https://doi.org/10.48368/bgs-2021.1.N2

Assessment of the ground displacements in urban and industrial areas using DInSAR time series

Hristo Nikolov[1], Mila Atanasova [2]

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

Keywords: ground deformations, DinSAR, time series, technogenic activities

Abstract
The terrain deformations in urban and industrial areas pose serious risk to human lives and cause significant economic losses. One modern method to register them is to use information produced by processing data acquired by satellite borne synthetic aperture radar (SAR). In order to produce this information large time series of SAR data processed by DInSAR method should be available. Thanks to the open data policy of ESA from continuous and regular SAR data acquisitions it was made possible to assess the ongoing surface displacements in the region of the town of Pernik, Bulgaria. In this region a large number of mining and industrial plants are located mainly dealing with coal and steel production and processing serviced by a railways and highways. Also the density of the population in the area is high and for this reason to have large residential and utility areas as well. All mentioned industrial, infrastructural and urban sites could be heavily affected by slow ground movements in case those are not properly and timely monitored. This is the reason the authors created short time series with information produced from ascending and descending orbits of Sentinel-1 mission to assess the ongoing geodynamic processes in this region. Those results could be used by the local authorities to prepare plans for mitigation of those unfavourable impacts.

Оценка на земните премествания в урбанизирани и промишлени райони посредством DInSAR времева серия

Христо Николов[1], Мила Атанасова[2]

[1] Институт за космически изследвания и технологии; ул. "Акад. Георги Бончев" бл. 1, София 1113; e-mail: hristo@stil.bas.bg
[2] Национален институт по геофизика, геодезия и география; Българска академия на науките, София 1113, ул. "Акад. Георги Бончев" бл. 3, София 1113, България; e-mail: mila_at_zl@abv.bg

Ключови думи: деформации на земната кора, DinSAR, времева серия, техногенни дейности

Резюме
Текст на резюмето до половин страница.
Деформациите на терена в градски и индустриални зони представляват сериозен риск за човешкия живот и причиняват значителни икономически загуби. Един съвременен метод за тяхното регистриране е използването на информация, получена чрез обработка на данни получени от сателитенобазирани радари със синтезирана апертура (РСА). За да се получи тази информация е необходимо да са има големи времеви редове от тези данни, обработени по метод DInSAR. Благодарение на политиката за отворени данни на ESA от непрекъснато и регулярно регистриране на данни от РСА стана възможно да се направят оценки на текущите премествания на земната повърхност в района на град Перник. В този регион са разположени голям брой минни и промишлени предприятия, занимаващи се главно с производство и преработка на въглища и стомана, които са обслужвани от железопътни линии и магистрали. Също така плътността на населението в района е висока и поради тази причина там има и големи жилищни площи и обслужващата ги инфраструктура. Всички споменати промишлени, инфраструктурни и градски обекти могат да бъдат силно засегнати от бавни движения на земната кора, ако те не са правилно проследени във времето. Това е причината авторите да създадат кратки времеви редове с информация за тях получена от възходящи и низходящи орбити на мисията Sentinel-1 за да оценят протичащите геодинамични процеси в този регион. Тези резултати могат да бъдат използвани от местните власти за изготвяне на планове за смекчаване на тези неблагоприятни въздействия.

Въведение

Пернишката котловина се намира в централната част на Западна България, която представлява негативна котловинна депресия с младопалеогенска възраст и се разглежда като отделна тектонска единица, характеризираща се със сложен тектонски строеж, който е резултат от многобройни тектонски фази и отличаваща се рязко от съседните котловини. Тя е разположена между планините Люлин и Витоша на североизток и изток, Голо бърдо на юг – югоизток и ниския Усоишки рид в западна поска, а на север-северозапад котловината достига до малката котловина до с. Мещица. При тези граници площта ѝ е около 200 km^2. (Власков, 2015) В исторически план в този район техногенните изменения в ландшафта започват с началото експлоатацията на въгледобивни мини в края на 19-ти век, а впоследствие и на мини доставящи варовик, който се използвал за производство на цимент и вар (вж. Фигура 1). Това е и причината да има достатъчно данни за геоложкия строеж на котловината, който включва слабоустойчиви, силно податливи на ерозия приабонски мергели, конгломерати, пясъчници и нечисти въглищни прослойки. При активната експлоатация на въглищните запаси са засегнати общо 49 km^2 като от тях около 20 km^2 са подземни.



