

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ  
НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА,  
ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОГРАФИЯ  
Департамент Геодезия

Мила Стоянова Атанасова-Златарева

**Приложение на SAR технологията за изследване на  
геодинамични процеси в България и Балканския  
полуостров**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертация за присъждане на научната степен “доктор на  
науките”

професионално направление  
5.7. Архитектура, строителство и геодезия

научна специалност  
Обща, висша и приложна геодезия

София 2024г.

Защитата на дисертацията ще се състои на ..... от..... часа, в зала 101 на НИГТГ-БАН, блок 3

### **Научно жури:**

Външни членове:

1. проф. д-р Пламен Богданов Малджански – УАСГ;
2. проф. д-р Петър Тодоров Пенев – УАСГ;
3. проф. д-р Мария Цанкова Асенова – ЛТУ;
4. доц. д-р Радка Георгиева Колева – ЛТУ;
5. проф. д-р Деница Стефанова Борисова – ИКИТ-БАН;  
доц. д-р Борислав Емилов Александров – УАСГ – резервен член.

Вътрешни членове:

1. чл.-кор. Димчо Енчев Солаков;
2. проф. д-р Георги Железов Георгиев;  
доц. д-р Стела Димитрова Симеонова – резервен член.

Номерацията на формулите и фигурите в автореферата съответстват на номерацията им в дисертационния труд.

В списъка с литература са поместени само заглавията, които са цитирани в автореферата.

## 1.1. Увод

Един от важните проблеми, пред които са изправени науките за Земята, е количественото описание и динамиката на движението на земната повърхност. Основното изискване при решаването на този фундаментален проблем е точното определяне на настъпилите премествания и деформации на земната повърхност, породени от различни геодинамични процеси от естествен или антропогенен характер.

Космическата геодезия дава възможност за бързо и надеждно количествено определяне на параметрите на съвременните геодинамични движения.

Един доказан метод за непрекъснат мониторинг на земните деформации е използването на данни от активно радарно дистанционно наблюдение. Тези SAR данни са основата за създаване на интерферометрични изображения (ИФИ) за количествено определяне на регистрираните движения на земната повърхност в рамките на фиксиран интервал от време.

Диференциалната интерферометрия за обработка на SAR данни (DInSAR), получени от дистанционни наблюдения на Земята е метод, който може да се използва за количествено определяне на малки премествания на повърхността.

Европейската космическа агенция (EKA, ESA – European Space Agency) отдавна подкрепя различни спътникови мисии за наблюдение на Земята със сензори за SAR данни на борда на сателитни мисии, като европейските спътници за дистанционно наблюдение (ERS-1 и ERS-2) и ESA EnvironmentalSatellite (ENVISAT) и продължава тази дългосрочна политика за предоставяне на непрекъснати и последователни данни от наблюдения. През 2014 г. Sentinel-1A беше успешно изстрелян, последван от неговия спътник-близък Sentinel-1B, изстрелян през 2016 г. Двата спътника са оборудвани с радарен сензор от C-Band. Краят на мисията на спътника Sentinel-1B е обявен през юли 2022 г.. Copernicus Sentinel-1A остава напълно работещ.

Използвайки данни от сателитите Sentinel 1, поддржани от Европейска космическа агенция и прилагайки InSAR се извършва картографиране на повърхността на големи площи, както и регистриране на премествания по земната кора. В основата на метода InSAR е използването на две изображения на отразения от земната повърхност фазов сигнал, получени за един и същ регион по различно време и възможността за 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 настъпилите премествания въз основа на промяната във фазовия сигнал.

Последните постижения в спътниковите технологии, статистическите и математическите модели и изчислителните ресурси проправиха пътя за оперативно използване на сателитите данни при мониторинг и прогнозиране на природни бедствия. Авторът представя преглед на използването на сателитни данни за наблюдение на Земята в контекста на превантивен мониторинг на геодинамични процеси и оценка на гео-опасности при бедствия. Описани са използваните техники за извличане на информация за настъпили премествания на земната повърхност от изображения, придобити от сателитно базирани радарни сензори. Приложимостта на такива данни за изследване на природни опасности като свлачища, земетресения, вулканична дейност и слягане на земята са широко използвани в съвременната геонаука в Европа и в света, но за съжаление използването им в България изостава с близо 10 годишно закъснение.

## 1.2. Актуалност на проблема

Гео-опасностите често се определят като събития, свързани с геоложкото състояние и процеси, които представляват потенциални рискове за хората, имотите и/или околната среда, които могат да бъдат класифицирани в две основни категории: природни опасности (като земетресения, свлачища, вулканични изригвания, цунами и наводнения) и предизвикани от човека опасности (като слягане на земята поради извличане на подземни води, замърсяване на водата и замърсяване на атмосферата). Гео-опасностите могат да причинят огромни човешки и икономически загуби и смущения, които продължават да нарастват в световен мащаб. През последните десетилетия годишните разходи, предизвикани от природни бедствия са се увеличили драстично.

Обработката на данни от радари със синтезирана апертура посредством интерферометричен подход (InSAR) е един от най-важните разработки в последните години в проучвателната геодезия и геофизика, която заедно с Глобалната Навигационна Спътникова Система за позициониране (ГНСС) в дисциплината Космическата геодезия направи революция за проследяване на деформациите на земната кора и на активната тектоника.

Спътниковите наблюдения предоставят подробна информация за повърхностните

деформации, дължащи се на естествени и антропогенни причини в рамките на големи площи. Тези наблюдения са от съществено значение за разбирането и проследяване на деформациите на земната кора и на движенията на тектонските плочи. През последните десетилетия InSAR се доказва като ценен инструмент за откриване и наблюдение на промени в Земната повърхност, дължащи се на сеизмични, вулканични, тектонични процеси, хидроложки и др. антропогенни дейности и позволиха прогнозирането на широк кръг от природни опасности.

Земетресенията представляват една от най-опустошителните гео-опасности по отношение на човешкото страдание и икономически щети, но основната причина за жертвите, инфраструктурни щети и икономически загуби е вторичната опасност от свлачища.

Към локалните, но често интензивни опасности се включват свлачищата, кални потоци, слягане или срутване на почвата поради естествено или предизвикано от човека отстраняване на повърхностни материали или течности.

Слягането на земята поради антропогенни процеси, като добив на подпочвени води, сол газ, нефт и въглища, е друга световна гео-опасност, която засяга обширни райони, причинявайки щети на инфраструктурата и увеличавайки риска от наводнения. По-добрите решения изискват по-добри познания за характеризиране, наблюдение и моделиране на гео-опасности и след това смекчаване на тяхното въздействие върху хората и околната среда.

За всяка една от споменатите опасности дадените от радарни сателити са в състояние да ни предоставят ценна информация при оценката на щетите след събитията, както и при оценка на риска от бъдещи събития посредством по-добро разбиране и наблюдение на протичащите процеси. Като цяло резултатите от InSAR ни предоставят възможността за провеждане на измервания в глобален мащаб за критични, но недостъпни по друг начин територии, което води до по-добро разбиране и прогнозиране на промените на Земната повърхност.

Едно от предимствата на резултатите от InSAR е предоставянето на много точни измервания на повърхностните деформации, тъй като изчислените земни премествания предоставят сантиметрова и дори милиметрова точност, в зависимост от дължината на вълната на използвания от радара електромагнитен сигнал. Посредством метода InSAR се измерва проекцията на действително настъпилото преместване на земната повърхност по посока на визирната линия на сензора, тъй като то представлява разликата от фазите на двете SAR изображения за една и съща област, заснета по различно време, т.е. промяната в относителната позиция на целта спрямо положението на спътника, което прави възможно да се открие само тази компонента на земното преместване, което е успоредно на траекторията на микровълновия импулс, използван от SAR системата. Последните достижения в прилагане на InSAR метода позволяват оценка на триизмерната деформация на земната повърхност. При тях се комбинират SAR изображения, получени при различни ъгли на падане/регистрация, както от възходяща, така и от низходяща орбита. Тези подходи имат ниска чувствителност към компонентата север-юг на земната деформация, поради почти квазиполярните орбити на сателитите.

Една от основните задачи е да се направи оценка на настоящи и бъдещи тенденции и предизвикателства при използването на InSAR метода, както и неговия принос в изследвания на деформации на земната кора, използвайки най-съвременните техники за наблюдение и моделиране на редица гео-опасности, включително свлачища, срутища, земни слягания, движения по разломи и др. Всичко това показва особената актуалност на проблема в световен и национален мащаб. Може да се направи извода, че изучаването на геопроцесите и техните изменения във времето и пространството е въпрос, който е поставен сред приоритетите в геодезията и науките за Земята. През последните 20 години има множество изследвания в областта на тази тематика, отразени в научни публикации, доклади на международни симпозиуми, научно изследователски проекти и дисертации и др.

### **1.3. Цел и задачи на изследванията**

Целта на настоящия дисертационен труд е фокусиран върху едно от значимите за обществото ни предизвикателства – регистриране, мониторинг и подобряване на превенцията от геодинамични процеси и възможността за проследяване на гео-риск при бедствия с приложение на SAR данни за територията на България и Балканския полуостров.

За постигане на целта са поставени следните задачи:

- Обобщение и систематизация на основните теоретични постановки и модели при използването на данни от PCA;

- Обобщение и систематизация на методи и модели за обработка на данни от PCA;

- Попълване на разработените бази данни от наземни измервания и Single Look Complex Image (SLC) изображения от радари със синтезирана апертура за изследваните региони;

- Разработване на алгоритъм за определяне на премествания на земната кора от SLC изображение от синтезирана апертура;
- Разработване на методология за обработка на Ground Range Detected (GRD) данни за моделиране движенията на ледниците и определяне скоростите на леда;
- Усъвършенстване на методиката за мониторинг на риска на геодинамични процеси, чрез комбиниране на данни от различни източници;
- Получаване на набор от тематични интерферометрични изображения и тяхното преобразуване в карти на преместванията за изследваните район;
- Извършване на пространствен анализ за изследвания регион, насочен към регистриране и мониторинг на земни премествания;
- Получените резултатите да бъдат анализирани и интерпретирани в ГИС среда и да се изготви приложение, благодарение на което интерферограмите да могат да бъдат разгледани, сравнени, а също и да се извършат различни анализи като топографски профили, измерване на разстояние, локализиране в реално време на терен и други.

#### 1.4. Научно-изследователски методи

Основните изследователски методи, използвани в дисертацията са:

- ✓ InSAR метода с неговите доразвити методологии:
- ✓ DinSAR- Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar
- ✓ SBAS InSAR- интерферометрия с Small Baseline Subset
- ✓ PS- InSAR- Persistent Scatterer Interferometry
- ✓ MT-InSAR- Multi-temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar

За верификация, сравнения и съпоставка на получените резултати са използвани:

- Метод на Окада – получените резултати от приложението на тази метод са използвани за потвърждаване на определените по SAR данни земни премествания, настъпили след сеизмично събитие.

- Метод на крайните елементи - използван е за определяне на земните деформации на свлачищен циркус „Дългия яр“ по ГНСС измервания и служещ за потвърждение на получените резултати от SAR данни за геодинамичните процеси в района на свлачището

#### 1.5. Структура на дисертацията

С оглед решаване на дефинираните по-горе задачи, дисертационният труд е структуриран по следния начин.

В **увода** са представени актуалността и обосновката на темата, целта и задачите на изследванията.

Във **втората глава** е анализирано съвременното състояние и приложенията на SAR данните за изучаване на геодинамични процеси и гео-хазарт (геориск). Разделът предоставя общ преглед за сателитните данни, използвани за наблюдение на Земята с акцент върху интерферометричната обработка на SAR данни. Извършена е систематизация на най-често приложимите модели за изследване на земетресения и вулкани, за наблюдаване на свлачища, срутища, ледници и наводнения.

В **третата част** “Теоретична постановка” са разгледани накратко основни теоретични термини и знания, свързани с радарите със синтезирана апертура и тяхното приложение. Дефинирани са някои основни понятия, които са използвани при радарите със синтезирана апертура.

В **четвъртата част** са изложени методите за обработка на SLC и GRD данни. Разделът описва основани подходи, използвани за моделиране на естествени опасности. За по-голяма яснота са показани реални примери от обработката на земетресение и свлачища в Приложение 1.

В **следващите пет раздела** са представени експериментални изследвания - прилагането на горепосочените данни в областта на мониторинга на природни бедствия с акцент върху земетресения, свлачища, срутища, техногенни процеси за територията на България и Балканския полуостров, както и проследяване на движението на ледниците на остров Ливингстън, едно далечно кътче, което се счита за Българска земя. Направена е верификация, сравнения и съпоставки, но специален акцент е обърнат върху интегрирането на сателитни данни с геофизични, геологични и сеизмологични такива в географско информационни (ГИ) модели.

В **петата част** са дадени резултатите от проведени експерименти за прилагане DinSAR технологията за определяне на косеизмичните деформации на земната кора за територията на Балканския полуостров. Извършено е сравнение на резултатите от интерферограмите с регистрираните деформации по геофизични данни с метода на Окада. Направена е обосновка,

свързана с тектониката на Балканския полуостров.

В **шеста глава** е анализирана възможността за регистриране на премествания въз основа на данни от РСА за няколко примера за свалачищата по Северното Българско Черноморие. Направено е сравнение между преместванията, определени по този метод и получените от геодезически ГНСС измервания.

В **седма глава** е анализирана възможността за проследяване на геодинамични процеси в района на град София и Югозападна България с приложение на SAR данни. Установени са преместванията при двата главни разломи в Софийската котловина, ясно изразени по данни от РСА.

**Глава осма** е посветена на приложението на данни от S-1 за мониторинг на настъпили промени в земната повърхност, предизвикани от техногенни процеси. Акцентира се на приложението за солното находище “Провадия”, което е изследвано от автора по различни методи и с помощта на различни типове данни от началото на нейната научна кариера.

Районът на АЕЦ Козлодуй също е изследван, като фокусът е в изграждането на мониторингова мрежа за проследяване на земни деформации за Национално хранилище за радиоактивни отпадъци (НХРАО) Радана, където за първи път в България са изградени пасивни ъгливи отражатели за приложение на PS-InSAR.

В **глава девет** е проучено и изследвано движението на ледниците в близост до българската база „Св. Климент Охридски“. В това изследване е картографирана скоростта на леда на ледниците Камчия, Пимпирев, Перуника, Хънтрес, Мейси, Преспа, Хурон и Калиакра, които са най-големите ледници на остров Ливингстън. Авторът има претенции, че е извършил за първи път изследвания на ледниците на остров Ливингстън – Антрактида на базата на SAR изображения от Sentinel-1A. В заключение (**част десет**) са обобщени основните резултати от проведените изследвания и са представени научните и научно-приложните приноси на дисертационния труд и бъдещи насоки.

## **2. Съвременно състояние на проблема**

### **2.1. Анализ и съвременно състояние на изследванията, свързани с приложение на SAR данни за проследяване на геодинамични процеси**

През последните десетилетия наблюдението на Земята намира широко приложение за управление на риска от бедствия (включително подготовка за бедствия, реакция, възстановяване и смекчаване), особено за реакция при бедствия, тъй като предоставя изключително полезна информация за изследователи, вземащи решения.

Наблюдението на Земята е събирането на информация за Земята с помощта на технологии за дистанционно наблюдение, които често се поддържат от техники за наземно проучване. Наблюдението на Земята значително промени начина ни на виждане на света, предоставяйки рамка за своевременно прецизно картографиране и наблюдение на широко мащабни явления.

Сателитите, които предоставят **данни за наблюдение на Земята** са оборудвани със системи, които могат да събират различни видове „изображения“ чрез пасивни сензори, които откриват отражението на електромагнитното лъчение, произведено от Слънцето (като видимо, инфрачервено, мултиспектрално и хиперспектрално) или активни сензори, които използват радиация, излъчвана от самия сензор (като радар и LiDAR). Различните видове сателитни данни могат да предоставят различна информация за почвата, растителността, инфраструктурата, атмосферата и морето.

SAR е система за дистанционно наблюдение, монтирана на сателити за наблюдение на Земята, която събира изображения на земната повърхност, чрез измерване на ехото на импулса от електромагнитна вълна (микровълнова), изпратена до целта от самата SAR система. Технологиите SAR позволява събиране на изображения, независимо от наличието на дневна светлина или метеорологичните условия, тъй като електромагнитните вълни могат да проникнат през облаците. Времето на получаване на SAR изображения зависи от цикъла на повторение на спътника (т.е. времето между две преминавания на спътника над едно и също географско местоположение), което варира от няколко дни до няколко седмици и върху полезния товар на сателита, като ъгъла на наклона и ширината на откоса на сензора.

SAR изображенията се събират в момента от много активни програми за наблюдение на Земята или програми които вече са приключили или са планирани за бъдещо стартиране. Някои примери са ERS (ESA), Envisat (ESA), TerraSAR-X (DLR - German Aerospace Center), TanDEM-X (DLR), Radarsat (CSA - Canadian Space Agency), JERS(JAXA - Japanese Earth Resources Satellite), ALOS (JAXA), COSMO-SkyMed (ASI - Agenzia Spaziale Italiana) и Sentinel (ESA).

