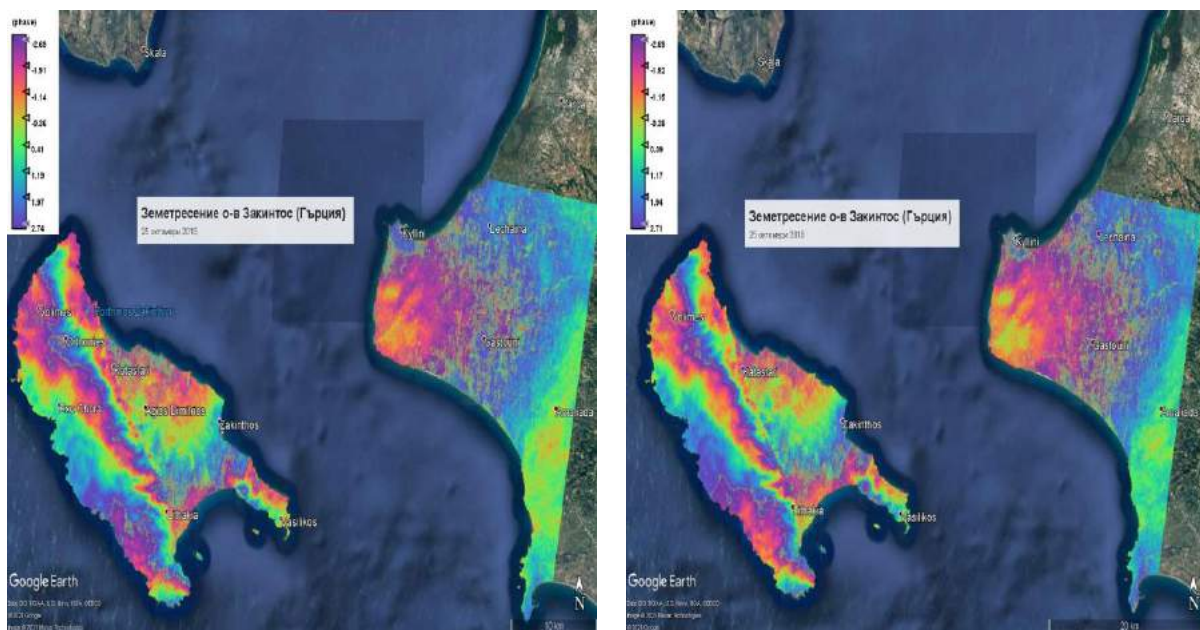


г) ИФИ

д) Изображение на кохерентността за ИФИ

е) ИФИ след разгъване на фазата

Фигура 6. ИФИ от двата типа орбити преди разгъване на фазовия сигнал (а) и г)), кохерентно изображение на ИФИ (б) и д)) и деформации получени след разгъване на фазовия сигнал (в) и е))



а) възстановени ефемеридни файлове

б) изчислени ефемеридни файлове

Фигура 7. Различия в създадено от ИФИ преди разгъване на фазовия сигнал при използване на възстановени и при изчислени ефемеридни файлове

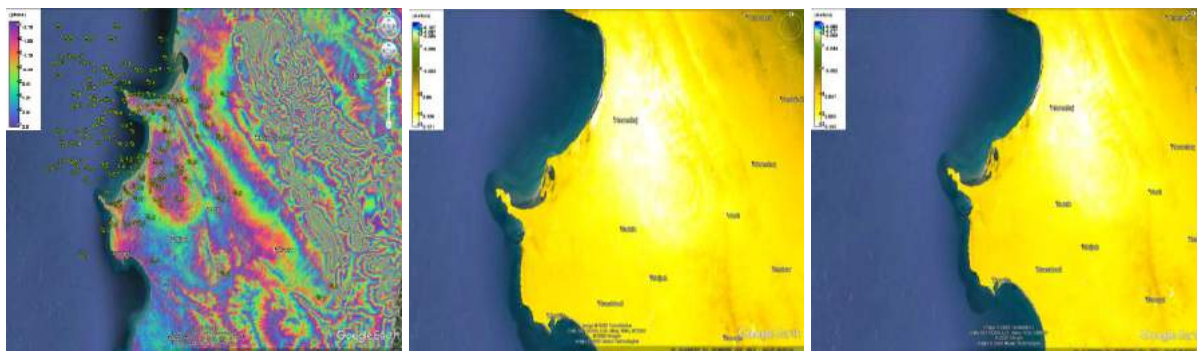
Земетресение в близост до гр. Дуръс (Албания)