Фигура 1. Местоположение на минните изработки разработвани по подземен и открит способ. (по Карта на рудниците)

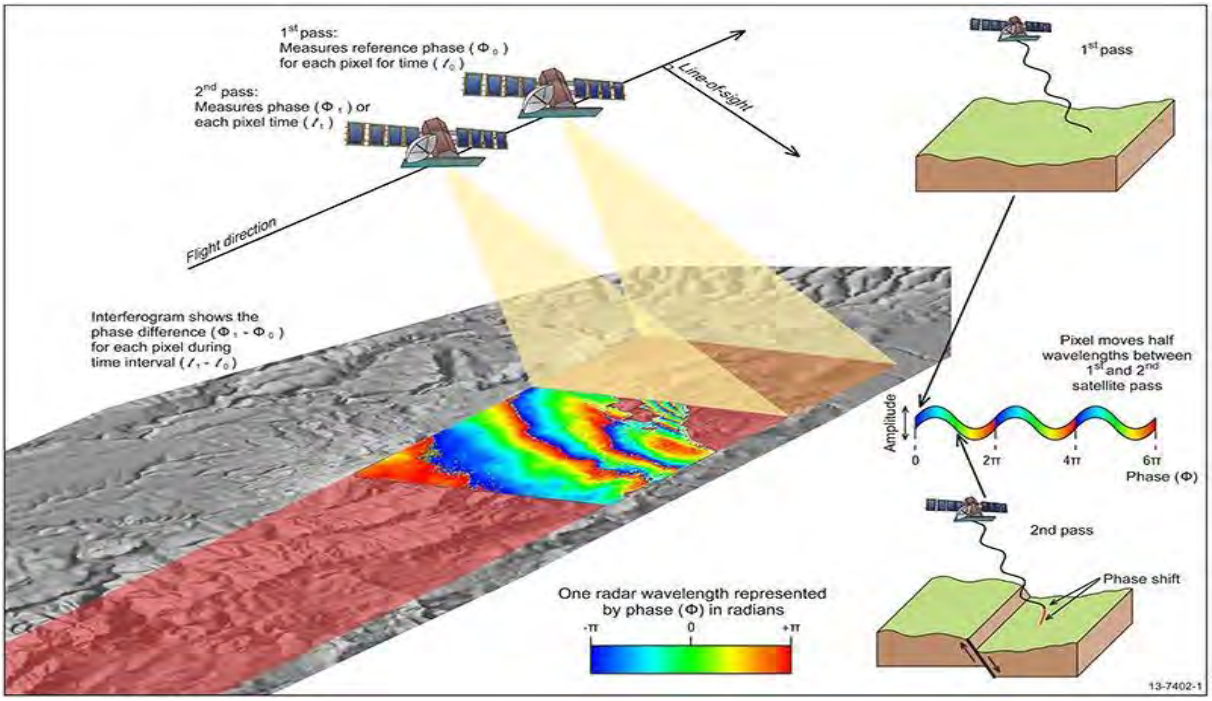
Споменатите в преходния абзац човешки дейности, както и геоложкия строеж на района, са в основата на протичащи в момента неблагоприятни геодинамични процеси, дължащи се на прекратяване на експлоатацията на използвани в миналото подземни минни изработки без те да бъдат консервирани по начин възпрепятстване на споменатите процеси и дори е преустановено и тяхното отводняване. Като последствие от тях в града се наблюдават множество пропадания на улични платна, жилищни сгради и други обекти от градската инфраструктура. Проблемът става още по-