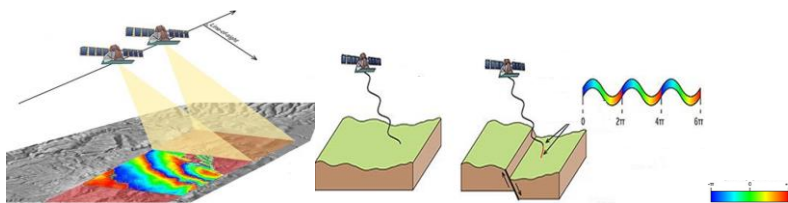
Много от тези програми за наблюдение предоставят събраните данни свободно достъпни, например програмата Коперник (<https://www.copernicus.eu>), европейската система за наблюдение

на Земята. Тази програма (Copernicus) има за цел да предостави на политици, изследователи, комерсиални и частни потребители данни за околната среда, събрани в почти реално време на глобално ниво от сателити за наблюдение на Земята (семейства Sentinel) и сензори на място. По-специално, мисията Sentinel-1 включва съзвездия от два сателита в полярни орбити, работещи денем и нощем, заснемачи радарни изображения със синтезирана апертура в С-обхват. Едно от предимствата на мисията Sentinel-1 е наблюдението на терена в “Режим на прогресивно сканиране” (TOPS), който е моделът на придобиване на широка лента и режими на изключително широк откос на Sentinel-1.

Суровите данни, събрани от SAR сензори (съставени от амплитуда, фаза и поляризация на обратно разпръснатия сигнал), могат да бъдат обработени с помощта на различни техники за обработка на изображения за извличане на информация за заснетия /сканирания/ географски регион.

Интерферометрията е техника, която позволява да се получат топографска и кинематична информация за земната повърхност от анализа на фазовата разлика на различни SAR изображения. Фазата на сигнала се определя от разстоянието между сензора и целта, като по този начин предоставя информация за относителната позиция на целта спрямо сателита.

Интерферометричен анализ на SAR изображения от един и същи географски регион, събрани по различно време (InSAR) е разработен за измерване на височините за релефа, като по този начин създава цифрови височинни модели на сканираната/заснетата площ. Като по-нататъшно развитие тази техника е разширена до оценка на повърхностно преместване. Това разширение се нарича диференциална InSAR (DInSAR), тъй като разглежда разликите на интерферограмите, където приносът, дължащ се на топографията (известна от цифров модел на релефа или изчислен) се компенсира, за да се възстанови само компонентите, породени от деформацията.



Фигура 2.1.1. Основни принципи на InSAR метода Geoscience Australia.

<https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/geodetic-techniques/interferometric-synthetic-aperture-radar>

Първоначално DInSAR е използван за изследване на единични събития на премествания на земната повърхност чрез анализиране на две получени SAR изображения при различни преминавания на спътника и създаване на карти на повърхностната деформация, възникващи между двете придобивания (интерферометрия с многократно преминаване).

По-напреднали **мултитемпорални или мулти-интерферограмни InSAR** техники позволяват да се оцени времева серия от карти на деформацията на повърхността чрез анализирани на набор от SAR изображения на същия географски регион, събрани за определен период от време. Измервания на премествания се получават чрез процедура на фазово разгръщане, която възстановява отместванията предвид фазовите разлики (измерени в радиани). Стойностите, получени от тази обработка са разликите по отношение на основно изображение.

Едно от предимствата на InSAR е предоставянето на много точни измервания на повърхностната деформация; измереното земно преместване може да има сантиметрова или милиметрова точност, в зависимост от дължината на вълната на използвания електромагнитен сигнал. Трябва да се отбележи, че техниката InSAR измерва проекцията на действителното движение на земната повърхност по посока на линията на видимост (LOS) на сензора, тъй като разликата представлява фазите на две SAR изображения /на една и съща област, събрани по различно време/ т.е. промяната в относителната позиция на целта спрямо спътника, което прави възможно да се открие само компонента на земното движение, успоредно на траекторията на микровълновия импулс, използван от SAR системата. С други думи, измерва колко земната повърхност се приближава или отдалечава от сензора, които не е разположен в местния географски зенит. На фигура 2.1.1 са представени две SAR изображения на една и съща област, получени по различно време. Ако повърхността се движи между двете придобивания, се записва фазово изместване. Интерферограмата картографира това фазово преместване пространствено.

Поради времевата декорелация в сигнала, дължаща се на промяна в диелектричните свойства на отразяващата повърхност с течение на времето поради шум, различия в атмосферния слой или други смущения, времевата поредица на повърхностната деформация не може да бъде извлечена за всички пиксели на SAR изображенията. Времевите серии от деформация на повърхността могат да бъдат изчислени само за цели, които показват кохерентност по стека (група от последователни изображения) от SAR изображения; такива цели /марки,отражатели/ съответстват например на скали (естествени рефлектори) или сгради (изкуствени рефлектори), които действат като постоянни рефлектори, като поддържат постоянни диелектрични свойства за периода на наблюдение. За части от земната повърхност, покрити с гори или земеделски полета, кохерентността по стека от изображения не се запазва, защото радарния сигнал на обратното разсейване съдържа принос от разсейването от растителния слой. Друг източник на загубата на кохерентност между SAR изображения е свързана с базовата линия, която е разделянето между орбиталната позиция на различни придобивания.

Последните разработки в InSAR техниките позволяват оценка на триизмерната деформация на повърхността. В тази рамка се комбинират SAR изображения, получени при различни ъгли на падане, както във възходяща, така и в низходяща орбита (Wright et al., 2004; Gray 2011). Тези подходи имат ниска чувствителност към компонента север-юг на земната деформация, поради почти полярната орбити на сателитите. Други подходи извеждат триизмерното поле на повърхностно преместване чрез интегриране на данни от InSAR с други източници на информация, като GPS данни (Gudmundsson et al., 2002; Spata et al. 2009) или оптични изображения (Grandin et al., 2009).

### ***Приложение на SAR данни при определяне на косеизмични премествания***

Първият пример е представен още през 1993г. (Massonnet et al. 1993), където се използват данни от InSAR, за да се открият сеизмичните премествания, причинени от земетресение, настъпило през 1992 г. в Ландерс (Landers), Калифорния. По-нови примери (Kuang 2019; Fathian et al. 2021; Bjelotomi Oršuli, O. 2021; Lovery et al., 2024) използват данни от InSAR, за да проучат сеизмично събитие и предизвиканите от него земни деформации и свлачища.

Технологията по обработка на SAR данни за целите на сеизмологията в международен аспект през последните години се разви с бързи темпове. Създават се автоматични процедури (Atzori et al., 2023), за да предоставят резултати без надзор, базирани на консолидирани и стабилни алгоритми, свеждащи до минимум времето за обработка и необходимостта от взаимодействие с експертен оператор. В реално време се осъществява мониторинг на земетресения, например анализ на времената на пристигане на P-S на сеизмичните вълни позволява бързо да се изведе мястото на събитието, неговата големината и механизма на разкъсване, чрез изчисляване на моментния тензор. В същото време, благодарение на десетилетия подобрения на алгоритъма и наличието на безпрецедентен безценен архив от безплатни продукти от сателитни данни с апертурен радар (SAR), получени от съвезидието Sentinel-1 на програмата Коперник, способността на измерване на настъпилите деформации, причинени от земетресение позволи разрастването на услуги, които автоматично осигуряват карти на преместванията, генерирани чрез диференциалната SAR интерферометрия.

Примери за налични услуги, предоставящи автоматични InSAR карти след събитие, в глобален мащаб (Atzori et al., 2023) са: LiCS-COMET, Център за наблюдение и моделиране на земетресения, вулкани и тектоника, Centre for Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes and Tectonics (COMET, UK, <https://comet.nerc.ac.uk/comet-lics-portal/>);

- ARIA, the Advanced Rapid Imaging and Analysis проект от сътрудничество между Jet Propulsion Laboratory (JPL, California) и Caltech, the California Institute of Technology (web portal: <https://aria.jpl.nasa.gov/index.html>);

- Услугата GeObservatory от BEYOND, Център за изследване на наблюдението на Земята и сателитно дистанционно наблюдение на Националната обсерватория в

- Атина (the GeObservatory service from BEYOND, Center for Earth Observation Research and Satellite Remote Sensing of the National Observatory of Athens (<http://geobeyond.beyond-eocenter.eu/>))

- EPOSAR услуга от IREA-CNR (<https://geohazards-tep.eu/geobrowser/?id=epos>), действайки в рамките на EPOS (European Plate Observing System) платформа (web portal: <https://www.ics-c.europa.eu/>).

### ***Приложение на SAR данни при изследвания на свлачищни движения***

През последните десетилетия сателитни данни за SAR, обработени чрез диференциална интерферометрия, са използвани в инвентаризациите на свлачищата (Moretto et al. 2021; Solari et al. 2020; Chen et al. 2023). Първото приложение на DInSAR за изследване на свлачища датира от средата на 1990 г. (Fruneau et al., 1996), а през следващото десетилетие разработената техника



привлече вниманието на изследователите на свлачища, напр. Bianchini et al., 2013. Методът InSAR привлече професионалисти от различни области, предоставяйки мониторинг на широки области, много по-висока плътност на точките и най-важното ниска зависимост от географията на изследваните райони и от метеорологичните условия в сравнение с оптичното дистанционно наблюдение, GNSS и теренните изследвания.

По-нататъшно развитие на споменатия подход са методите на мултitemпоралната интерферометрия (MTInSAR или MTI) (напр. интерферометрия с постоянни отражатели (PSInSAR) — (Fiaschi et al. 2008; Carlåa, 2019; Ferretti et al. 2001; Colesanti et al., 2003; Hilley et al., 2004) на малка базова линия (SBAS)-(Mora et al., 2002). Успешните им приложения при изследване на свлачища са открити в трудовете на (Wasowski et al., 2014; Bianchini et al., 2015; Necula et al., 2021). Както беше посочено в предишния подраздел, новите сателитни SAR мисии предоставят по-добри възможности, които извеждат информацията, получена в резултат на обработката на MT на техните данни до ново ниво на качество. Тези нови възможности доведоха до по-нататъшно подобряване на първоначалната SBAS техника (Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2004) и до използването на хибридни подходи (Wang et al., 2012; Guo et al., 2021)

Друг метод за подобряване на крайното качество на информацията от SAR данните е да се възползват от традиционните геодезически методи, подобрени от наличните GNSS мрежи и по този начин да се предостави по-широка перспектива във времето и пространството, както е споменато в (Lanari et al., 2004; Hu, 2018; Li et al., 2021).

Данните от InSAR за преместване на земната кора се използват широко за наблюдение на бавно движещи се свлачища. InSAR земни деформации са анализирани за свлачища като оценка на риска за наблюдение на планински склонове (Colesanti et al. 2003; Rott & Nagler 2006; Hu et al. 2017; Nobile et al. 2018), чрез проверка и актуализиране на карти на опасността и риска от свлачища и инвентарни карти, както в Cascini et al. (2009) и Lu et al. 2014). Tofani et al. (2013) подчертават ползността на данните от InSAR при картографиране на свлачища, мониторинг и анализ на опасностите чрез представяне на резултатите от въпросник за използване на дистанционно наблюдение в текущи проучвания на свлачища в Европа.

Интересът към темата за мониторинг на свлачища чрез анализ на данните от InSAR се доказва, като проекта на ESA „Анализ за прогнозиране на свлачища чрез времеви серии на преместване, получени от сателит и земни данни от InSAR ”Landslides forecasting analysis by displacement time series derived from satellite and terrestrial InSAR data” (Mazzanti et al., 2011) и проекта Мониторинг на градско слягане, кухини и свлачища чрез дистанционно наблюдение (MUSCL project Monitoring Urban Subsidence, Cavities and Landslides by remote sensing) в рамките на Пета Рамкова програма за научни изследвания и развитие на Европейската комисия (Rott et al. 2002).

Откритият добив на **полезни изкопаеми, въглища, земни кариери, мини** засяга околните населени места, което води до деформация на повърхността на терена. Повърхностната деформация трябва да се наблюдава възможно най-често, за да се контролират преместванията и предотвратяване на потенциални инциденти. Възможно е да се измерват деформации с помощта на методи от класическата геодезия, но те рядко се използват на практика, защото отнемат време и са скъпи за приложение в големи площи. Използване на радарни изображения от мисията Sentinel-1 и техниката PS-InSAR са използвани за проследяване на деформациите в района на въглищните мини “Kostolac” в Република Сърбия (Gojкови et al., 2023). Използвани са кратки времеви редове от данни от сателитно базирани радарни със синтезирана апертура (PCA), обработени по метод DInSAR за регистриране на деформациите на терена в градската и индустриална зона в района на град Перник (Atanasova et al., 2021c), където са разположени голям брой мини и промишлени предприятия, занимаващи се главно с производство и преработка на въглища и стомана, които са обслужвани от железопътни линии и магистрали. Някои от тези промишлени, инфраструктурни и градски обекти са засегнати от бавни движения на земната кора. Оценени са протичащите геодинамични процеси в региона.

Резултати от InSAR в ГИС за интерпретиране, архивиране и предоставяне на получените данни за слягане са тествани за района на Апин, югозападно от Сидни, Австралия (Ge Linlin et al., 2003). Използвани са GPS данни за подпомагане на прецизната геоференция и осигуряване на точност под сантиметър.

**Скоростта на ледниците** е съществен елемент от наблюдението на ледниците и разбирането на динамиката на ледниковата система. Метод, приложен за изследване на ледниците на остров Ливингстън, се основава на данни от радар със синтезирана апертура (SAR), използвани за извличане на повърхностните скорости на леда и е създаден нова DEM. В този случай са включени времеви серии от системата за получаване на изображения PALSAR-1 на борда на японския сателит за усъвършенствано наблюдение на Земята (ALOS-1) за периода ноември 2008

г.-февруари 2011 г. (Osmanoglu et al., 2014).

Систематичното наблюдение на ледниците е от основно значение за разбирането как се развиват техните потоци и какъв е приносът им към промяната на морското ниво и това е причината, поради която е създаден уеб порталът „Център за полярно наблюдение и моделиране/Center for Polar Observation and Modelling " (CPOM). Това приложение предоставя актуални карти на скоростта на леда за ключови изходни ледници на ледените покривки на Антарктика и Гренландия в почти в реално време. Картите на скоростта се произвеждат от радарни данни със синтезирана апертура, получени от сателита Sentinel-1 на ЕКА (Hogg et al., 2015; Lemos et al., 2018) и са специализирани в обработката на данни от полярна мисия на ESA за изследване на Земята CryoSat. Но за съжаление ледниците на остров Ливингстън не са включени в този уеб портал.

В (Spasova, 2019) се проследява използването на различни сателитни данни и подходи за проследяване на динамиката на развитието на краткотрайната снежна покривка и нейната сезонна динамика около остров Ливингстън. Получени са резултати за количествените изменения на мокрия сняг и неговата динамика. Морският лед е картографиран според данните на Европейската космическа агенция (ESA), получени от сензори на Sentinel-1, Sentinel-2 MSI (Multi Spectral Instrument), Sentinel-3 в GIS среда. В (Spasova et al., 2020) е демонстрирана динамиката през летния сезон от 2015 до 2019 г. около бреговата линия на остров Ливингстън.

### ***Изследвания, базирани на SAR данни за територията на България***

У нас приложението на InSAR навлиза трудно, методът е използван едва след 2005, свързано е с големия обем на данни и необходимия ресурс на компютрите при обработката. Най-често българските автори в този период се обучават и използват ресурса на международни курсове-workshop (Атанасова М., Общ курс за правоспособност по "Деформационни измервания и анализ на опасността от природни бедствия"; "Международен център по теоретична физика" гр. Триест, Италия 17-23.01.2005г.) или защитават дисертации по темата в чужди университети (Илиева, 2011, Crustal deformations of shallow earthquakes in the Eastern Mediterranean studied by radar interferometry and seismology - Университет "Пиер и Мари Кюри"-Париж VI (UPMC-Sorbonne Universités)). Разработена е и дисертация Интерферометрични методи и алгоритми за моделиране и обработка на сателитни SAR изображения (Минчев Д. 2012).

SAR данни от ENVISAT SAR са използвани от български учени за изследване на косеизмични деформации след земетресението в гр. Бам 2003. (Атанасова, 2011) и земетресението в Лейфада (Ilieva et al., 2016), свлачища в Североизточна Армения (Minchev et al., 2010; Ilieva et al., 2012), сляганя и деформационни явления в околностите на гр. Солун (Mouratidis et al., 2010), изследване на сеизмогенна зона в района на гр. София (Димитров & Ботев, 2016).

С възможността да бъдат използвани свободно SAR данни от Sentinel и обработката със софтуера с отворен код SNAP се разширяват хоризонтите за научни изследвания за района на България и Балканския полуостров. Първите изследвания въз основа на данни от S-1 са свързани с мониторинга на геопрацеси от техногенен характер в района на Мировското солно находище (Атанасова & Николов, 2016).

Благодарение на ФНИ бяха реализирани едни от първите изследвания за територията на България за проследяване на свлачищни процеси по Северното Черноморие въз основа на комбинирано наблюдение от ГНСС измервания и SAR данни в рамките на научни изследвания по обществените предизвикателства – 2018 / Национална сигурност и отбрана, минимизиране на щети от природни бедствия и аварии. Проектът, ръководен от автора на дисертационния труд, бе успешно завършен и отличен като най-добър проект в „Науки за земята“, отчетен през 2023г. (Атанасова et al., 2023; 2024 ). Получените резултати от SAR данни, изобразени върху изготвените карти на преместване за свлачище „Трайкии скали“ са съпоставими с определените от Yamaguchi et al., 2021 по същият DinSAR метод.