Първите получени резултати от обработката на PCA данни за това събитие бяха насочени към най-засегнатите райони съгласно (Newsletter, 2020), а именно по две линии приблизително ориентирани по известен сеизмогенен разлом, около който бяха концентрирани настъпилите земетресения. На Фигура 8 са показани основните резултати получени вследствие на настъпилите събития – интерферометричните ивици получени от обработените фазови сигнали от PCA данни от двете орбити а) и г); деформациите получени след разгъване на фазовия сигнал (б) и д)) и изчислено по формула (1) вертикални движения (в) и е). Показаните ИФИ на фазовия сигнал бяха сравнени в подобни включени в (Newsletter, 2020) и беше установено голямо сходство, факт който потвърди качеството на тези ИФИ. За тях следва да се вземе предвид, че показаните ИФИ предоставят само предварителни информация за относително големи области от земната повърхност, тъй като размерът на пикселите за всяко едно от изображенията е около 14 x 14 m поради тази причина се разглеждат като площен, а не като точков индикатор за деформации. Основание да се твърди, че информацията получена след етап разгъване на фазовия сигнал и за двата типа орбити по отношение на движенията на земната кора е достоверна се базира на факта, че за изследваните области стойностите в слоевете от ИФИ за кохерентността на ИФИ са високи. Това се доказва от процентното съотношение на валидните данни в получените изображения на кохерентностите за районите около град Дуръс, които имат стойности над зададения праг от 0,35 - 74% за възходящата орбита и 70% за низходящата орбита съответно. За този район вертикалните измествания, регистрирани по метода InSAR, са в диапазона $-0,009$ до $0,13$ m, получени от низходящата орбита и в диапазона $-0,036$ до $0,074$ m от възходящата орбита. Различията в стойностите на получените резултати най-вероятно се дължат на геометрията на наблюдение използвана от PCA и по-точно стойностите на ъгъла на регистриране на всеки един елемент от земната повърхност. Както е показано на Фигура 5 за да се получат данни за изследвания район на събитието от двете орбити, са обработени различни под-сцени, което означава, че стойностите на ъгъла на регистриране на отразения радарен сигнал се различават за типа орбита, което води до такива несъответствия между стойностите на вертикални измествания.

В процеса на интерпретация на получаваните резултати въз основа на фазовия сигнал трябва да се отчете и влиянието на терена към нейната промяна. На Фигура 8 а) и г) се вижда, че има големи области, в които фазата се променя в рамките на малки разстояния. Този ефект е добре илюстриран на Фигура 9, където профилът направен по жълтата линия в ИФИ показва, че теренът е силно пресечен и е възможно данните регистрирани от PCA за него да се дължат на неблагоприятни ефекти, дължащи се на радарна сянка. Именно този ефект видим във фазовото изображение може лесно да се тълкува погрешно като големи премествания по

земната повърхност в резултат на земетресението, но в конкретния случай това по-скоро се дължи на силно пресечения терен.

ИФД от дати 01.12. – 19.11.2020 низходяща орбита 153

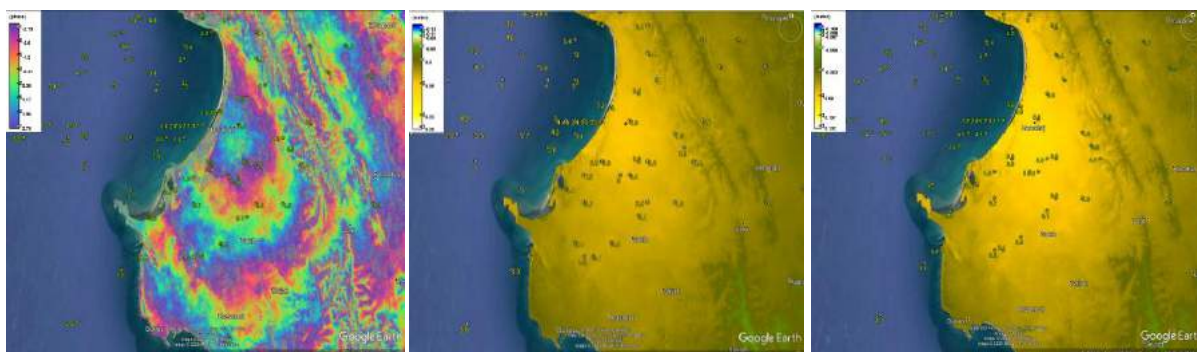


а)

б)

в)