осезаем и сериозен, защото изоставените минни изработки се запълват с вода, която допринася за появата на слягания и пропадания.
В момента се извършат проучвания и анализи с цел да бъдат предложат проектни решения за развитието на пространствена геодезическа мрежа за наблюдение на движенията и деформациите на земната повърхност и минната маса с обекти с цел организиране на специализиран мониторинг като превантивна мярка с цел опазване на обекти и съоръжения от вредното влияние на миннодобивните работи и последиците от спирането на тяхната експлоатация в района на Пернишката котловина за район с обща площ 175.7 ha. Позициите на геодезическите марки се определят въз основа на съществуващата информация от равнините на известните подземни галерии и кадастралната карта на града. Геодезическата мрежа включва около 362 комбинирани земни маркери, 708 контролирани стенни репери и 27 дълбочини изравнителни еталони. (Kaltchev, 2019).
От казаното по-горе става ясно, че съществува реален проблем за нормалното функциониране на градската и индустриална инфраструктура в града и най-вече заплаха за живота на населението. Предприетите до момента мерки осигуряват наблюдения само на една сравнително малка част от засегнатите територии и в повечето случаи след настъпване на неблагоприятно събитие. Очевидна е нуждата от осигуряване на продължителен мониторинг на споменатите негативни геодинамични процеси и то за площи с размери доста по-големи от текущо изследваните. Затова в тази статия е предложен метод, който би осигурил регулярния мониторинг за територията на гр. Перник и неговите околности, позволяващ оценка на протичащите деформации. Резултатите от подобен мониторинг в този район биха могли да намерят приложение и при проследяване на деформации, дължащи се на естествени геоложки опасности като например земетресения и свлачища.

Метод DInSAR

Методът DInSAR е подходящ за измерване на пространствения обхват и степента на повърхностни деформации, свързани с природните опасности (земетресения, вулкани, свлачища, тектонски движения). Често е получаваните по този метод данни са икономически по-изгодни от измерването в отделни точки посредством трудоемки теренни проучвания чрез нивелиране и използване на глобалната навигационна спътникова система (GNSS). Освен това той може да осигури данни милиони точки от данни в регион около 10 000 km^2. Чрез идентифициране на специфични области на деформация в по-широки области от интерес интерферометричните изображения от DInSAR могат да се използват и за позициониране на специализирани уреди (като екстензометри, локални GNSS мрежи и нивелачни линии), предназначени за прецизно измерване и наблюдение на деформацията на повърхността в ограничени зони, в точки за които е установено, че протичат деформационни процеси.
Предимство предлагано от метода DInSAR, е възможността да се регистрират промени на земната повърхност в рамките на големи (над 50 km^2) или труднодостъпни (с наклони над 30^o) площи от земната повърхност, като по този начин се доставя повече информация отколкото чрез получаване при преки теренни измервания. Това не означава, че този метод може напълно да замести измерванията във вече определени точки, а по-скоро да предостави количествени данни относно движенията на повърхността за по-големи площи в изследваната област. Една особеност на метода е, че той е относителен във времето (т.е. резултатите са валидни само за периода, в който са получени данните) и относителен спрямо конкретна точка, намираща се в района и за която са известни параметрите за деформациите в нея.
Методът на диференциална интерферометрия на РСА (DInSAR) се основава на обработката на две РСА изображения регистрирани върху на една и съща част от повърхността на Земята получени в различни от моменти време (вж. Фигура 2). При метода на диференциалната интерферометрия с повторно преминаване на носителя откриването и количественото определяне на земните премествания настъпили между двете дати на получаване на данните може да се постигне чрез тяхната съвместна обработка. В резултат на тази обработка се получава изображение наречено диференциална интерферограма (растерно интерферометрично изображение), от което след допълнителни изчисления е възможно да бъдат определени земните премествания в хоризонтална и вертикална равнини, които са настъпили между регистрирането на данните със сантиметрова точност (Massonnet and Feigl, 1998) и пространствена разделителна способност (ПРС), която варира в