На базата на добрите SAR резултати, получени при определяне на настъпилите премествания след редица регистрирани земетресения на Балканите след 2015 година (Атанасова 2023a) бе спечелено финансиране и през декември 2023 стартира проект „Изследване на косеизмични деформации на земната кора за територията на Балканския полуостров по сателитни данни КП-06-Н74/2 14.12.2023“.

Авторът има претенции, че са извършени за първи път изследвания за определяне скоростта на ледниците около Българската база на остров Ливингстън на базата на SAR изображения от Sentinel-1 (Атанасова 2023b). Научните резултати са част от работата на автора като ръководител на работен пакет "Сателитни данни" в проект „Комплексно геофизично изследване на ледниците в района на Южния залив на остров Ливингстън 80-25-70 / 03.08.2021 г., СУ "Климент Охридски".

Както се вижда от представената от Soldato (Soldato et al., 2021) на фигура 2.1.3 графика броят на статиите, свързани с приложение, комбиниращо GNSS и InSAR в България са само 3 броя. Като са цитирани 3 работи на автора на дисертацията. Представено е и времевото развитие на научните приноси, комбиниращи GNSS и InSAR данни в Европа по държави, разпределение на научните трудове според областта на приложение (свлачища, вулкани, тектоника, потъвания, атмосфера и т. т.).

Анализът на пространственото и времевото разпределение на научните приноси за Европа е завършен, докато специален фокус е отделен на Италия, тъй като тя е най-представената страна с 47 научни приноса. Италия е и първата държава, която докладва проучване, комбиниращо данни от GNSS и InSAR. Всъщност първата изследователска работа е записана през 1999 г. и изследва геометрията и разпределението на приплъзването на равнината на разлома, предизвикана от земетресенията в Колфиорито (централна Италия), настъпили на 26 септември 1997.



Фигура 2.1.3. Преглед на работите, комбиниращи GNSS и InSAR в Европа и пространствено разпределение на научния принос на Европа. (Soldato et al., 2021)

На базата на това изследване за Европа, може да се каже че в България има какво още да се желае за по-широко разпространение на SAR данните за изследване на гео-процеси. В тази насока са насочени и създадените обучителни курсове на млади специалисти по проект и финансирани от PECS/ESA „Разкриване на възможностите предлагани от SAR данни в различни приложни области - обучение на ново поколение професионалисти“- Авторът е един от основните лектори и основен инициатор на идеята са разширяване на кръга от специалисти в областта на InSAR. Обучителни курсове са проведени в УАГФ, Физически факултет на СУ, МГУ и създадената в т. 4 методика е използвана при обучението.

### 3. Теоретични основи при получаване на радарни данни

#### 3.1. Историческо развитие на радарната технология

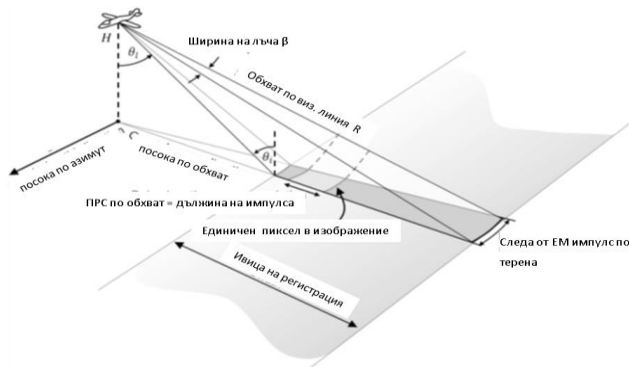
Терминът радар (RADio Detection And Ranging – RADAR) в най-общ смисъл означава радиооткриване и обхват. От една страна той дефинира апаратурната част - активна микровълнова система, съставена от предавател и приемник. Радарът излъчва енергия като електромагнитен импулс и приема обратен отразеният от обекта сигнал. Като метод на изследване на обекти чрез радари е възможно да се оцени разстоянието до обекта, отразяващ сигнала въз основа на времевия интервал между излъчвания и приет импулс в конкретна честотна лента на електромагнитния спектър (ЕМС).

##### 3.1.1. Начало на радарните изследвания

В исторически план радарите са създадени през 30<sup>те</sup> години на 20<sup>ти</sup> век. По този начин се поставя началото на активните дистанционни методи за откриване на обекти от разстояние, в частност се предоставя възможност за наблюдение на повърхността на Земята от самолети и спътници.

##### 3.1.2. Принципна схема на радар със страничен обзор

През 50<sup>те</sup> е създаден самолето-базиран радар със страничен обзор – PCO (Side-Looking Airborne Radar – SLAR), с което се поставя началото на регистрацията на данни под формата на изображения, които включват амплитудата и фазата на отразения от земната повърхност излъчен сигнал. За разлика от повечето системи за получаване на оптични изображения, чиито сензори са насочени в надир, антената на радарната система е насочена встрани от надир по така наречената визирана линия под ъгъл на падане  $\theta$ , така че изпраща електромагнитни импулси по непрекъсната ивица по терена докато самолетът се движи.

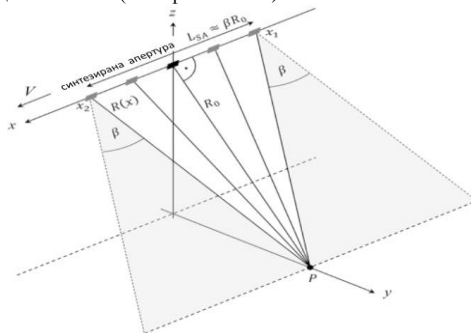


Фигура 3.1.2.1. Схематично представяне на регистрацията на данни от PCO адаптирана фигура от (Flores et al. 2019).

### 3.2. Радари със синтезирана апертура

#### 3.2.1. Принципна схема на радар със синтезирана апертура

Решението на проблема с големият размер на приемо-предавателната антена, е предложено от Карл Уайли през 1952 г. и е в основата на концепцията за използване на множество регистрации от един и същ обект, отразени от обект от земната повърхност, направени от радар с къса антена, разположен на носител. Тя по-късно става позната с наименованието радар със синтезирана апертура (РСА). При движение на носителя антената изпраща и регистрира поредица от кратки електромагнитни импулси в радиодиапазона към/от земната повърхност. След синхронизация и обработка на борда на носителя всички регистрирани от антената импулси по трасето на носителя от  $t_1$  до  $t_2$  формират общ масив данни, който реално съответства на такъв, получен с много по-дълга антена (виж фиг. 3.2.1.1).



Фигура 3.2.1.1. Примерно представяне на получаване на данни от РСА адаптирана фигура (Flores et al. 2019).

Методът на радарите със синтезирана апертура е доразвит и доказан теоретично за първи път от Грѐм през 1974 г. Неговата технологична реализация е извършена 12 години по-късно от Зебкер от борда на самолет.

Първият космически радар със синтезирана апертура за наблюдение на Земята е сателитът Seasat на Националната аеронавтическа и космическа администрация (НАСА). Той е изстрелян през 1978 г. и е от апаратурните измервателни комплекси на борда на Seasat и РСА за наблюдаване глобалните полета на повърхностните вълни и състоянието на ледената покривка в полярните райони. Като най-успешната програма по отношение на приложенията на РСА за получаване на данни след Seasat несъмнено са ERS-1 и ERS-2, изстреляни съответно през 1992 г. и 1995 г. от Европейската космическа агенция.

Синтезираната антена, реализирана по описаната схема позволява получаване на данни с висока ПРС (приблизително 1 m) за разлика от антена с по-дълги размери и позволява бъде монтирана на сателит. Тази концепция е в основата на всички разработвани апаратурни комплекси с радари със синтезирана апертура РСА от началото на 70<sup>те</sup> години на 20<sup>ти</sup> век до момента. При РСА основно място заемат регистрацията на амплитудата и фазата на ЕМ сигнал от радара, както

и запазването на стабилността на фазата му по време на регистрация. Изпълнението на тези две условия довежда до възможността за реализация на приложението на радарите със синтезирана апертура РСА. Изложеният принцип на работа на РСА и развитието на технологичното ниво в електрониката позволяват да се увеличи пространствената разделителна способност ПРС на получаваните данни до 1 m и по-добри размери на площите, които са включени в единичен набор от SAR данни.

### 3.2.2.Честотни ленти (обхвати) на радарните сигнали

В Таблица 3.2.2.1 са показани международно възприетите означения на честотните обхвати с латински букви и съответстващите им дължини на ЕМ вълни на често използваните радарни системи при дистанционни изследвания. Както се вижда в таблицата не всички микровълнови честотни обхвати се използват при дистанционни наблюдения с радарите със синтезирана апертура, поради ограничения от административен характер (напр. в Ka, K и Ku).

Таблица 3.2.2.1 Честоти на радарните системи

Честотна лента обхват	Сфера на използване
<b>Ka</b> 27 – 40 GHz (1.1 – 0.8 cm)	Рядко се използва при РСА, тъй като се използва при наблюдение на въздушен трафик.
<b>K</b> 18 – 27 GHz (1.7 – 1.1 cm)	Рядко използван поради абсорбция от водните пари в атмосферната колона.
<b>Ku</b> 12 – 18 GHz (2.4 – 1.7 cm)	Рядко се използва за РСА, а по-скоро за сателитна алтиметрия.
<b>X</b> 8 – 12 GHz (3.8 – 2.4 cm)	РСА с висока ПРС (наблюдение на урбанизирани райони; лед и сняг; малко проникване в растителната покривка; бързо намаляване на кохерентността в растителни зони)
<b>C</b> 4 – 8 GHz (7.5 – 3.8 cm)	Основна лента за РСА (глобално картографиране; откриване на промени; наблюдение на райони с ниска до умерена растителност; подобро проникване; по-висока кохерентност); Ледена покривка, морски площи, морска навигация
<b>S</b> 2 – 4 GHz (15 – 7.5 cm)	Малка, но нарастваща употреба за базирано на SAR наблюдение на Земята; мониторинг на селското стопанство (NISAR ще носи S-лентов канал; разширява приложенията на С-лента до по-висока гъстота на растителността)
<b>L</b> 1 – 2 GHz (30 – 15 cm)	РСА със средна пространствена разделителна способност (геофизичен мониторинг; картографиране на биомаса и растителност; високо проникване; InSAR)
<b>P</b> 0.3 – 1 GHz (100 – 30 cm.)	Първият космически РСА в Р-обхвата Biomass ще бъде изстрелян от ЕКА за картографиране и оценка на растителността.

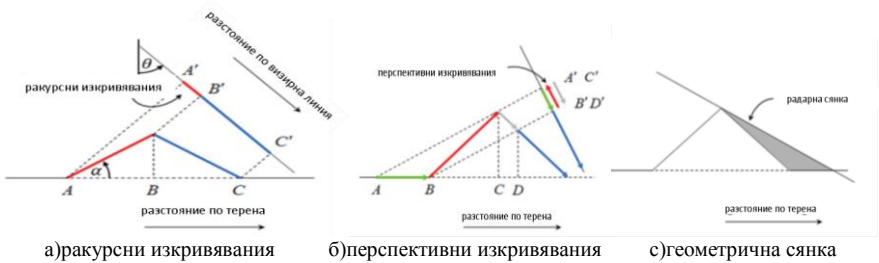
Затова за гражданска употреба се използват РСА в по-ниските честотни ленти, включващи честотните обхвати от Х до Р. В дясната колона на същата таблица са показани типичните приложения на РСА като функция на честотната лента. Вижда се, че РСА в Х-обхвата се използват предимно за наблюдение на градска среда и инфраструктурни обекти. Поради по-високата ПРС, предоставяна от РСА в Х-обхвата намират широко приложение в наблюдението и проследяването на движещи се обекти и често се използват при наблюдение на индустриални инсталации. РСА в С-обхвата са преобладаващия брой, създадени и експлоатирани комплекси при наблюдение на Земята през последните 30 години. С възможността за постигане на ПРС от висока до средна, както и регистрацията на данни за по-големи площи, РСА в С-обхват представляват разумен компромис между РСА в Х и L обхвати за целите на дистанционни наблюдения в регионален и глобален мащаб. До момента РСА в S обхват са използвани рядко при наблюдение на Земята преди 2015. Към днешна дата в експлоатация е демонстрационен РСА в този обхват и в скоро време се планира в орбита да бъде изведен сателит, на който са разположени два РСА единият в S обхват, а другият в L обхват. Въпреки че РСА в L обхвата не предоставят възможността за висока ПРС, предоставяна от РСА с по-къса дължина на вълната, изискванията от страна на потребителите водят до използване на този обхват. Той позволява да се елиминира негативното влияние на растителността в данните. По отношение на РСА в Р обхват следва да се отбележи, че разработката на сателитно базирани системи в този честотен обхват са подложени на значителни йоносферни изкривявания, но последните достижения при в йоносферната корекция позволиха да се развият системи, които да използват и този обхват.

### 3.2.3.Геометрия при получаване на данни от PCA

Получените данни от регистрирания сигнал формират двумерна матрица от комплексни стойности, при която всяка една от тях се състои от реална и имагинерна част, които отговарят на стойности за амплитуда и фаза.

### 3.2.4.Влияние на терена при получаване на SAR данни

Поради наклонената геометрия на регистрацията на сигнала, присъща за всички радарни системи, формирани изображения (виж фиг. 3.2.4.1) наклоните на повърхността и други специфични характеристики на терена водят до геометрични изкривявания в данните, получавани от PCA системите. Това е така, защото радарът измерва само проекцията на тримерна сцена върху координатите на радара по страничен обхват и азимут. Това води до геометрични изкривявания в получаваните изображения и следователно тяхната директна интерпретация без предварителна обработка не е възможна.



а) ракурсни изкривявания

б) перспективни изкривявания

в) геометрична сянка

Фигура 3.2.4.1. Геометрични изкривявания, дължащи се на геометрията при регистрацията на PCA данните - адаптирана фигура (Flores et al. 2019).

За да бъдат трансформирани коректно PCA данните, регистрирани в геометрията на антената (по страничен обхват и азимут) е задължително да се използва допълнителен, най-често създаден преди това, цифров модел на релефа (ЦМР).

Фактът, че PCA работи извън надир води до появата на нежелани ефекти като ракурсни изкривявания (foreshortening), перспективни изкривявания (layover), геометрична сянка (shadow), които са показани на фигура 3.2.4.1. Например при геометрия със странична регистрацията склоновете с лице към сензора изглеждат скъсени, така че ако в регистрираната повърхност присъства симетрична планина, то тя ще се види в радарното изображение сякаш се „навежда“ към сензора.

Един от начините за минимизиране на тези ефекти е да се използват изображения, получени от различни зрителни ъгли (за сателитни PCA от различни орбити) и данните от тях да се комбинират след подходяща обработка.

### 3.2.5.Механизми на отражение при радарни сигнали

Както бе казано по-горе радарните системи прилагат активен метод за дистанционни изследвания, при който антена изпраща ЕМ сигнал от микровълновия обхват на ЕМ спектър и регистрира обратно отразената от земната повърхност част от него.

#### 1.2.7.Поляризация на радарните сигнали

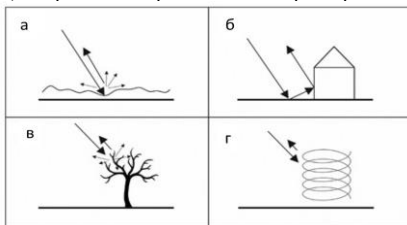
PCA са активни апаратурни комплекси за дистанционни изследвания, притежаващи собствен източник на ЕМ излъчване, което позволява да се задава възможността за поляризация на сигнала, както в процеса на неговото излъчване, така и при регистрацията му след отражение от обектите по земната повърхност. Поляризацията описва ориентацията на равнината на осцилация на разпространяващ се ЕМ сигнал (виж фиг. 3.2.7.1) и в зависимост от ориентацията на тази равнина на осцилация PCA се разделят на:

- 1) линейно поляризиран, при които електромагнитната вълна е в една и съща равнина;
- 2) кръгово/елиптично поляризиран, като при тях ориентацията на равнината на осцилация се променя, описвайки геометрични фигури като елипси или кръгове.

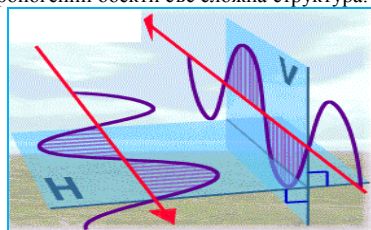
Познаването на поляризацията, при която са получени PCA данните е важно, тъй като ЕМ сигнали при различните типове поляризации взаимодействат по различен начин с обектите на земята, засягайки регистрираната радарна яркост в конкретен поляризиран канал. По-голямата част от разработените до момента PCA са линейно поляризиран и предават хоризонтално и/или вертикално поляризиран ЕМ сигнали с вълнов характер. Първоначално сателитно базираните PCA са имали едно поляризиран сензор, които поддържат само една линейна поляризация. Това означава, че те работят предимно в НН - (хоризонтална поляризация при предаване; хоризонтална поляризация при приемане) или VV-поляризация (вертикално предаване; вертикално приемане),

виж фигура 3.2.7.2. Съвременните PCA са кръстосано поляризиращи сензори, които предават с една линейна поляризация и приемат с другата (напр. HV (хоризонтално предаване ; вертикално приемане). При тях PCA редува предаване на H- и V-поляризиращи вълнови сигнали и приемане на H и V едновременно, осигурявайки HH-, HV-, VH- и VV-поляризиращи изображения с двойна или дори четворна поляризация. При кръстосано поляризиращи сигнали (HV или VH) регистрираният от PCA сигнал обикновено е по-слаб, което се отдава на различни механизми на отражения, поради грапавостта на конкретна повърхност. На фигура 3.2.7.1. са показани основните типове разсейване от обекти от земната повърхност, които могат да се апроксимират със следните основни механизми на разсейване:

- а) единично разсейване - характерно за водни площи, открита почва, пътища;
- б) двойно разсейване - характерно за вертикални структури напр. сгради, стълбове;
- в) обемно разсейване - характерно за средна и висока растителност напр. горски и земеделски масиви;
- г) спираловидно разсейване - характерно за антропогенни обекти със сложна структура.