ИФД от дати 02.12 – 19.11.2020 възходяща орбита 175

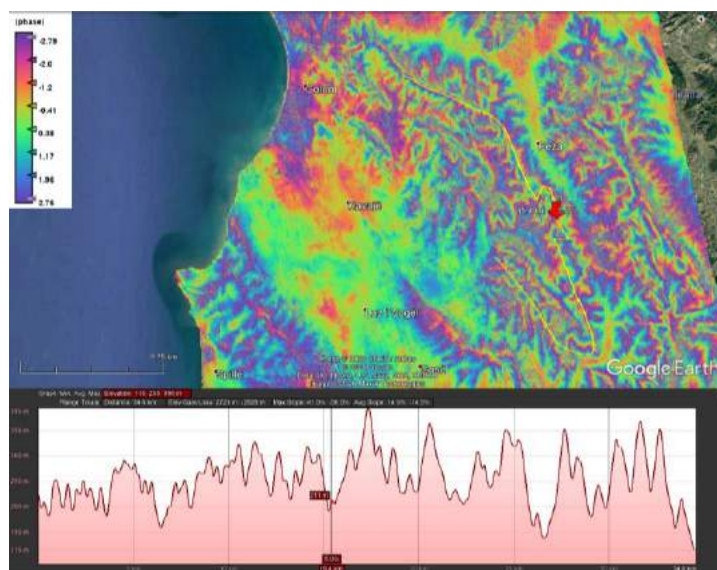


г)

д)

е)

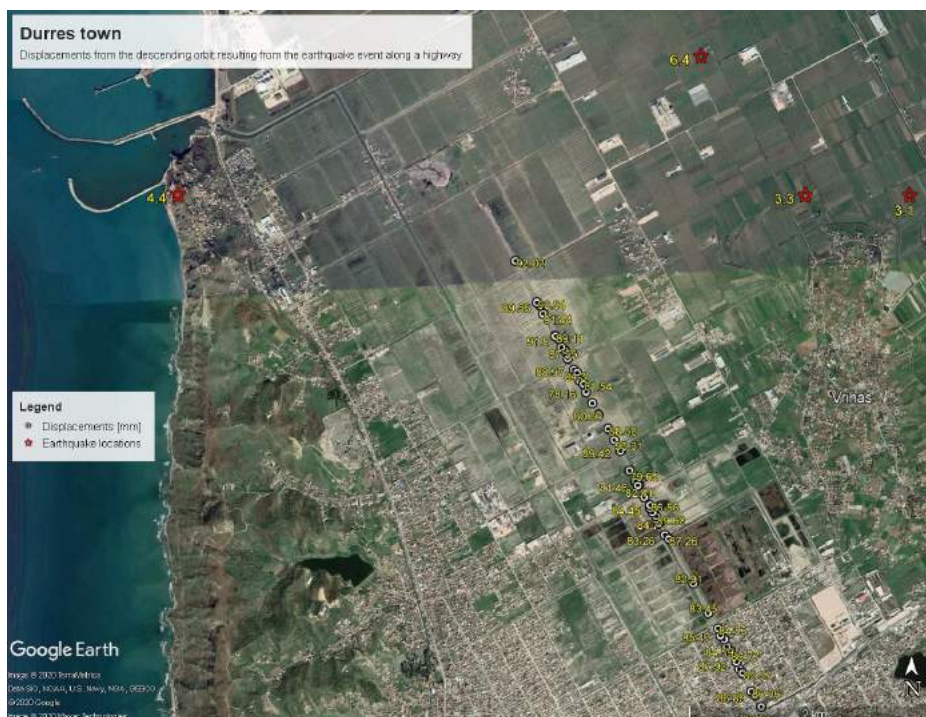
Фигура 8. ИФИ от двата типа орбити – преди разгъване на фазовия сигнал (а) и г)); деформации получени след разгъване на фазовия сигнал (б) и д)) и изчислено по формула (1) вертикални движения (в) и е)



Фигура 9. Вариации на фазовия сигнал в ИФИ, дължащи се на релефа

Както е посочено в (Newsletter, 2020) сеизмогенните разломи, намиращи се в изследваната зона, имат приблизителна ориентация СЗ-ЮЕ. Основавайки се на този факт авторите решиха