зависимост от режима на работа на РСА[1]. Изместването се изчислява чрез диференциране на фазовия компонент на двете основни SAR изображения след премахване на ефекти, дължащи се на топографията на изследвания район.
За изследване на дефомационни процеси са необходими РСА изображения (Single Look Complex product type), които представляват масив от комплексни стойности, включващи информация за амплитудата и фазовото изместване на обратно разсеяния от земната повърхност радарен сигнал. Фазовото изместване от единично РСА изображение само по себе си не предоставя никаква полезна информация. Разликата във фазовите сигнали или интерферограмата между две регистрации на РСА данни със съвместими геометрии обаче съдържа информация за топографията на повърхността и възможните измествания на земната повърхност по визирната линия на радара (LOS) към земната повърхност. По-конкретно, DInSAR е метод прилаган за получаване на повърхностни деформации чрез елиминиране влиянието на терена. Множество други фактори, като например геометрична декорелация, времева декорелация, неточна информация за орбитата, атмосферни смущения, шум от сензора и други допринасят за формиране на разлики във фазовия сигнал, но те не предоставят полезна информация при регистриране на деформации и затова тяхното влияние трябва да бъде премахнато или поне намалено.



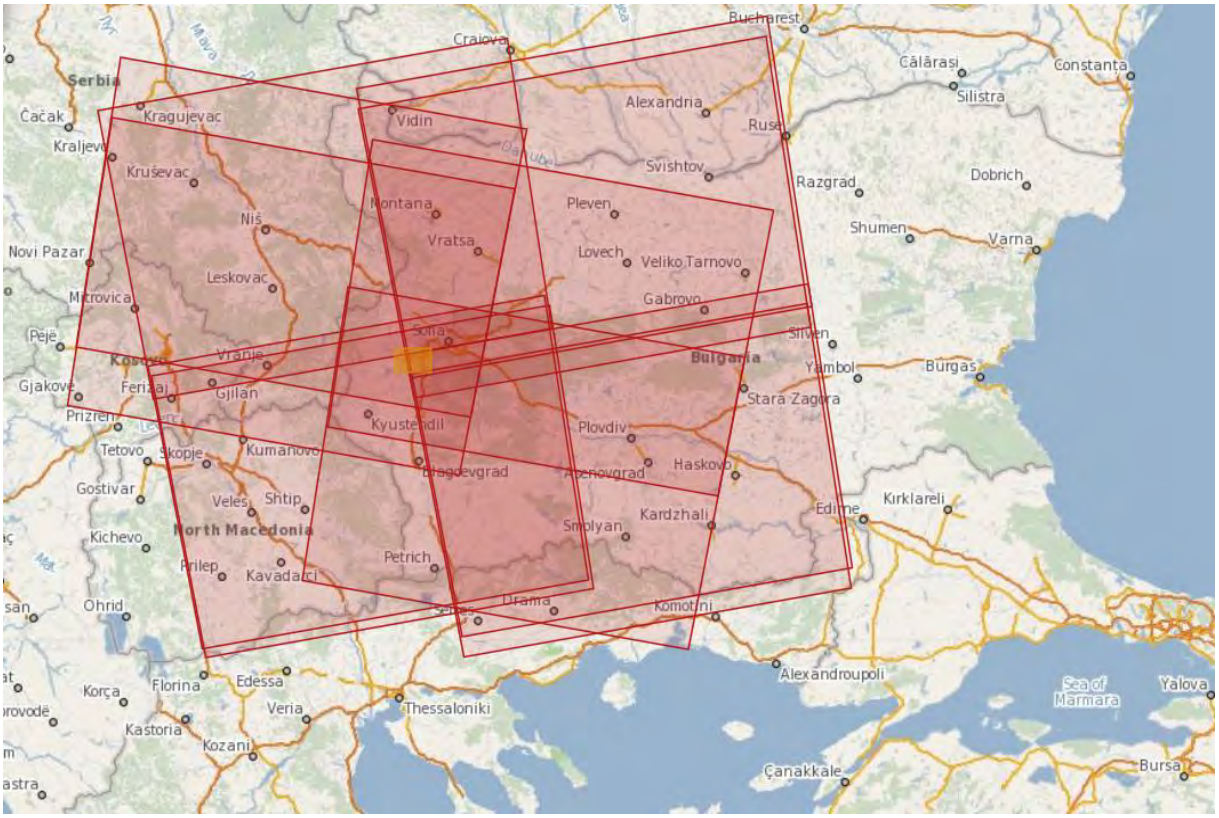
Фигура 2 Интерферограма, създадена чрез използване на две РСА изображения ()