Фигура 3.2.7.1. Схематично представяне на основни типа разсейване при PCA (източник <https://doi.org/10.3390/en15010072>).



Фигура 3.2.7.2. Схематично представяне на основни типове поляризация при PCA

Най-общо казано при единично разсейване максимални стойности на регистрирания от PCA сигнал са от VV поляризация, при двойно разсейване такива стойности са от HH поляризация, докато за обемното разсейване преобладават кръстосано поляризиращите сигнали HV или VH.

### 3.2.8. Съвременни системи за получаване на данни от PCA

Както бе споменато в раздел 3.2.1 сателитно-базираните PCA апаратурни комплекси датират от началото на 80-те години на 20-ти век. В следващите десетилетия тази технология за получаване на данни от дистанционни изследвания на Земята от Космоса се развива значително и позволява ПРС на PCA да бъде съпоставима с тази на апаратурни комплекси, работещи в оптичния диапазон на ЕМ спектър. Едно много важно предимство на PCA пред оптичните сензори е възможността да се регистрират данни при наличие на облаци над изследваната площ от земната повърхност. Друго предимство е, че данни от PCA се получават и без наличието на външен източник на ЕМ енергия, който да облъчва конкретния обект. Това означава, че данни се регистрират и през тъмната част на денонощието, което увеличава ефективността при експлоатация на апаратурния PCA комплекс.

В таблица 3.2.8.1 са обобщени по-известните радарни измервателни комплекси за получаване на PCA данни, като са групирани по използването от тях дължина на ЕМ вълна. Както се вижда от таблицата повечето от източниците на PCA данни са с ограничен достъп и затова като една от пречките пред тяхното по-широкото използване в периода 1990 – 2015 година може да се посочи трудният достъп до тях, поради необходимостта те да бъдат заплащани, както и строго специализираните софтуери за тяхната обработка, налагащи високи изисквания към компютърния хардуер и не на последно място подобряването на ПРС.

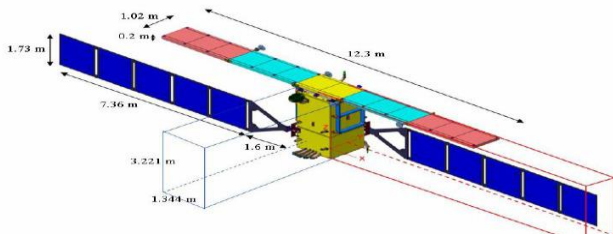
С изстрелването на сателита Сентинел-1 през 2014 г., който бе първият от серията сателити по програма „Коперник“ на ЕК и приложената политика за свободен достъп до данните от него се постави началото на все по-пълното използване на данни от PCA. От друга страна ЕКА освен, че беше натоварена да проектира, реализира, да въведе в експлоатация и поддържа този сателит, беше поела ангажмента да предостави за безвъзмездно ползване на всички потребители данните от него и програмните средства за обработката им. Доказателства, че приложеният подход за достъп до PCA данни в комбинация със софтуер за обработка е успешен са експоненциалният ръст на научните разработки, базирани на тях, както и реализираните въз основа на тях национални и паневропейски услуги за движения на земната кора.

Таблица 3.2.8.1. Сателитно базирани радарни измервателни комплекси РИК, предоставящи SAR данни (ползването на данни за нетърговски цели от някои РИК с ограничен достъп)

Наименование	Срок на експлоатация	Държава/Достъпност на данните
<b>L обхват</b>		
JERS-1	1992 – 1998	Япония / ограничен
ALOS PALSAR-1	2006 – 2011	Япония / достъпни
ALOS PALSAR-2	2014 –	Япония / ограничен
SAOCOM-1A	2018 –	Аржентина / ограничен
SAOCOM-1B	2020 –	Аржентина / ограничен
<b>C обхват</b>		
ERS-1	1991 – 2000	ЕКА / достъпни
ERS-2	1995 – 2011	ЕКА / достъпни
RADARSAT-1	1995 - 2011	Канада / ограничен
ENVISAT ASAR	2002- 2012	ЕКА / достъпни
RADARSAT-2 (RCM)	2007 –	Канада / ограничен
RISAT-1	2012 – 2017	Индия / ограничен
Sentinel-1A	2014 –	ЕКА / достъпни
Sentinel-1B	2015 – 2022	ЕКА / достъпни
Gaofen-2	2016 – 2022	Китай / ограничен
<b>S обхват</b>		
NovaSAR-1	2018 –	Индия / ограничен
HJ-1C,2E,2F	2012 –	Китай / ограничен
<b>X обхват</b>		
COSMO-SkyMed	2007 – 2021	Италия / ограничен
COSMO-SkyMed Second Gen.	2018 –	Италия / ограничен
TerraSAR-X	2007 –	Германия / ограничен
TanDEM-X	2010 –	Германия / ограничен
PAZ	2018 – 2023	Испания / ограничен
KOMPSTAT-5	2013 –	Корея / ограничен
ICEYE	2018 -	Финландия / ограничен
ANSARO-2	2018 –	Япония / ограничен
Capella Space	2018 –	САЩ / ограничен

### 3.2.8.1. Сентинел-1 (S-1) – общи сведения

Мисията Сентинел-1 е радарен измервателен комплекс (РИК), разработен по програма „Коперник“, която е съвместна инициатива на Европейската комисия (ЕК) и ЕКА. Тази програма има за цел внедряване на информационни услуги, фокусирани върху околната среда и сигурността, които са базирани на данни, получени от спътници за наблюдение на Земята, както и наземна информация. Конкретно този РИК е РСА, формиращ изображения и използва дължина на вълната в С-обхват (5.405 GHz). Той позволява работа в четири режима на поляризация – HH, VV, HV и VH – което позволява подбор на SAR данни, ориентирани към решаване на конкретни задачи от практиката. Единичният сателит от мисията S-1 е с размери 2,8 на 2,5 на 4 метра с два 10-метрови слънчеви панела (4.8 кВт) и 12-метрова SAR антена (880 кг). Приблизителна схема на сателита е показана на фигурата по-долу.

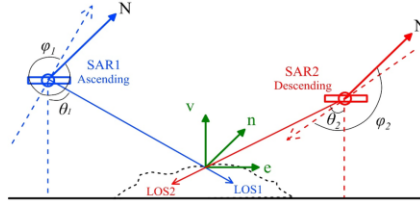


Фигура 3.2.8.1. Сателит от мисията S-1



### 3.2.8.2. Орбитални елементи на сателитния PCA S-1

Регистрацията на SAR данните от РИК S-1 се извършва при два вида орбити на сателита – възходяща с посока от юг на север и низходяща с посока север-юг. Самата орбита е квазиполярна, слънчевосинхронна с цикъл на повторение 12 дни и 175 орбити на цикъл за един сателит. Квазиполярната орбита на сателита се определя от ъгъла по земния терен между посока север и проекцията на орбитата върху терена (означена с пунктирна линия на фигура 3.2.8.2.), независимо от вида на орбитата. Както се вижда от същата фигура този ъгъл е близо до  $360^{\circ}$  за възходящите орбити и до  $180^{\circ}$  за низходящите, което води до невъзможност да се регистрират движения по земната повърхност в посока юг-север (Traglia et. al., 2021). Фактът, че орбитите са слънчевосинхронни осигурява преминаването над едни и същи площи от земната повърхност приблизително по едно и също време на денонощието.



Фигура 3.2.8.2. Геометрия при регистрация на PCA данни от РИК S-1

Както бе казано по-горе цикълът на повторение е 12 дни, но с оглед осигуряване на по-често повторно преминаване е желателно да се използват два сателита с идентични РИК, разположени по орбитата на  $180^{\circ}$  един от друг и по този начин се гарантира намаляване на периода между две регистрации до 6 дни за територията на Европа. При необходимост е възможно орбитата на сателита да бъде променяна с оглед регистрации над определена територия, което най-често се прави при извънредни събития с естествен и антропогенен произход като напр. земетресения.

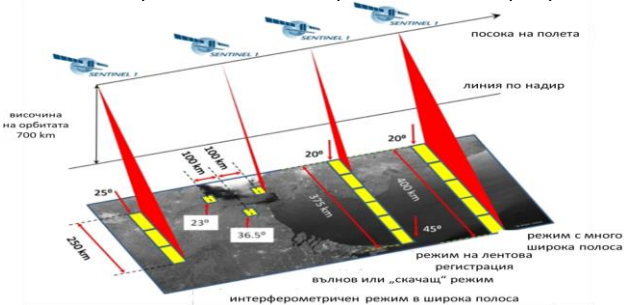
Друга важна особеност при орбиталните параметри на S-1 е включването към данните на точното местоположение на сателита в “тороида”, който се формира от всички орбити, по които единият или двата сателита са преминавали след своето извеждане в орбита. Съгласно изискванията при експлоатацията диаметърът на окръжността, която формира единичен разрез на тороида следва да се следи постоянно и строго да се поддържа в границите  $0 - 200$  m. Тези изисквания се поставят от основната функция на радарен измервателен комплекс S-1, за да се предоставят SAR данни за създаване на интерферометрични изображения, които позволяват прецизно изследване на деформационни процеси по земната повърхност с точност до 1 cm.

Местоположението на единичен сателит по орбитата се определя от два типа сензори:

- 1) звездни сензори, прецизни слънчеви сензори, магнитометри и прецизен жирокоп;
- 2) два двучестотни GPS приемника в L-обхват, които при обработката на L1 и L2 сигнали от осем GPS сателита предоставят точност около 3 m за положение и 3 mm/s за скорост на сателита.

### 3.2.8.3 Режими на работа на PCA S-1

Получаването на PCA данните се извършва в четири режима – режим на лентова регистрация (Stripmap - SM); интерферометричен режим в широка полоса (Interferometric Wide - IW); режим с много широка полоса (Extra Wide – EW); вълнов или „скачащ“ режим (Wave – WV) – като всеки един от тях се използва при специфични приложения. Например режимът на регистрация EW се използва при изследвания на морски площи и полярни райони.



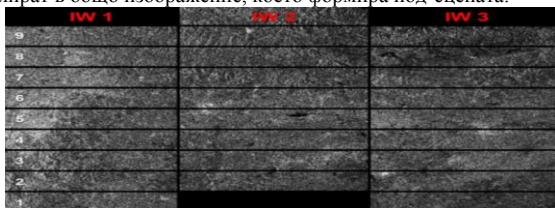
Фигура 3.2.8.3.1. Режими на регистрация на S-1. (Flores et.al., 2019)

Основните режими на регистрацията на РИК S-1 са - IW с VV+VH поляризация над сушата и WV с VV поляризация над открити морски площи. Режимът EW се използва предимно за наблюдение на крайбрежни зони, включително наблюдение на корабния трафик, нефтени разливи и наблюдение на ледени площи в близост до моретата. Режимът SM се използва изключително за наблюдение на малки острови и при необходимост за реакция при извънредни събития напр. управление на извънредни ситуации.

Режимът на регистрацията т.е.интерферометричен режим в широка полоса е основен режим на работа на S-1, тъй като удовлетворява текущите изисквания за получаване на PCA данни за оперативните мониторингови услуги по програма „Коперник“ (напр. EGMS). От своя страна дълговременната, безпроблемна работа на S-1 води до създаване на пълен архив от данни, което гарантира високо качество на получаваните от PCA данните.

Този режим на работа прилага един нов метод за регистрацията познат като наблюдение на терена с прогресивно сканиране (Terrain Observation with Progressive Scan – TOPS), който се осъществява чрез бързо управление на лъча на антената във височина и излъчване на EM импулси към части от сцената, формираща под-сцени, с бързо електронно азимутно сканиране на всяка такава част, за да се синхронизира производителността по протежение на орбиталната следа по терена и осигуряват комбинация от големи ширини на под-сцената и висока ИРС.

По този начин няколко под-сцени се регистрират псевдосинхронно чрез превключване от една под-сцена към друга под-сцена между радарните импулси. По този начин в рамките на една под-сцена се формират няколко ивици (bursts фигура 3.2.8.3.2) по азимут, които имат застъпване около 2 km. по земната повърхност. Благодарение на това застъпване се осигурява непрекъснатост на изображението на под-сцената и в процеса на обработката то се елиминира като две по две ивиците се ресемплират в общо изображение, което формира под-сцената.



Фигура 3.2.8.3.2 Сцена с формирани няколко ивици (bursts) по азимут.

#### 3.2.8.4. Данни регистрирани от PCA на S-1

След регистрацията необработените PCA данни се съхраняват в компресиран вид на борда на РИК, но за да могат да бъдат тематично обработвани е необходимо да бъдат разкомпресирани и подложени на предварителна обработка в квази-реално време. Получаваните необработени данни се предават до четири наземни приемни станции (Норвегия, Аляска, Испания и Италия – посредством отделна радиокommunikационна линия в X-обхват). След получаването им в един от специализираните центрове за приемане на данни те се архивират и се прехвърлят за предварителна обработка в наземния сегмент за обработка на данни от PCA, намиращ се в Оберпфафенхофен, Германия. След предварителната обработка данните и придружаващите ги метаданни (напр. информация за конкретната орбита) се съхраняват във формат на ниво на обработка L-0 и са достъпни около 3 часа след регистрацията им.

#### 3.2.8.5. Формати на данните от S-1

##### Категоризация в зависимост от нивото на обработка

Както бе казано по-горе след регистрацията данните се съхраняват на борда на РИК във формат за ниво L-0. Тези L-0 информационни продукти се състоят от компресирани и нефокусирани „сурови“ данни от РИК. Продуктите от ниво 0 са основните, от които след обработка се получават останалите продукти от по-високо ниво. Данните от ниво L-0 включват пакети за шум, вътрешно калибриране и източник на ехо, както и информация за орбита и позиция на сателита. Продуктите от ниво L-0 се съхраняват дългосрочно в електронни архиви. Те могат да бъдат обработени, за да генерират продукти от останалите нива по време на продължителността на мисията и в продължение на 25 години след края на работата на космическия сегмент от нея. Продуктите от ниво L-0 са достъпни за потребителите на данни само за режимите SM, IW и EW.

Данните, обработени до ниво L-1 са продуктите предназначени за по-голямата част потребители на PCA данни. Продуктът от ниво L-1 се получава от продукт от ниво L-0 след обработка по алгоритмите за начална обработка на данни от РИК чрез последователно им прилагане. Продукти от ниво L-1 формират основния информационен продукт, от който се

създават продукти от ниво L-2. Стъпките на обработка, които се изпълняват за достигане до продукти ниво L-1, включват предварителна обработка (анализ на изходните данни от L-0 и вътрешно калибриране), оценка на доплеровия центроид, комплексно фокусиране с единичен поглед и последваща обработка на изображения за генериране на SLC и GRD продукти (следващите параграфи), както и специфична обработка за режим за слобяване на множество под-сцени в единичен продукт .

Данните ниво L-1 се обработват до PCA продукт с единичен поглед (Single look complex SLC) и/или до регистрация на терена по обхват (Ground range detected - GRD) продукт. Продуктите SLC запазват информация за фазата и се обработват при разстояние между пикселите от изображението равно на това при регистрацията, докато продуктите GRD съдържат амплитудата на отразения от обектите по терена сигнал и при тях е приложена процедурата „многократен поглед“ с цел намаляване на ефекта зърнистост. И за двата продукта освен реалните PCA данни се създава и изображение за бърз преглед, което служи за ориентация по местоположение на конкретния продукт. Информацията за фазовия сигнал, която е част от SLC продуктите е задължително условие за обработка по метода DInSAR, тъй като тя се използва за формиране на ЦМР или за регистрацията на деформации по земната повърхност от типа на слягания на терена или премествания в хоризонталната равнина.

PCA изображенията с единичен поглед (SLC) се регистрират при наклонена геометрия и при тях визирната линия „обхожда“ обектите по земната повърхност. Тези данни са фокусирани данни, които се предоставят с пълната разделителна способност (единичен поглед) в момента на тяхната регистрация по обхват и азимут от РИК. В този продукт информацията за амплитудата и фазата се съхранява за всеки пиксел под формата на комплексно число, на което реалната му част съхранява амплитудата на PCA сигнала, а в имагинерната се запазва стойността на фазовия сигнал. В зависимост от режима на регистрацията (вж. 3.2.8.3) в продукта има различен брой под-сцени – при SM е една за всяка поляризация, за IW са три при единична поляризация, съответно шест при кросполяризация и в EW са пет при единична поляризация, съответно десет при кросполяризация. За режими IW и EW всяка една под-сцена е съставена от определен брой ивици (bursts) по азимут, които са разделени с линии, в които са разположени стойности „няма данни“. Впоследствие въз основа на прецизната информация за всяка ивица, която включва размери, местоположение и време на регистрацията, е възможно да се „слейт“ ивиците и под-сцените в едно общо PCA изображение.