да проучат деформациите, получени в ИФИ по протежение на магистрала близо до град Дуръс, която следва приблизително същата посока като тази на разлома. Този инфраструктурен обект е избран, тъй като и за двете орбити в него се очакват високи стойности на кохерентността, което от своя страна прави стойностите за изчислените вертикални премествания в ИФИ надеждни. За да се извлече само необходимата информация от около 100 точки, разположени на споменатата магистрала, само за тези, които имат кохерентност и за двете орбити над 0,3, бяха приети за използване. За тези точки бяха установени минимални и максимални стойности за двете орбити, които се оказаха доста различни - $\min_{asc} = 0,02 \text{ m}$ / $\max_{asc} = 0,033 \text{ m}$ и $\min_{desc} = 0,078 \text{ m}$ / $\max_{desc} = 0,092 \text{ m}$. Поради тази причина за да се установят реалните стойности на преместванията за тази зона са необходими измервания на място. На Фигура 10 са показани стойностите на вертикалните премествания, изчислени от фазовия сигнал след неговото разгъване от низходящата орбита. За изместванията в LOS резултатите следват същата тенденция - $\min_{asc} = 0,016 \text{ m}$ / $\max_{asc} = 0,029 \text{ m}$ и $\min_{desc} = 0,056 \text{ m}$ / $\max_{desc} = 0,071 \text{ m}$. Това още веднъж потвърждава твърдението, че резултатите от обработката по метод DInSAR не могат да се получат точни стойности за преместванията по земната повърхност сравними с резултати от теренни GNSS измервания, а по-скоро дават приблизителна оценка къде са настъпили такива премествания



Фигура 10. Стойности на вертикалните премествания регистрирани в ИФИ от низходящата орбита

Закljučения

В тази статия бяха представени резултатите получени от обработката на данни от PCA по метод DInSAR насочени към определяне стойностите на настъпилите в резултат на три силни, плиткки земетресени премествания на земната повърхност. Качеството на получаваните резултати в интерферометричните фазови канали на ИФИ от възходяща и низходяща орбита са с качество съпоставимо с получаваното от други научни екипи. Тук са докладвани и резултатите за изчислените премествания след разгъване на фазовия сигнал, който съвпада с констатираните от геолозите разломи. За да се увеличи достоверността на получената информация за ограничен набор от точки, при които кохерентността и за двете орбити е над 0,3, настъпилите земни премествания бяха определени като потъване. Всички получени резултати са в добро съгласие с регионалната тектоника и биха могли допринасят за по-доброто разбиране на механизма на изследваните събития и биха могли да се използват от компетентните органи при изготвяне на планове за преодоляване на последствията от такъв тип природни бедствия.

Благодарности

Тези изследвания са реализирани с подкрепата на проект "Национален геоинформационен център (NGIC)", финансиран от Националната пътна карта за научна инфраструктура 2017-2023 г. и по проект с Ф"НИ" № ДН14/1 от 11.12.2017г.

Литература:

1. Braun, A., Veci, L., "TOPS Interferometry Tutorial.", Array Systems. Available online:http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf EMSC 2020, <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/?filter=yes>
2. Ganas, A., P. Briole, G. Bozionelos, A. Barberopoulou, P. Elias, V. Tsironi, S. Valkaniotis, A. Moshou, I. Mintourakis, The 25 October 2018 Mw = 6.7 Zakynthos earthquake (Ionian Sea, Greece): A low-angle fault model based on GNSS data, relocated seismicity, small tsunami and implications for the seismic hazard in the west Hellenic Arc, *Journal of Geodynamics*, 137, 2020
3. Motagh, M., Schurr B., Anderssohn J., Cailleau B., Walter T. R., Wang R., Villotte J.-P., "Subduction earthquake deformation associated with 14 November 2007, mw 7.8 Tocopilla earthquake in Chile: results from InSAR and aftershocks," *Tectonophysics*, 490, 60–68 (2010)
4. Rocca, F., C.Prati, A.Ferretti, An Overview of SAR Interferometry, 3rd ERS Symposium, Florence, 1997
5. Roland, B., Ayhan M. E., Fielding E. J., Wright T. J., McClusky S., Aktug B., Demir C., Lenk O., Türkezer A, "Deformation during the 12 November 1999 Düzce, Turkey, Earthquake, from GPS and InSAR Data, *Bulletin of the Seismological Society of America* ; 92 (1): 161–171. SNAP 2020, <https://step.esa.int/main/>
6. 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>
7. Newsletter of Environmental, Disaster, and Crisis Management Strategies, Nov 2019, issue 15, ISSN 2653-9454, (accessed Feb 2020 https://www.emscsem.org/Files/news/Earthquakes_reports/Newsletter_15_2019_Albania_EQ.pdf)