Използвани данни

Основен източник на обработваните в рамките на това изследване данни от РСА са данни от Sentinel-1 под формата на изображения на амплитудния и фазовия сигнали, които заедно с метаданните към тях формират конкретен продукт (за изследване на деформационни процеси форматът трябва да включва и както амплитудния, така и фазовия сигнали). Резултатите се получават, прилагайки метод на диферренциалната радарна интерферометрия (DInSAR). При него важен елемент е да се отчете влиянието на релефа във фазовия сигнал и то се елиминира с помощта на външен цифров модел на релефа (ЦМР). След тази обработка останалите промени в интерферограмата може да се отдадат основно на настъпили промени по земната повърхност, които са регистрирани между двете дати на регистриране на изображенията, както и на нежелани атмосферни ефекти.

[1] За Sentinel-1 основния режим е с ПРС 15x15 m, а ПРС при други напр. TerraSAR-X може да бъде 1x1 m.

Използваните PCA данни са регистрирани от констелацията, състояща се от два сателита (A и B) на мисията Sentinel-1, които са свободно разпространявани чрез хранилища на данни поддържани от ESA. Всеки един от сателитите има време повторно преминаване от 12 дни, което означава, че една и съща част от земната повърхност се регистрира на всеки 6 дни от един от двата сателита . Основната апаратура на всеки един от двата сателита е радар в С-диапазона (съответстващ на дължина на вълната от 5.56 см) с дясно ориентирана визирна линия (LOS) независимо от посоката на орбитата му. За прилагане на интерферометрична обработка трябва да се използват данни във формат SLC, получени в IW режим, тъй като при него се получава не само амплитудата на отразения от земната повърхност сигнал, но и неговата фаза. Фазовият сигнал е от решаващо значение, тъй като след подходяща тематична обработка той предоставя информация за промените в разстоянието между наблюдаваните обекти от земната повърхност и двата сателита в момента на тяхното преминаване.
Преместванията се определят количествено по посоката на визирната линия (Line of sight-LOS) на PCA апаратурата определена от положението на сателита; В регистрирания вектор по LOS са включени както хоризонталните така и вертикалните измествания. За количествено определяне на сляганeто се приема, че доминира вертикалното движение /потъването/ и измерените измествания по LoS се проектират вертикално. Тъй като използваните данни от конкретната PCA апаратура винаги получава данни отдясно по посока на движение на сателита се формират се т.нар. радарни сенки, където визирният лъч недостига. Например при издигната форма на релефа при възходяща орбита ще се получат данни за южните, западните и северните склонове, но източните ще са в зоната на радарна сянка, аналогично при низходящите орбити се получава информация за северни източни и южни склонове, но западните остават незаснети. Това е една от причините за получаване на окончателните резултати и техния анализ да задължително да бъдат използвани PCA данни регистрирани и от двата типа орбити.