SLC продуктите обикновено се предоставят в оригиналната геометрия за наблюдение по наклонен обхват и следователно не са геокодирани или с приложена корекция за влиянието на релефа. За разлика от повечето оптични сензори, естествената разделителна способност на PCA често е значително различна по азимут и обхват в рамките на изображението. Следователно, SLC изображенията често изглеждат геометрично изкривени, когато се разглеждат преди геокодиране в софтуер за обработка на изображения. Докато SLC продуктите обикновено се предоставят с вече приложени радиометрични коефициенти за калибриране, шумът от некохерентните отражатели остава в тези продукти и затова в процеса на обработка (но не в самото начало) трябва да се прилага филтрация за да се намали този нежелан ефект.

Продуктите от ниво 1 за тип **GRD** се състоят от фокусирани PCA данни. Координатите на обхвата по терена са координатите по наклонения обхват на регистрацията, проектирани върху елипсоида на Земята. Стойностите от това PCA изображение представляват регистрираната от РИК амплитуда, а информацията за фазата се игнорира. Полученият продукт има пиксели с приблизително квадратен размер и еднакво разстояние между тях като е приложена обработка за намаляване на ефекта „зърнистост“-Multilooking, което е за сметка на намаляване на пространствената разделителна способност на изображението. При тях е приложена обработка за (мултилукинг) „многократен поглед“ като за продукти регистрирани в режими IW и EW тя се извършва за всяка ивица поотделно. Това позволява всички ивици и всички под-сцени да се обединят безпроблемно, формирайки едно непрекъснато PCA изображение на терена за всеки един от режимите на поляризация. След това се прилага трансформация от радарни координати в географска проекция към елипсоид WGS84. Елипсоидната проекция на GRD продуктите се коригира с помощта на височината на терена, посочена в метаданните към продукта. Продуктите от L-2 попадат в категорията данни готови за анализ и представляват геокодирани геофизични променливи, получени от PCA данни, обработени до L-1. Тези продукти са предназначени за изследване на морски и океански площи и позволяват изучаване на ветрово натоварване, вълнение и течения.

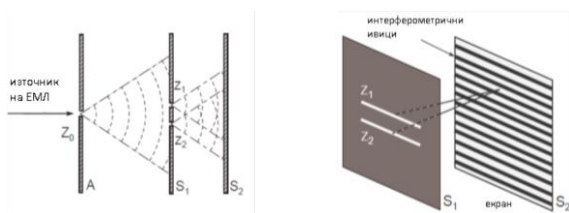
### 3.3. Интерферометрична обработка на данни от PCA

Интерферометричната обработка на данни от PCA е мощен и утвърден активен метод за дистанционни изследвания на Земята. Тя позволява високоточно измерване на важни геофизични

параметри като топография на повърхността, деформации и слягане на терена в резултат на различни ендеогенни (напр. земетресения, тектонски процеси, изригвания на вулкани и др.) и екзогенни процеси (напр. дейности при добив на нефт и газ, добив на вода от подземни кладенци), а също така движения на ледници и други. Основната идея на SAR интерферометрията е да се сравняват стойностите на фазовия сигнал от две или повече комплексни радарни изображения, които са били получени от малко различни позиции в пространството или по различно време, тъй като фазата на всеки пиксел на PCA изображението съдържа информация за разстоянието по визирната линия на антената от нея до земната повърхност. Това разстояние се измерва с точност до част от дължината на вълната на радара и по този начин е възможно да се регистрират малки разлики в дължината на пътя ЕМС със сантиметрова или дори милиметрова точност. Необходимо условие за постигане на тази висока точност е излъчвания и обратно регистрирания радарни сигнали в минимум две PCA изображения да са кохерентни, което се осигурява от високоточен осцилатор, разположен на носител и позволява тези изображения да бъдат съотнесени един към друг с висока точност в пространството и времето.

### 3.3.1. Принцип на създаване на интерферометрично изображение

За да бъде обяснен принципа на създаване на интерферометрично изображение ще бъде разгледано неговото формиране, използвайки вълна от видимата област на ЕМ спектър. То се създава посредством реализация с един светлинен източник, една равнина с единичен процес, втора равнина с два процепа и фоточувствителна повърхност. Тази схема е реализация на експеримента на Юнг (<https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/27-3-youngs-double-slit-experiment/>) и е показана на фигура 3.3.1.1.



Фигура 3.3.1.1. Принцип на създаване на интерферометрично изображение - експеримент на Юнг

В показаното изображение тъмните ивици представляват минимумите, където е възникнала деструктивна интерференция и вълните се „гасят“ взаимно. Това е така, тъй като разликата в разстоянието което се изменява от единия от двата лъча е с  $\frac{1}{2}$  от дължината на ЕМ вълна по-дълго от това на другия т.е. получава се дефазироване на сигнала на  $90^\circ$  и съвпадат максимум с минимум. Съответно, светлите ивици представляват максимумите, където възниква конструктивна интерференция и амплитудите на вълните от двата процепа се сумират една с друга, защото дефазироването е на  $180^\circ$  и максимумите съвпадат. Тази поредица от светли и тъмни ивици, които се наричат интерферометрични ивици формира интерферометричното изображение.

### 3.3.2. Интерферометрично изображение от PCA

Поради вълновия характер на радарния сигнал от PCA споменатите в предходната част, принципите за формиране на интерферометрично изображение са валидни в пълна степен и се прилагат за неговото получаване. Единствената особеност в конкретната реализация е, че вместо два процепа в непрозрачната преграда се използват обратно отразените от земната повърхност PCA сигнали в два различни момента във времето. Изхождайки от вълновото разпространение на ЕМ сигнал в споменатите в т. 3.2.2 обхвати, където работят споменатите дотук РИК, описаната схема за създаване на интерферометрично изображение (ИФИ) от данни от PCA в най-общи линии е сходна. За разлика от двата процепа в равнината  $S_1$ , ЕМ сигнал се формира от излъчващата антена на РИК при две последователни преминавания на сателита над една и съща площ на земната повърхност. В тази връзка следва да се подчертае, че е задължително ЕМ сигнал да бъде кохерентен с висока точност при двете регистрации на данни от РИК, което гарантира висока надеждност на интерферометричните измервания по метода на Юнг/Майкелсън ([https://wanda.fiu.edu/boeglinw/courses/Modern\\_lab\\_manual3/michelson.html](https://wanda.fiu.edu/boeglinw/courses/Modern_lab_manual3/michelson.html)). По този начин се реализират измервания на промените в разстоянията до конкретен обект, които са от порядъка на дължината на вълната на ЕМ сигнал. Особеност на ИФИ е, че то се формира от две отделни PCA изображения, при всяко едно от които тримерното пространство (XYZ) се проектира в двумерно, в което координатите са обхвата и азимута и са познати като радарна геометрия. Причината за

наклонената геометрия на регистрация на РСА, е че той работи ефективно само когато радарният лъч е насочен под ъгъл, далеч от надир. Това се дължи на следните причини, свързани с геометрията при регистрация и физическите процеси при формиране на радарното изображение:

**Повърхностно разсейване/отражение** – за да създаде изображения РИК разчита на обратното разсейване/отражение на радарни сигнали от повърхността на Земята. При регистрация в надир радарните сигнали обикновено се отразяват обратно към радара, което води до т.нар. огледално отражение, а такъв тип отражение не осигурява необходимите вариации в сигнала, необходими за формиране на детайлни изображения. От друга страна чрез насочване на радара под ъгъл извън надира се осигурява дифузно разсейване, при което сигналите се отразяват в множество посоки и това позволява на радара да регистрира данни, по-добре характеризиращи изследваните обекти от земната повърхност.

**Наклонен обхват и пространствена разделителна способност** – разделителната способност на РСА изображенията зависи в голяма степен от наклонения обхват (моментното разстояние между антената и площта от земната повърхност по визирана линия) и разделителната способност по обхват (възможността да се разграничат два обекта от земната повърхност по посока на радарния лъч). При надир разделителната способност на обхвата е лоша, тъй като разстоянието до обекта варира минимално. С увеличаване на ъгъла извън надир се подобрява способността на РИК за разграничаване на обекти, намиращи се на различни разстояния.

**Създаване на синтезирана апертура** – принципът на работа на РСА за формиране на синтезирана апертура е чрез преместване на носителя и получаване на множество сигнали за конкретен времеви интервал. При регистрация в надир относителното движение между РИК и наземните обекти е минимално, което намалява ефективността на този метод. При работа извън надир се осигурява по-добро доплерово изместване на честотата при движението на радара, което е от съществено значение за генериране на синтезирана апертура и създаване на изображения с висока разделителна способност.

**Геометрични дефекти в РСА изображенията** – при регистрация в надир, полученото РСА изображение притежава значителни геометрични изкривявания и ефекти на наслагване, при което по-високи обекти (напр. планини или сгради) изглеждат като наклонени или се припокриват в него. При РСА изображения получени извън надир тези изкривявания са по-малки, тъй като се предоставя по-добра перспектива, при която радарът може да улови по-точно пространствените взаимоотношения между различните обекти по терена.

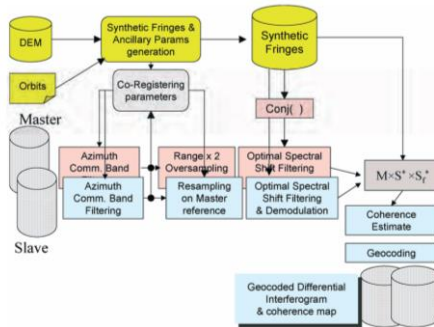
**Проникване на сигнала и взаимодействие със земята** – взаимодействието между радарния сигнал и земята е по-ефективно при ъгли извън надира. Сигналят може да прониква по-ефективно през повърхности като растителност или сняг, предоставяйки по-добра информация за подземните характеристики или условията на земята.

SAR данните регистрирани от РИК се състоят от матрица с комплексни стойности на единичен отпечатък върху повърхността (наричан още земен елемент). По този начин всички отпечатъци в обхват и азимутни посоки образуват изображение. Реалната част на единичен матричен елемент съответства на амплитудата на отразения сигнал, а имагинерната част представлява фазата му. За по-нататъшната обработка на SAR данните тяхната предварителна обработка е съществена стъпка, която извършва вътрешно калибриране, отчита доплеровите промени, подобрява пространствената разделителна способност по обхват и азимут.

Решаваща стъпка при получаване на стойностите за възникналите повърхностни премествания е трансформирането на фазовите стойности от  $[-\pi; \pi]$  интервал до кратни на  $\pi$ , известен като фазово разгръщане. Тъй като тази процедура не е проста, е необходима точно определяне на нейните параметри в няколко итерации. След преобразуването с разгъване, целите числа, кратни на  $\pi$ , трябва да бъдат трансформирани в метрични единици премествания в линията на видимост (LOS) на РИК.

### 3.3.3. Блок-схема за създаване на ИФИ от РСА

Задължителните входни данни за генериране на интерферограма са две изображения от Single Look Complex (SLC). Те се наричат главно (master) и подчинено (slave). Значението ще бъде изяснено в следващия раздел. Тези изображения трябва да имат подходяща базова линия (минимална). Алгоритъмът за създаване на интерферометрично изображение от РСА е илюстриран в блоковата диаграма на Фигура 3.3.3.1. Този алгоритъм може да се използва за генериране, както на интерферограми, така и на диференциални интерферограми, т.е. интерферограми, коригирани от „известна“ топография, предоставяна като цифров модел на релефа. Според блоковата схема на фигура 3.3.3.1. освен двете интерферометрични SLC изображения, DEM на изобразената площ също се включва в обработката и трябва да е наличен. Ролята на DEM е двойна. Първо се използва, във връзка с точното познаване на сателитните орбити, за оценка и компенсирание на топографията в крайната интерферограма.

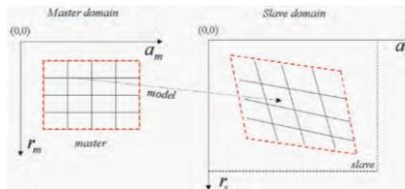


Фигура 3.3.3.1. Схематична блокова диаграма на интерферометричен процес ([https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19\\_ptB.pdf](https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptB.pdf))

В крайна сметка това създава „диференциална“ интерферограма, подходяща за наблюдение и откриване на промени на земната повърхност. Второ, DEM се използва за осигуряване на оптимално премахване на „декорелация на базовата линия“. В много случаи DEM не е наличен и вместо това се приема плосък профил на надморска височина. В резултат на това крайната интерферограма просто ще бъде компенсирана за елипсоидната Земя или „сплесната“ и схемата на обработка от фигура 3.3.3.1 се прилага, но с някои опростявания.

### 3.3.4. Съвместна регистрация на изображения от РСА

Стъпката на съвместна регистрация е фундаментална при генерирането на интерферограма, тъй като гарантира, че всяка наземна цел допринася за един и същ (обхват, азимут) пиксел както в главното, така и в подчиненото изображение. В идеален случай на перфектни паралелни орбити и подравнени придобивания, съвместната регистрация би трябвало само да компенсира различната геометрия, дължаща се на различия в ъгъл на гледане (ефектът на паралакса). Правилното подравняване на пространството между двете изображения трябва да се извършва на базата на пиксел по пиксел, с точност от порядъка на една десета от разделителната способност или по-добра.



Фигура 3.3.4.1. Модел на регистриране на подчинено изображение върху референтната мрежа на главното изображение; изместването на азимута и обхвата, разтягане и въртене ([https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19\\_ptB.pdf](https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptB.pdf))

### 3.3.5. Създаване на интерферометрично изображение от РСА

Интерферометричният радар със синтезирана апертура (InSAR) използва фазовата разлика между две сложни радарни SAR наблюдения, взети от малко различни позиции на сензора и извлича информация за земната повърхност. SAR сигналът съдържа информация за амплитудата и фазата. Амплитудата е силата на радарното отражение, а фазата е част от един пълен цикъл на синусоида (единична SAR дължина на вълната). Фазата на SAR изображението се определя основно от разстоянието между сателитната антена и наземните цели.

Комплексната интерферограма, генерирана от тези две изображения, има интерферометрични ивици, които представляват различните компоненти на информацията за фазата на интерферограмата  $\Phi_{int}$ , както следва:

$$\Phi_{int} = \phi_{elev} + \phi_{disp} + \phi_{atmos} + \phi_{flat} + \phi_{noise} \quad (6)$$

където  $\phi_{elev}$  е топографската фаза;

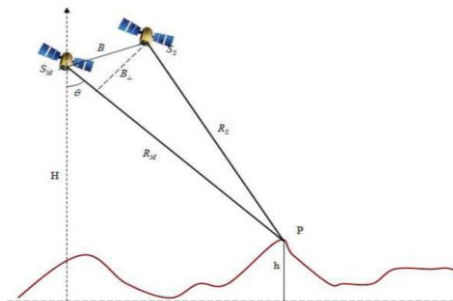
$\phi_{disp}$  фазата на преместване, която се причинява от деформацията на местоположението на пиксел на земната повърхност по дължината на визирната линия (наклонен обхват);

$\phi_{atmos}$  е атмосферната фаза, която е грешка при забавяне на сигнала, причинена от

променящите се атмосферни условия във времето и пространството;

$\phi_{flat}$  е фазата на плоската земя, което е грешка, причинена от кривината на референтната повърхност;

$\phi_{noise}$  е фазата на шума, причинена или от променливост в разсейването от пиксела на земната повърхност, топлинен шум или грешки при съвместна регистрация.



Фигура 3.3.5.1. Геометрия на InSAR придобиване (Muja & Vasile 2012)

Целта - пиксела на земната повърхност  $P$ , разположена на височина  $H$ , се регистрира от две радарни изображения  $S_m$  (master) и  $S_s$  (slave). Разстоянието между  $S_m$  и  $S_s$  представлява интерферометричната линия  $B$ , от която се определя базовата перпендикулярна линия.  $R_m$  и  $R_s$  представяват разстоянията между сензорите и целта. SAR интерферограмата се генерира чрез кръстосано умножаване, пиксел по пиксел. Така амплитудата на интерферограмата е амплитудата на първото изображение, умножена по тази на второто, докато интерферометричната фаза е разликата във фазата между изображенията. Чрез интерферометричната обработка винаги се опитваме да елиминираме други източници на грешки, за да останем само с допринасящия ефект, който обикновено е фаза на издигане или фаза на преместване, чиито стойности са обвити между  $-\pi$  и  $+\pi$ . Чрез комбиниране на фазата на тези две изображения след съвместна регистрация може да се генерира интерферограма, чиято фаза е силно свързана с топографията на терена. В случай на диференциална интерферометрия (DInSAR), този принос на топографска фаза се премахва с помощта на цифров модел на терена (DEM). Останалото изменение в интерферограмата може да се припише на повърхностни промени, настъпили между двете дати на получаване на изображението, както и на нежелани атмосферни ефекти.

#### 4. Методология за обработка на данни от PCA

##### 4.1. Процедура за обработка на SLC данни по диференциален интерферометричен метод

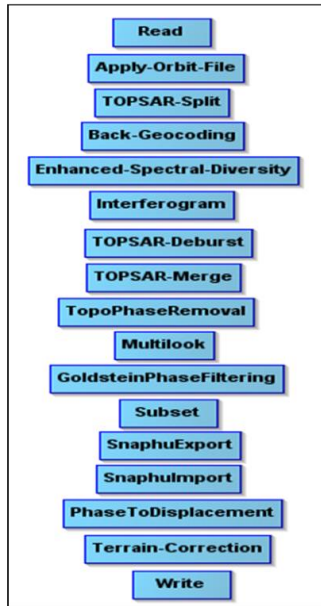
Целта на тази част е да се даде методологията за обработка на SAR данни, която да предостави възможности на обработка на данни от PCA от Sentinel-1 продукти - TOPS за интерферометрия с помощта на софтуера със свободен достъп SNAP (Sentinel Application Platform) (Veci 2016). Основните стъпки са представени тук, като е обосновано тяхното предназначение за включването им в процедурата по обработка на SAR продукти. Пълно и подробно описание на последователността на изпълнение, необходимите параметри и коефициенти които се въвеждат и спецификата са дадени в Приложение 1. Основен източник на данни са SAR данни от Sentinel-1 под формата на изображения на амплитудния и фазовия сигнал, които заедно с метаданните формират конкретен продукт. Резултатите се получават с прилагане на метода на диференциалната радарна интерферометрия.

##### 4.1.1. Подбор на подсцени, които включват района на изследване

Както бе споменато SAR даните могат да се придобият от Copernicus Open Access Hub на адрес: <https://scihub.copernicus.eu/dhus>, и са в компресиран (zip) формат. Друга възможност за изтегляне на данни е Огледалното хранилище на данни на NASA. <https://asf.alaska.edu/>; <https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/insar/>.

##### 4.1.2. Обработка на TOPS DInSAR (TOPS DInSAR Processing)

На фигура 4.1.2 е представена блок-диаграма на процеса на обработка на ИФИ до достигане на крайния продукт, създаване на карта на преместванията, настъпили след конкретно събитие (земетресение, вулкан, свлачища, срутища, техногенни процеси и др.)



Фигура 4.1.2. Блок-диаграма на процеса на обработка на TOPS продукти по метода DinSAR

#### 4.1.2.1. Подбор на ивици - Split S1 TOPS SLC

Извлича избрани слотове (sub-swath), ивици (bursts) и поляризация от оригинален продукт на Sentinel-1 SLC. Операцията се изпълнява поотделно за двете изображения със същите параметри. Всеки SAR продукт съдържа метаданни, информация в векторни слоеве и данни за точките от грида, данни за трите слота IW1, IW2, IW2. Данните съдържат информация за типа поляризация VV и VH, виж фигура 4.1.2.2. Всяко изображение, както вече се спомена съдържа 3 колони/слота(slots) и всеки слот има 9 ивици (bursts), (виж фигура 3.2.8.3.2).

**4.1.2.2. Прилагане на прецизни орбитални файлове към продукта / Update Orbit State Vectors**  
 Спомагателните данни на орбитата съдържат информация за позицията на спътника по време на придобиването на SAR данни, използвайки точни (прецизни) ефемериди или възстановени по метаданните орбитални файлове.

**4.1.2.3. Корегистрация на двата продукта посредством ЦМР (DEM-assisted TOPS SLC registration) (step 1/2)**

Геометрично съвместно регистриране на SLC, използвайки информация за орбита и DEM. Трябва да се избере подходящ DEM (т.е. SRTM 1sec HGT)

**4.1.2.4. Корегистрация TOPS SLC Coregistration (ESD correction) (step 2/2)**

Извършва корекции в подчиненото изображение по обхват и азимут в “бърстове-те“/ивици/ на припокриващите се региони (области) от TOPS данните. Този оператор е необходим само когато се обработва повече от една ивица.

**4.1.2.5. Прилагане на шаблон за корекция на антената**

При някои от първите данни, придобити от S-1A между ноември 2014г. и март 2015г. се налага да се нанесе тази корекция

**4.1.2.6. Генериране на интерферограма с оценка на кохерентността/ Interferogram Generation (incl. Coherence)**

Генерира се интерферограмата и съответните нива на съгласуваност – кохерентност от регистрираните SLC изображения. Интерферограмата се получава чрез кръстосано умножаване на комплексно спрегнатите стойности на пикселите от главното и подчиненото изображения.

**4.1.2.7. Премахване границите между отделните ивици в подцената на продукта TOPS SLC Deburst / обединява ги в един продукт**

Създава се продукт, обединяващ последователни бърстове /ивици/.

**4.1.2.8. Премахване на топографска фаза /Topographic Phase Removal**

Прилага се отстраняване на приноса на релефа във фазовия сигнал. В интерферограмата вече се съдържат само промените, дължащи се на премествания на земната кора, атмосферата и вътрешен



шум на апаратурата.

#### 4.1.2.9. Интерферометрично фазово филтриране/Interferometric Phase Filtering

Фазово адаптивно филтриране за подобряване на визуализацията и подпомагане на следващата стъпка за разгъване. Фазовия сигнал в интерферометричното изображение може да бъде изкривен от шум, дължащ се на времевия и геометрична декорелация, обемно разсейване и други грешки при обработката. Информацията за фазата в декорелираните области не може да бъде възстановена, но качеството на интерферометричните ивици, съществуващи в интерферограмата може да бъде подобро чрез прилагане на специализирани фазови филтри, като напр. филтър по Goldstein, който използва бързо преобразуване на Фурие (FFT) за подобряване на съотношението сигнал/шум в изображението. Това е необходимо за правилно разгъване на фазата на следваща стъпка.

#### 4.1.2.10. Допълнителна филтрация за намаляване на шума и формиране на квадратен пиксел.

Преобразува пиксел в квадрат. Като цяло, оригиналното изображение изглежда преобладаващо с ефекта „сол/пипер“. За да се намали този външен вид, няколко изображения се комбинират некохерентно, като да отговарят на различен поглед към една и съща сцена.

#### 4.1.2.11. Подмножество - област на интерес / (AOI) Subset over Area Of Interest (AOI)

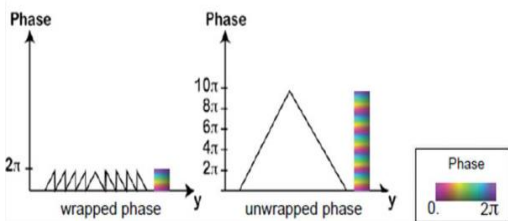
Това е незадължителна стъпка, но позволява намаляване на размера на продукта и времето за обработка

#### 4.1.2.12. Геокодиране-теренна корекция, трансформация в координатна система/ Terrain Correction Geocoding

Извършва се теренно геокодиране на SAR данни към WGS84, а може да се изберат и различни проекции.

#### Разгъване на фаза (Phase Unwrapping)

Днес процесът на разгъване може да бъде направен много по-лесно, изцяло в рамките на SNAP. До преди няколко години този процес беше един от най-трудоемките и с най-голяма продължителност. Използваха се виртуални машини (2015-2019 г) в среда на UNIX. Файловете с SAR данни са експортирани и импортирани в тази среда и са обработвани със Snaphu.



Фигура 4.1.2.15 Визуализация на неразгъната и разгъната фаза

#### 4.1.2.13 Използване на плагин snaphu в SNAP /Usage of snaphu plugin inside SNAP

Външен софтуерен пакет, Snaphu (за разгъване на фазите) трябва да бъде инсталиран отделно. Повече информация относно този инструмент може да се намери на <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>.

#### 4.1.2.14. Извеждане (Експортиране) на файлове в SNAPHU формат Export to SNAPHU format

Извежда диференциални InSAR фази и оценки на кохерентността в съвместим с SNAPHU формат.

#### 4.1.2.15. Разгъване на фазата/ Unwrapped-Phase

Тази процедура се използва за създаване на връзката между фазовия сигнал и разтоянето в метрични единици. Преди нея фазата е в обхвата  $2\pi$  (0.056m) и не е еднозначна, а след нея интерферограмата отговаря на реалните проместни. ( виж фиг. 4.1.2.15)

#### 4.1.2.16. Внасяне (Импортиране) на разгънатата от SNAPHU фаза/ Import Unwrapped from SNAPHU results

Въвеждане на разгънатия от Snaphu фазов канал обратно в SNAP. Разгънатите фази са в радиани и са цели стойности на  $\pi$ .

#### 4.1.2.17. Преобразуване на фаза в преместване в LOS /Phase to displacement conversion

Преобразуване на разгънатите фази в премествания по визирната линия на радара с дименсия метър. Изчисляване на преместванията в LOS и теренно геокодиране (Calculate Displacements and Terrain Geocode)

#### 4.1.2.18. Теренна Геокодирана корекция / Terrain Correction Geocoding

Извършва базирано на терена геокодиране на SAR данни към избрана картна проекция.

#### 4.1.2.19. Визуализиране на продукта/ Прехвърляне в Google Earth /Export to Google Earth

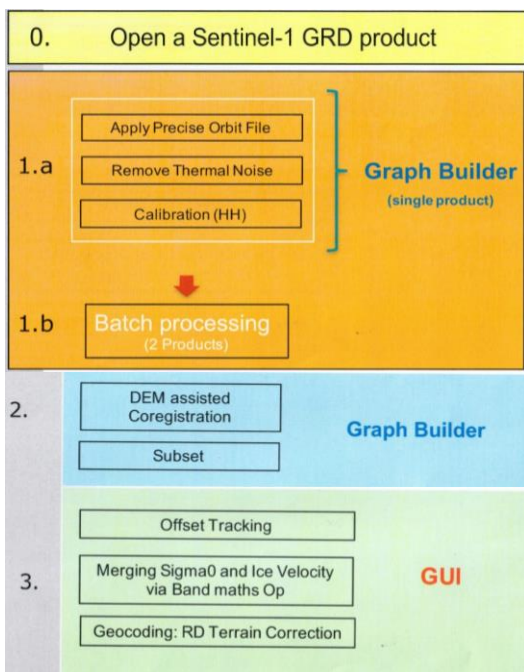
Извеждат се геокодирани продукти във формат Google Earth за визуализация.

#### 4.1.2.20. Изчертаване на профили в SNAP

Дава възможност за създаване на профили по различни направлния, приложими за определяне, анализ и по-добра визуализация на настъпилите премествания /потъвания/.

### 4.4.Методология за обработка на GRD данни за мониторинг на ледници и наводнения

GRD продуктите от ниво 1 се получават чрез по-нататъшна обработка на SLC продуктите. Тези продукти не съдържат информация за фазата на вълната, но са филтрирани за шум и геометричните изкривявания са премахнати. Данните, използвани за наблюдение на скоростта на ледник са SAR продукти от мисия Sentinel-1A. Продуктите GRD от ниво 1 са придобити в IW режим с висока пространствена разделителна способност. За да се получат крайните продукти, е необходимо да се премине през няколко стъпки (виж фиг. 4.4.1) - блок схема.



Фигура 4.4.1. Блок – диаграма на процеса на обработка на GRD данни за мониторинг на ледници

Предложен е алтернативен начин на обработка и добавяне на допълнителни стъпки в процеса на обработка и създаване на **граф** (фиг. 4.4.2. и 4.4.3). Първата част от веригата на обработка е представена схематично на фигура 4.4.2 продуктите се импортират в софтуерния продукт на ESA – SNAP). В следващата стъпка е необходимо да се осигури пълно покритие на площта на ледника от изходните данни, преди да се премине към оценка на скоростта на ледника.

Добавят се данни за точните ефемериди на сателита по време на формирането на продуктите. Тази стъпка е необходима за алгоритъма за съвместна регистрация.

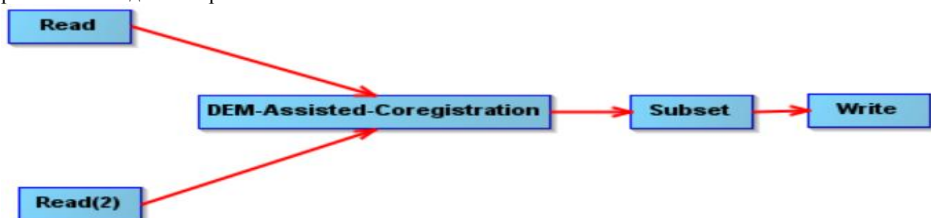
Целта на калибрирането е да се достигне до точните стойности на обратно отразения сигнал за всеки от пикселите. Причината е, че при формирането на продуктите, които се предоставят на потребителите, необработените данни, регистрирани от сензора, преминават през обработка, която внася известно количество шум. Този шум може да се филтрира чрез калибриране. Трябва да бъде избрана „**sigma0**“ за изходния продукт, както се посочва земната повърхност и отчита релефа на района.



Фигура 4.4.2. Граф на предварителната обработка на всеки GRD продукт

Извършва се съвместна регистрация на продуктите (**корегистрацията**), като се използва геометрията, орбиталните елементи и време. Прилага се алгоритъм с помощта на DEM, който служи за точно наслагване на пикселите, като се вземат предвид и височината им. Местоположението на изследвания обект ограничава избора на височинни модели с отворен код, тъй като не всички имат покритие в регионите над и под 60° ширина. За целта е използван височинен модел ACE30, който обхваща площта на ледника. (фиг. 4.4.3).

Стъпката на съвместна регистрация (корегистрацията) е от съществено значение, тъй като гарантира, че всеки елемент от земната (ледената) повърхност съответства на един и същ пиксел (по обхват и азимут) както в главното, така и в подчиненото изображение. В идеалния случай съвместната регистрация трябва да компенсира само различната геометрия поради различния зрителен ъгъл (паралакс ефект), който може да бъде компенсиран чрез правилното напречно разтягане на едно изображение.



Фигура 4.4.3. Граф на предварителната обработка на всеки продукт съвместна регистрация на два GRD продукта, като се използва в информацията за DEM.

Проследяването на отместване „**Offset Tracking**“ е техника, която измерва преместването между две изображения, като използва корелационна оптимизация на интензитета на пиксела. Тази методология се използва широко при оценка на движението на ледниците. Стойностите на скоростта се изчисляват за всички пиксели чрез интерполация.

**Корекция на терена** е свързана с нанасяне на корекция заради релефа. Необходимо е да се приложи, за да се коригират изкривяванията, дължащи се на топографските вариации, радарната геометрия и наклона на сателитния сензор. Използва се и за проектиране на изходния продукт в географска проекция. В този алгоритъм отново се използва моделът на надморска височина ACE30. Използвана е проекцията на UTM зона 20 за южното полукуълбо.

## 5. Изследване на косеизмични деформации на земната кора за територията на Балканския полуостров

Земетресенията са природни бедствия, причиняващи щети, които се измерват с човешки животи и разрушения на сгради, инфраструктурни обекти, както и други части от градската среда. Ефектите от земетресенията са функция на няколко случайни фактора, вариращи в широки граници, които трябва да бъдат адекватно моделирани въз основа на физически съображения и наличните сеизмични данни. Важна задача след настъпването на подобно събитие е изготвянето на подробен план за преодоляването им, който се основава на достоверни научни данни, отразяващи състоянието на засегнатата територия. Земетресенията на Земята са разпределени неравномерно по цялата ѝ повърхност. Голяма част от земетресенията са в така наречените сеизмични пояси. Повечето от сеизмичните пояси съвпадат с контурите на тектонските плочи. Около 90% от реализираната сеизмична енергия на Земята е в граничните зони на тектонските плочи. Земетресенията, които се случват вътре в литосферните плочи, са по-редки.

В региона на Европа най-силните земетресения се срещат около Гръцката дъга и по-рядко във вътрешността на Евразийската плоча. Това е мотивът на автора да предложи проект „Изследване на косеизмични деформации на земната кора за територията на Балканския полуостров по сателитни данни“, който стартира през декември 2023 г. Основната задача на този проект е да демонстрира оперативната готовност за определяне на големината на деформациите на земната повърхност, размера на засегнатата площ и изготвяне на карти на повърхностните премествания, настъпили след сеизмично събитие. Една от първите задачи в хода на

изпълнението му, както се спомена вече е създаването на обширен каталог (база данни) на земетресенията на Балканския полуостров и съседните територии с магнитуд над 5.0 Mw за периода след 2015 г.. Тази база данни за земетресенията се допълва от информация за разломи и двете са комбинирани в проект в географска информационна система (ГИС). Пространственото разпределение на земетресенията във формат GIS може да се използва в научни и практически приложения за оценка и по този начин за намаляване на риска и последствията от възможни силни земетресения в бъдеще. Тези ограничения за времеви интервал да бъде между 2015 – 2023 г. и мащаба на събитието да е по-голямо от Mw 5.0 се налагат, тъй като основният метод за наблюдение на деформациите на земната кора, използван в това проучване е технологията InSAR. Данните, използвани за постигане на целите на изследването са продуктите на SLC от мисията Sentinel 1 A и B, които са налични след 2015 г.

Косеизмичните деформации на земната кора възникват по време на силно сеизмично събитие с магнитуд над 5,0 и имат проявления на земната повърхност в точки близо до епицентъра на събитието. Косеизмичните премествания се определят основно от методите за сателитно наблюдение, които използват както GNSS данни, така и технологията DinSAR – комбинация, която се прилага много успешно през последните години (Атанасова и Николов 2023). Различните видове мрежи и техните научни данни предоставят надеждна информация за различни природни бедствия. Например, един от основните приоритети на мрежите е насочен към изучаване на сеизмичността на Земята, нейните физически явления и полета - с акцент върху тектоничните движения и свързаните с тях рискови процеси, глобалните промени, ротацията и положението на Земята в космоса. В сеизмологична мрежа, използваща съвременни електронни системи и цифрови сеизмографи, предаването на сигнали от сеизмичните станции към централите и регистрацията, обработката и архивирането на информацията се извършва от специализирана компютърна система (например HOTССИ). По този начин се подобрява мониторингът и анализът на сеизмичността в целия план.