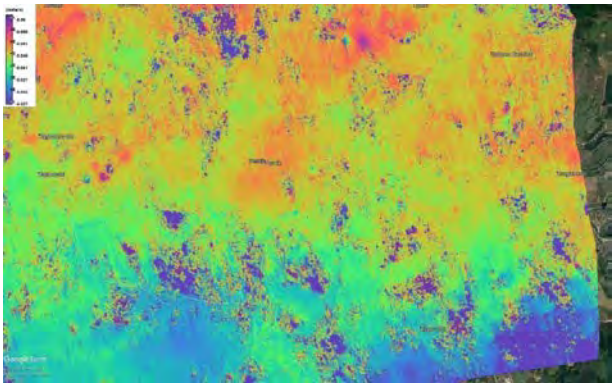
Фигура 3 Сцени с данни от PCA на Sentinel-1 от възходящи и низходящи орбити, осигуряващи покритие на изследвания район.

Резултати

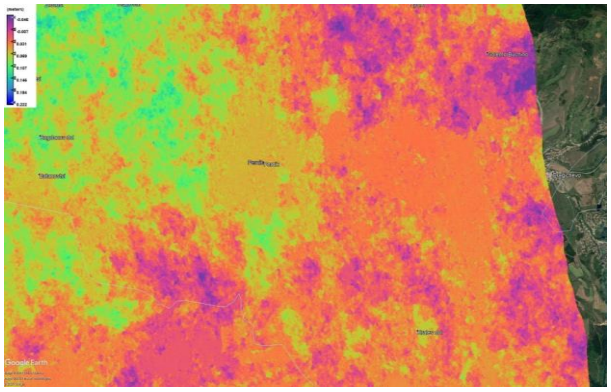
На Фигура 4 б-г по-долу са показани извадки от обработените по изложената методика PCA данни от орбита с номер 102 и получените от тях премествания, включващи района около гр. Перник за показаните под всяка една фигура периоди.



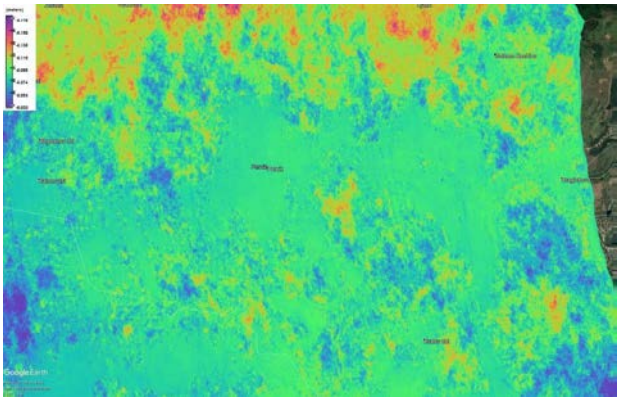
Района в на гр. Перник GoogleEarth
а



03Oct2018_02Nov2018 – възходяща
б



03Oct2018_02Dec2018 – възходяща
в



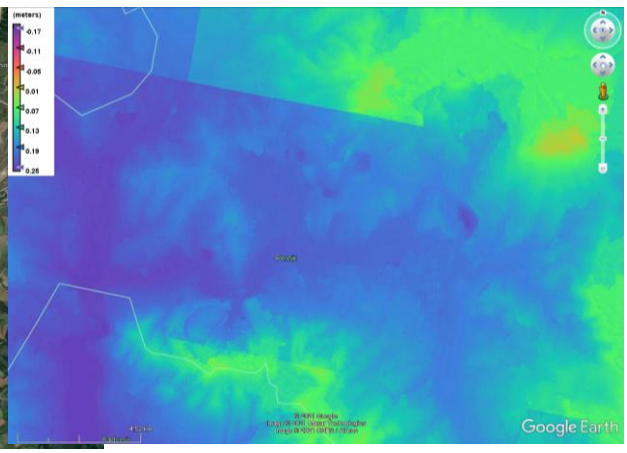
03Oct2018_01Apr2019 – възходяща
г

Фигура 4 Растерен слой с регистрираните деформации от възходяща орбита 102.