Друг тип мрежи, като перманентни GPS/GNSS мрежи, са свързани с обработка и анализ на данни, както и с наблюдение на съвременните движения на земната кора. Глобалната навигационна сателитна система (GNSS) се използва за изследване на полето на скоростта на земната кора, както и деформациите на Земята, като резултат от сеизмични, вулканични, геоложки или антропогенни дейности (Атанасова и Николов 2023). С помощта на GNSS метода е възможно да се определи 3D векторът на преместване на земната повърхност и да се изчислят грешки от 2–3 mm за хоризонталните и съответно 5–8 mm за вертикалните компоненти, ограничени до позицията в точката на измерване. Наред със сеизмологичната и геоложката информация, количествената оценка на движенията на земната кора е от съществено значение за наблюдение на активните тектонични структури и е основа за оценка на сеизмичната опасност.

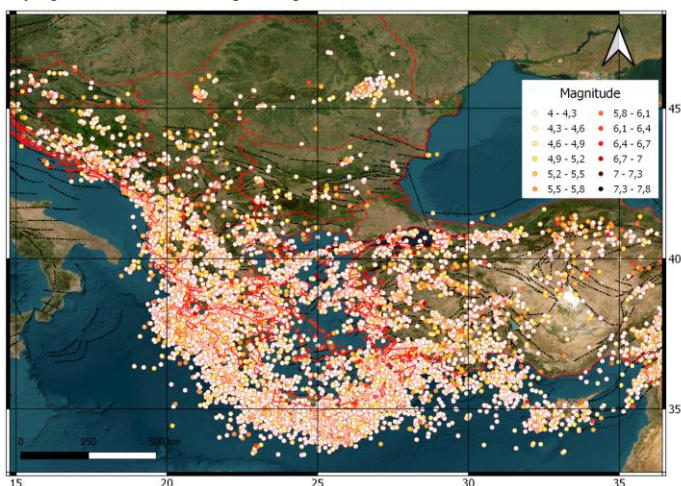
Обработката на данни от спътници за наблюдение на Земята, които регистрират данни от радарни инструменти (SAR) чрез метода DinSAR, осигурява по-голямо пространствено покритие в сравнение с GNSS измерванията. Трябва да се има предвид, че информацията за преместванията е в посоката на пряката видимост (LOS) на SAR антената. За да се получат истинските компоненти на движението на земната повърхност, е необходим допълнителен анализ след получаване на деформация в LOS. Това обширно териториално покритие на SAR инструментите позволява изготвянето на карти, които разкриват мащаба на смущенията на земната повърхност. Наред с данните за SAR се използват и други данни – за епицентъра на земетресението и за установените разломи в изследваните райони. Тъй като методът DinSAR изисква наличието на две радарни изображения, получени през интервал от време между регистрирането на SAR данните, споменатите карти отразяват кумулативния ефект на всички сеизмични събития в този интервал. Това означава, че не е възможно да се определи приносът на конкретно събитие към изчислените премествания.

Основната задача тук е да се демонстрират възможностите за определяне на размера на деформациите на земната повърхност, размера на засегнатите площи и да изготви карти на преместванията, настъпили след земетресение. Това се постигна чрез създаването и внедряването на надеждна методология за извличане на висококачествена информация от SAR продукти, които са насочени към непрекъснато наблюдение на зони, считани за потенциални източници на силни земетресения, интегриране на информация, главно от сеизмологични данни интерферометрични изображения и GNSS данни, както и други свободно достъпни източници.

### **Балкански полуостров**

Както беше посочено на Балканския полуостров, а в това число и на територията на България се развиват активни тектонски процеси и съответно има повишена сеизмичност. В Източното Средиземноморие активните геодинамични процеси се влияят най-вече от три големи плочи (Африканска, Арабска и Евразийска) и няколко второстепенни (Анадолска, Синайска, 27

Егейска и Адрианска). Понастоящем се използват съвременни спътникови геодезични техники и методи за по-добро разбиране на дългосрочните геоложки и геофизични процеси в него (Burchfiel et. al., 2008; Vassileva et. al., 2023). Въз основа на анализа и обработката на GNSS данни, редица изследвания показват съвременната активност на региона и се опитват да дадат разумна и адекватна интерпретация на получените резултати по отношение на движението на земята на земната кора в региона (Burchfiel et. al., 2008; Georgiev et. al., 2013; Kotzev et. al., 2006; Matev, 2011; Reilinger et al., 2010; Vassileva, & Atanasova, 2014; Zagorchev, 2011) и др. Сблъсъкът на Арабската и Африканската плоча с Евразийската е съществен елемент от тектонския фон на Балканския полуостров. На Балканския полуостров разширението (екстензията) север/юг, наблюдавано в Северна Гърция и Егейско море, продължава с 5 mm/g във вътрешните Балкани (Burchfiel et.al. 2006). Западната граница на Гръцката дъга определя границата на голяма интраконтинентална активна област на екстензия, обхващаща Егейско море и югозападната част на Балканския полуостров. По протежение на тази граница преходът от сблъсък на север към субдукция на юг е свързан с пост миоценовски въртени по посока на часовниковата стрелка. D'Agostino et al., 2020 представя GPS поле на скоростите, измерено чрез скорости на постоянни станции в Албания, България, Косово, Черна гора и Северна Македония, което дава представа за неразрешени досега аспекти на широкомащабната динамика на континенталната литосфера и на връзката между продължителната и краткосрочна кинематика.



Фигура 5.1. Карта на местоположението на земетресения с магнитуд над 4,0 Mw след 1904 г. до днес (Atanasova-Zlatareva et al., 2024a).

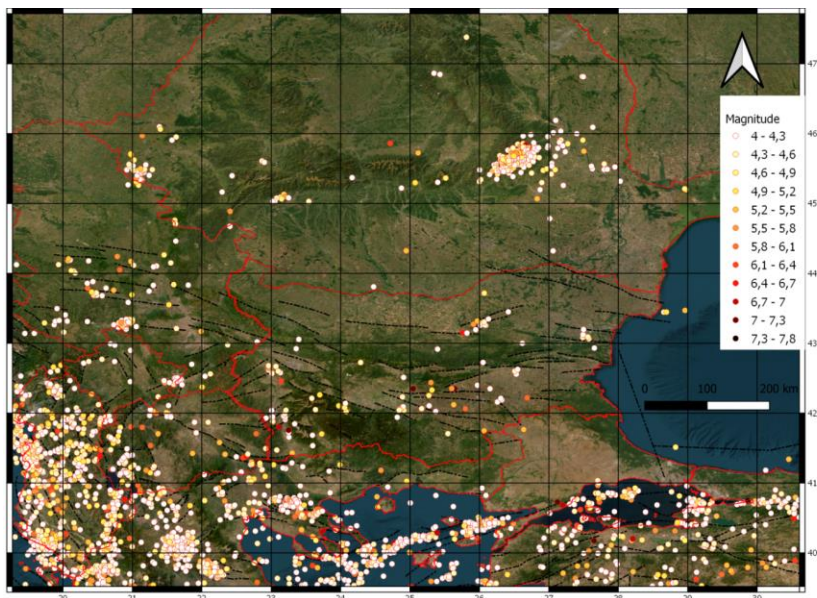
Балканският полуостров е една от опасните сеизмични зони на Земята, където през последните 50 години са се случили няколко сеизмични събития с магнитуд над 7. Повечето от сеизмичните събития са генерирани в близост или по протежение на конкретна зона на разлом. Такава зона, известна като Гръцката дъга, се намира близо до територията на България и земетресенията, които се случват там, често се усещат. Целта е да се изследва и определят деформациите на земната повърхност, настъпили в региона на Балканския полуостров след земетресения с магнитуд над 5,0 Mw по протежение на Средиземноморската сеизмична зона, настъпили през последните 8 години (след 2015 г.), регистрирани от NOA (National Observatory of Athens, Национална обсерватория на Атина) и USGS (Геоложка служба на САЩ, Geological Survey USA). На фигура 5.1 е представена карта на земетресенията от създадената геобазата данни по проект КП-06-Н74/2 от 14.12.2023

#### Територията на България

От сеизмологична гледна точка България е разположена в Алпо-Хималайския сеизмичен пояс, който се характеризира с висока сеизмична активност. България е разположена на северната граница на Егейския режим на разширение (Burchfiel et. al. 2006; Kotzev et. al. 2006). Съвременната тектоника на България се определя от процесите на разширение в обща посока север-юг. Следователно активните разломни структури се простират от изток-запад и югоизток-северозапад (Burchfiel et. al. 2006; Kotzev et. al. 2006).

През последните векове на територията на България са се случвали силни земетресения, някои от които най-силните земетресения в Европа в началото на 20-ти век. Земетресения от такъв

характер в България, за щастие, не са се случвали от 1928 г. Като се има предвид този тип събития, които причиняват много щети и водят до големи материални загуби, анализирането им помага на вземащите решения да повишат готовността си за посрещане на последствията от силни земетресения чрез създаване на адекватни превантивни мерки.



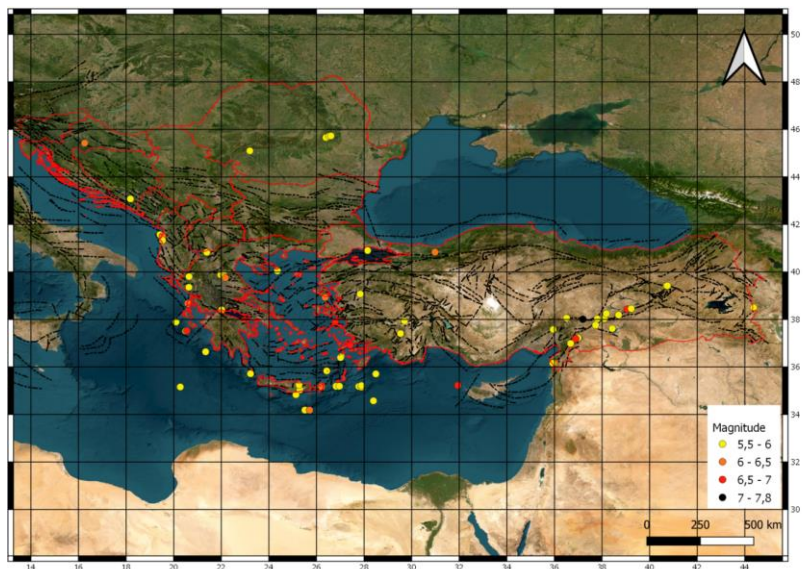
Фигура 5.2. Карта на местоположението на земетресения с магнитуд над 4,0 Mw след 1904 г. (USGS) за територията на България (Atanasova-Zlatareva et al., 2024).

Пространственото разпределение на сеизмичността в България е неравномерно, което дава основание да се групират земетресенията в географски определени зони - сеизмогенни зони (Simeonova et al., 2006; Raykova, et al., 20022). Сеизмичността в региона се свързва със сеизмични зони, определени в някои изследвания за Източните Балкани (Sokerova et al., 1992; Dachev et al., 1995; Simeonova et al., 2006), които се основават на пространственото разпределение на сеизмичността и зони на източници, предложени в Bonsev et al. (1982). Силните исторически земетресения са в основните сеизмогенни зони: Кресна, Марица, Горна Оряховица и Шабла.

В исторически план си струва да се споменат земетресенията от 1818 г. ( $10=8-9$  MSK) и 1858 г. ( $10=9$  MSK) в Софийската сеизмогенна зона. Земетресението от 1858 г. причинява тежки разрушения на града и появата на термален извор. Едни от най-силните европейски земетресения (с магнитуд по-голям или равен на 6,5) през 20 век са локализирани в България. Югозападната част на България се характеризира с висока сеизмична активност в периода 1904 – 1906г. В Кресненската сеизмогенна зона са генерирани две от най-силните земетресения в Европа през 20 Век (Raykova et al., 2022). Това са събитията от 4 април 1904 г., настъпили в интервал от 21 минути (първото с магнитуд на момента  $MW=7,1$  е предупредителен трус, а второто, основно събитие е с магнитуд на момента  $MW=7,8$  и интензитет  $10 = 10$  MSK64).

През 1928 г. има поредица от силни земетресения по долината на река Марица (в централната част на Южна България). Най-силните земетресения в района са събитията от 1928 г. - Чирпанското земетресение от 14 април 1928 г. с магнитуд  $MW = 6,5$  и земетресението в Пловдив от 18 април 1928 г. с магнитуд  $MW = 7,1$  (Райкова и др., 2021; Raykova et al., 2022).

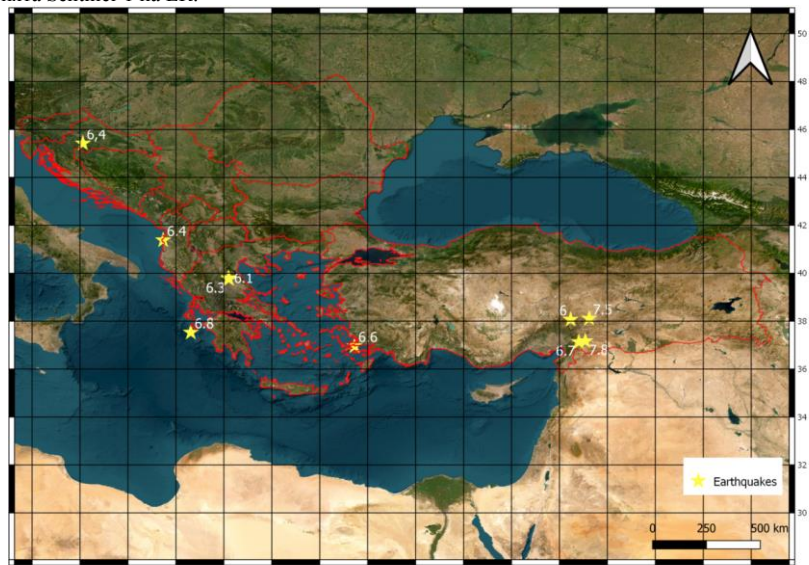
Почти век по-късно земетресение удря сеизмогенната зона на София на 22 май 2012 г. с моментен магнитуд  $M_w 5.6$  ( $10=7-8$  MSK) (Solakov et al., 2016). Земетресението от 2012 г. е локализирано в околностите на гр. Перник на около 25 km югозападно от гр. София. То е последвано от интензивна вторична трусова дейност (Солаков и др., 2021). В днешни дни за България е характерно по-дълго затишие за силни събития.



Фигура 5.4. Карта на местоположението на силни земетресения с  $M_w > 5.5$  след 2015 г. за Балканите и съседните територии (Atanasova-Zlatareva et al., 2024a)

Фигури 5.2-5.4 представят пространственото разпределение на земетресенията с различен магнитуд за териториите на Балканите и съседните територии, както и за територията на България (Atanasova-Zlatareva et al., 2024a).

Основната цел е да се създаде модел на повърхностните премествания, възникнали след земетресения на Балканския полуостров и прилежащата зона. Основният източник на информация, използван за създаване на карти на възникналите движения на земята, са интерферометричните изображения, получени от DInSAR обработката на SAR данни, получени от мисията Sentinel-1 на ЕК.



Фигура 5.6. Карта на местоположението на изследваните земетресения ( $MW=6.0$ ) след 2015 г. за Балканите и съседните територии чрез SAR данни (Atanasova-Zlatareva et al., 2024a)

Досега деформациите на земната кора в региона на Балканския полуостров са изследвани с акцент върху няколко сеизмични събития, показани на фигура 5.6 и таблица 5.1, с регистриран магнитуд на основното земетресение над 6,0 Mw. Ще се демонстрират възможностите за изследване на премествания, настъпили след този тип събития, използвайки SAR, данни обработени по DInSAR метода като се покажат събития, случили се извън територията на България, тъй като в последните 10 години земетресения с магнитуд над 5 Mw, за щастие, не са регистрирани на територията на България.

Таблица 5.1. Проучени сеизмични събития с магнитуд над 6,0 по скала Рихтер за района на Средиземноморската сеизмична зона (Atanasova et al., 2024c)

N	Име	Географска ширина и дължина	Mw	Дати, час/UTC
1	Кос-Бодрум Гърция-Турция	36.96 N; 27.45 E	6.6	20 юли 2017 г.
2	Остров Закинтос Йонийско море	37.53 N; 20.62 E	6.8	25 октомври 2018 г. 22:54 ч
3	Дураст-Албания	41.38 N; 19.47 E	6.4	26 ноември 2019 г.
4	Петриня Хърватска	45.42 N; 16.12 E	6,4	29 декември 2020 г.
5	Лариса - Гърция	39.76 N; 22.21 E	6.3	03 март 2021 г.
6	Лариса - Гърция	39.80 N; 22.20 E	6.1	04 март 2021 г.
7	Турция-Сирия	38.07 N; 36.47 E	6.0	6 февруари 2023 г. 12:02 ч
8	Турция-Сирия	38.11 N; 37.24 E	7.5	6 февруари 2023 г. 10:24 ч
9	Турция-Сирия	37.13 N; 36.81 E	6.7	6 февруари 2023 г. 01:28 ч
10	Турция-Сирия	37.17 N; 37.08 E	7.8	6 февруари 2023 г. 01:17 ч
11	Остров Крит	35.11 N; 25.11 E	5,9	17 септември 2021г 09:17ч.