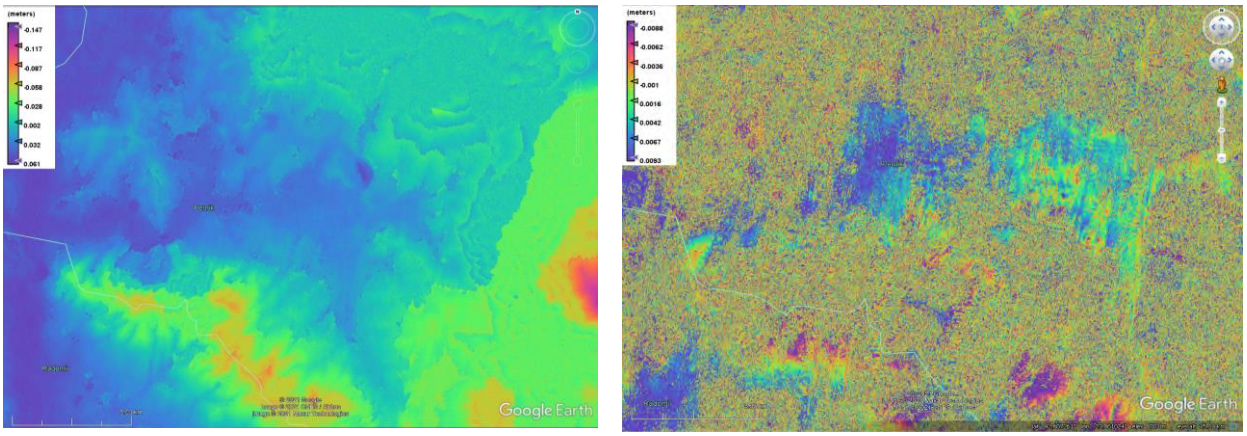
За същия район но за по-кратък времеви период са изчислени по данни от низходяща орбита 80 за същия район настъпилите деформации по земната повърхност (вж. фигура 5 б-г по-долу). В този случай не се регистрират големи премествания, тъй като няма данни за настъпили събития, които биха могли да предизвикат по-значителни движения на повърхността.



Района на гр. Перник в GoogleEarth
а



02Oct2018_08Oct2018 – низходяща
б



02Oct2018_14Oct2018 –низходяща
в

02Oct2018_13Dec2018 –низходяща
г

Фигура 5 Растерен слой с регистрираните деформации от низходяща орбита 80.

Заключение

От показаните резултати се вижда, че приложения метод предоставя надеждна информация за настъпилите премествания на терена с висока степен на повтаряемост. Последното се доказва от сходните резултати на фигури 4-в и 5-г, като различията се дължат на положението на сателита в момента на получаване на данните, което води до различен ъгъл на визирната линия към терена. Важно е да се отбележи, че формирането на голяма времева поредица от интерферометрични изображения предполага използване на минимум 30 изображения за всяка една орбита и в последствие тяхното съвместяване и анализиране, което бе извън обхвата на настоящото изследване поради липса на достатъчен изчислителен ресурс. Независимо от това получените и представени резултати нееднозначно доказват предимството на използвания метод, като най-вече следва да се отбележи факта, че е възможно получаване на резултати за площи, чието изследване по геодезически методи са времеемки и изискват сериозен финансов ресурс.

Литература

Interferometric Synthetic Aperture Radar, http://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/geodetic-techniques/interferometric-synthetic-aperture-radar , (accessed май 2021)

Kaltchev I., Kaltcheva M. “Geodetic monitoring of displacements and deformations for assestment of effect from suspend of exploitation of Pernik mines”, Proceedings of XXIX International symposium on “modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields, pp. 68-84, 2019,

Massonnet D., K. Feigl “Radar interferometry and its application to changes in the earth’s surface”, Rev. Geophys., 36 (4) (1998), pp. 441-500,

Власков В. “Урбанизационни изменения на релефа в пернишката котловина“, Трета международна конференция „Географски науки и образование“, 2013

Карта на рудниците, https://pernik.noit.eu/minesmap.php, (accessed май 2021)