### 5.1. Определяне на косеизмичните деформации на земната кора от земетресението на 20 юли 2017 г. в близост до остров Кос с Mw 6,6 по скала Рихтер

На 20 юли 2017 г. земетресение с Mw 6,6 и дълбочина 2 km става близо до остров Кос. Епицентърът на земетресението се намира в Егейско море, на около километър, южно от необитаемия остров Караада, като засегнати са гръцкия остров Кос и гр. Бодрум в югозападната част на Турция. След земетресението е наблюдавана вълна цунами, която залива бреговете на гр. Бодрум. Това е първото събитие изследвано от автора на дисертацията на базата на SAR данни придобити от мисията Sentinel-1.

С оглед получаване на достоверна информация относно преместванията, настъпили вследствие на земетресението на остров Кос от хранилището за SAR данни, поддържано от ЕКА са изтеглени 8 изображения, които са от тип SLC, получени в режим IW (виж таблица 5.1.1).

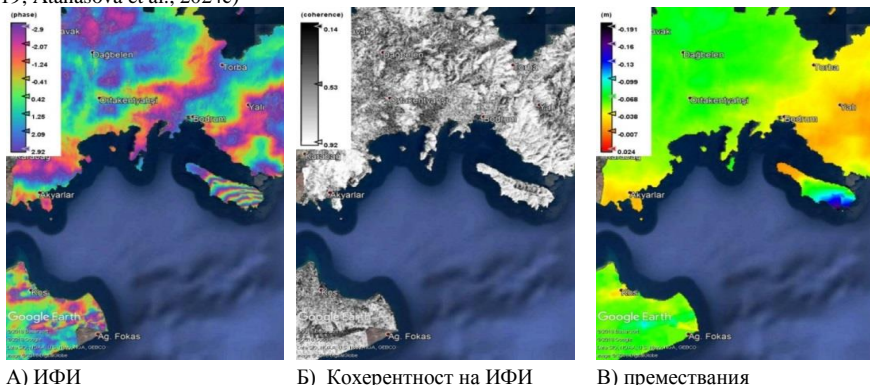
Таблица 5.1.1 SAR данни, използвани за определяне на косеизмичната деформация, настъпила на остров Караада

ИФД	Тип орбита/номер	$V_{\text{перп}}$ [m]	Моделирана кохерентност
12.07.2017 – 24.07.2017	възходяща/131	33,24	0,96
18.07.2017 – 30.07.2017	низходяща/36	5,51	0,98

От тях са формирани интерферометрични двойки (ИФД) за проследяване на последствията от събитието. След тяхната тематична обработка е извлечена информация за фазата на отразения от земната повърхност радарен сигнал. Времевият интервал между ИФД е избран така, че да се осигури минимална времева декорелация т.е. избраните дати да са максимално близо преди и след събитието. Вследствие на това са получени високи стойности за оценената кохерентност на всяка ИФД още на етапа на тяхното формиране, което е гаранция за качеството на получаваните от тях резултати на следващите етапи. Тематичната обработка на SAR данните е извършена посредством представената в т.4 методология. За отстраняване на топографските ефекти в процеса на създаване на интерферометричните изображения е използван референтен ЦМТ от SRTM с хоризонтална разделителна способност 1arcsec (~30m). С цел подобряване на съотношението сигнал/шум е 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. В самите ИФИ са локализирани интерференчни



ивии, показващи площите, където са протекли деформационни процеси. Всяка ивица съответства на деформация от 28mm и както се вижда на фигура 5.1.5 за областите в близост до епицентъра - о. Караада се наблюдава поредица ивици. След прилагане на процедура за разгъване на фазата от ИФИ са получени нови изображения (виж фигура 5.1.4В и 5.1.5В), в които се съдържа информацията за стойности на преместванията на земната кора в метрична система (Atanasova et al., 2019; Atanasova et al., 2024c)

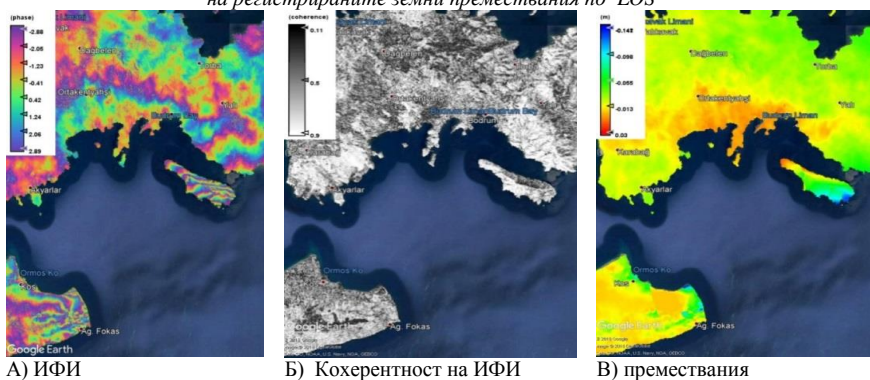


А) ИФИ

Б) Кохерентност на ИФИ

В) премествания

Фигура 5.1.4. Интерферограма от 12.07-24.07. 2017 - възходяща орбита, кохерентност и карти на регистрираните земни премествания по LOS



А) ИФИ

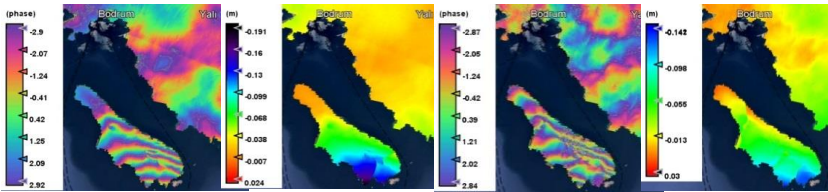
Б) Кохерентност на ИФИ

В) премествания

Фигура 5.1.5. Интерферограма от 18.07-30.07.2017 - низходяща орбита, кохерентност и карти на регистрираните земни премествания по LOS

Получените след последващата обработка на ИФИ резултати и от двата типа орбити са с високо качество, което е потвърдено от високите стойности на кохерентността (виж фигура 5.1.4-5.1.5) за изследваните площи. Стойностите за кохерентността съответстват на шума в ИФИ и са използват 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. Както се вижда (фигура 5.1.6) броя интерференчни ивици по остров Караада от възходящата и низходящата орбити е различен, съответно 7.5 и 6 ивици. Това се дължи на различната геометрия в момента на получаване на SAR 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 посока на наблюдение на SAR и са от порядъка на 20 cm с отрицателен знак. Оттук може да се направи заключението, че типът на регистрираните премествания по SAR данните са пропадане. На същата фигура се вижда и североизточният бряг на остров Кос, но регистрираните със SAR данни от двете орбити за тази област се различават значително, като това се дължи на посоката на наблюдение към терена от апаратурата.

На фигури 5.1.6 представени настъпилите вследствие на събитните деформации на земната повърхност, а най-високите стойности за тях (~20cm) са в близост до епицентъра (южната част на о. Караада).



възходяща орбита 131 от 12.07-24.07. 2017

низходяща орбита 36 от 18.07-30.07.2017

Фигура 5.1.6. Интерферометрични изображения на земетръсната зона на Кос - Бодрум /Mw 6.6/; карто-схеми на деформацията по посока на LOS.

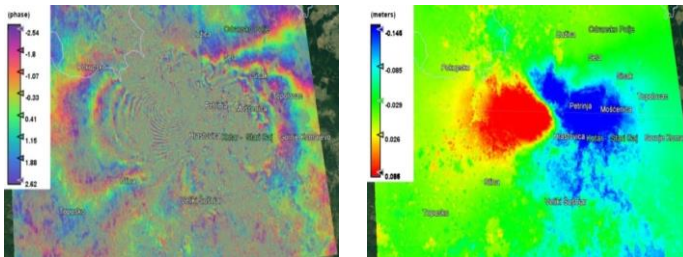
Създадени са карто-схеми на преместването и са определени стойностите на потъване на южната част на остров Караада в посока LOS от низходящи и възходящи орбити (фиг. 5.1.6). Тези резултати потвърждават резултатите, получени от Ganas et al., 2017.

## 5.2. Определяне на косеизмични деформации на земната кора след земетресението на 29 декември 2020 г. до Петриня - югоизточно от гр. Загреб

Разрушителното земетресение, което удря Хърватия на 29 декември 2020 г. е с магнитуд 6,4 по скалата на Рихтер. Неговият епицентър се намира близо до село Страсник (Strasnik), на 6 km югозападно от Петриня и 65 km юг-югоизточно от Загреб. Земетресението е станало по протежение на централната част на разлома Popusko-Petrijna в Евразийската плоча, на дълбочина 10 km с епицентър 45.422°N 16.255°E, три километра запад-югозападно от град Петриня. Земетресението и неговите вторични трусове са причинили по-голямата част от щетите в алувиалните равнини на реките Купа и Сава, където е настъпило втечняване в рохкавите слоеве от пясъци и тинести пясъци. Земетресението е предшествано ден по-рано от земетресение 5.2 Mw и поредица от последвали много вторични трусове за период от 2 години, както съобщава Хърватската сеизмологична служба.

Това е най-голямото земетресение в Хърватия от появата на модерната сеизмична апаратура. То е предшествано от два големи предварителни труса, с магнитуд 4,7 и 5,2 по Рихтер на 28 декември. Земетресение с подобен магнитуд е станало през 1880 г. близо до Загреб. Три земетресения с магнитуд 6 и по-голям са станали от 1900 г. до днес в рамките на 200 километра от епицентъра на земетресението от 29 декември 2020 г. Основният трус и повечето от вторичните трусове от това събитие са локализирани в разлома на Петриня, който е добре описан в Европейската база данни за сеизмогенни разломи (EDSF).

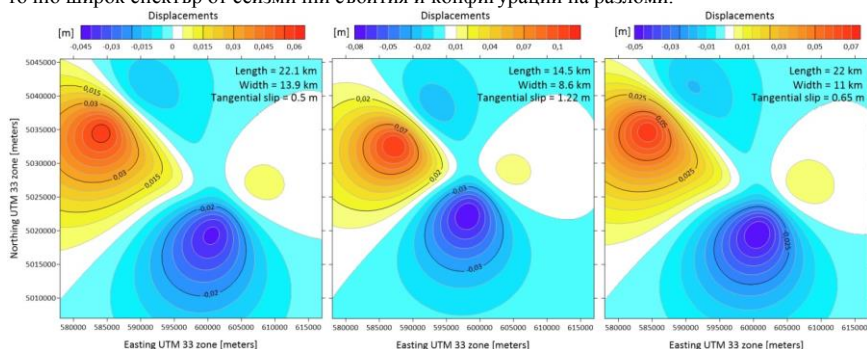
Интерферометричните резултати, представени на фигура 5.2.2., показват подобни стойности на преместванията, както в (Radnić et. al., 2021; Mihaljević & Zlatović, 2023). Земетресението е моделирано по метода на Окада от (Dimova & Raykova, 2023; Atanasova et. al., 2024d) с различни геометрии, както е показано на фигура 5.2.3.



Фигура 5.2.2. Интерферометрично изображение на зоната на земетресението до Петриня - Хърватия на 29 декември 2020 г., получено от възходяща орбита 146 (24 декември 2020 г. – 30 декември 2020 г.) и карта на деформациите по направление LoS. (Atanasova, M. 2023)

**Моделът на Окада**, въведен през 1985 г. (Okada, 1985) и допълнен през 1992 г. (Okada, 1992), предоставя аналитично решение за деформация на повърхността и за вътрешни премествания и деформации в резултат на сеизмични събития, както за точкови, така и за ограничени правоъгълни източници в хомогенно еластично полупространство. Този модел е от съществено значение за разбирането на сложните взаимодействия между сеизмичните източници и земната кора, с широка употреба в геофизиката, сеизмологията, земетръсното инженерство,

InSAR техниките, изследванията на вулкани и цунами и системите за ранно предупреждение. В уравненията на Окада участват няколко параметъра, всеки от които играе решаваща роля при определянето на характеристиките на повърхностната деформация. Фокалният механизъм на земетресението, включително параметри като наклон, наклон на разлома, значително влияе върху разпределението и големината на повърхностните премествания. Тези параметри управляват ориентацията и посоката на хлъзгане на разлома, влияейки пряко на получения модел на деформация. Освен това местоположението (напр. географска ширина, дължина и дълбочина) и геометрията (дължина и ширина за правоъгълен източник) на сеизмичния източник значително влияят върху повърхностната деформация. Моделът на Окада позволява прецизно характеризиране на геометрията на източника, позволявайки на изследователите да моделират точно широк спектър от сеизмични събития и конфигурации на разломи.



Фигура 5.2.3. Косеизмични премествания, изчислени от Димитрова (Atanasova et al., 2024 d) с помощта на модела на Окада според три вида геометрия за земетресение в Хърватия

Проведени са няколко теста за различна дължина, ширина и приплъзване на разлома. Изчислените вертикални съвместни сеизмични деформации илюстрират издигането и слягането около епицентъра на земетресението. Сравнявайки резултатите от модела на Okada и InSAR изображенията се вижда, че най-доброто съвпадение е постигнато за  $L = 14,5$  km,  $W = 8,6$  km и тангенциално приплъзване =  $1,22$  m. (Atanasova et al., 2024d). Решенията на фокалния механизъм за събитието предполага, че разкъсването е настъпило при почти вертикален разлом, който се простира или на югоизток, или на югозапад. Местоположението и дълбочината на събитието показват, че това е земетресение в рамките на Евразийската плоча, а не по тектоничната граница.

Тектониката на Средиземно море, в конвергентния граничен регион между Африка и Евразия, е сложна и включва движенията на множество микроплочи и структури от регионален мащаб. Адриатическият блок, разположен непосредствено на запад от разглежданото земетресение, се смята, че се движи донякъде независимо от Евразия и Африка. Това движение задвижва околните разломи в Италия и по източното адриатическо крайбрежие, от Хърватия до Албания (Radnić et al., 2021).

### 5.3. Определяне на косеизмични деформациите на земната кора вследствие земетресението на 3 март 2021 г. за района на Лариса - Гърция

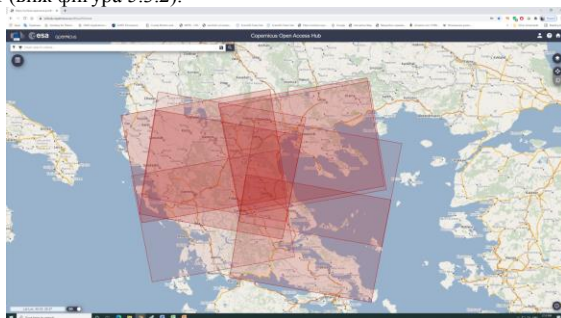
Определени са повърхностни деформации (Atanasova et al., 2021), след земетресение с Mw 6.3, което се случва на 3 март 2021 г. на 20 km северозападно от гръцкия град Лариса, последвано от силен вторичен тряс на следващия ден с магнитуд Mw 6.1 /определено от NOA и USGS/.

В сеизмичната зона до гр. Лариса в Гърция на 3 март 2021г. е регистрирано силно земетресение с магнитуд от Mw 6.3, което е усетено и в много южни градове на България както и на поредица последващи земни трусове през следващите дни. Земетресението причинява щети по сгради и инфраструктура, но за щастие няма човешки жертви. Изследваното сеизмично събитие се е състояло в регион Тесалия, разположен в централна Гърция, където доминира разширението на земната кора. Въпреки това не се счита за сеизмично активна зона (Sarhosis et al., 2022). В този район някои от разломите са в посока СЗ-ЮИ, докато други, образувани по-скоро, се развиват в посока И-З. Приема се, че два от тези разломи, а именно разломите Тирнавос и Лариса, все още са в етап на развитие (Koukouvelas et al., 2021). Тези разломи се считат за възможни източници на повърхностни (сеизмични) премествания, като причиняват разкъсвания или проявяват характеристики на втечняване. В Таблица 5.3.1 е представена извадка на основното и вторичните земетресения с магнитуд над 5.0 Mw за периода 3-21 март 2021г (Atanasova et al., 2021).

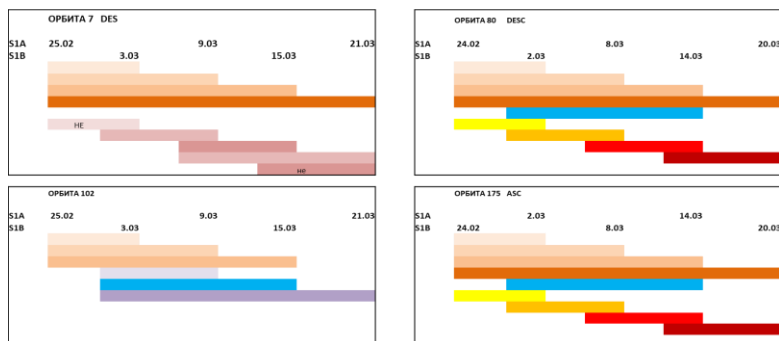
Таблица 5.3.1. Параметри на сеизмични събития с  $M$  над 5.0 за района на г. Лариса - март 2021 г.

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

В това изследване (Atanasova et al., 2021; 2024c) основен източник на данни за регистриране на геодинамичните движения са SAR данните от 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 са изтеглени изображения, които са от SLC тип за две възходящи и две низходящи орбити, покриващи засегнатата област (виж фигура 5.3.2).

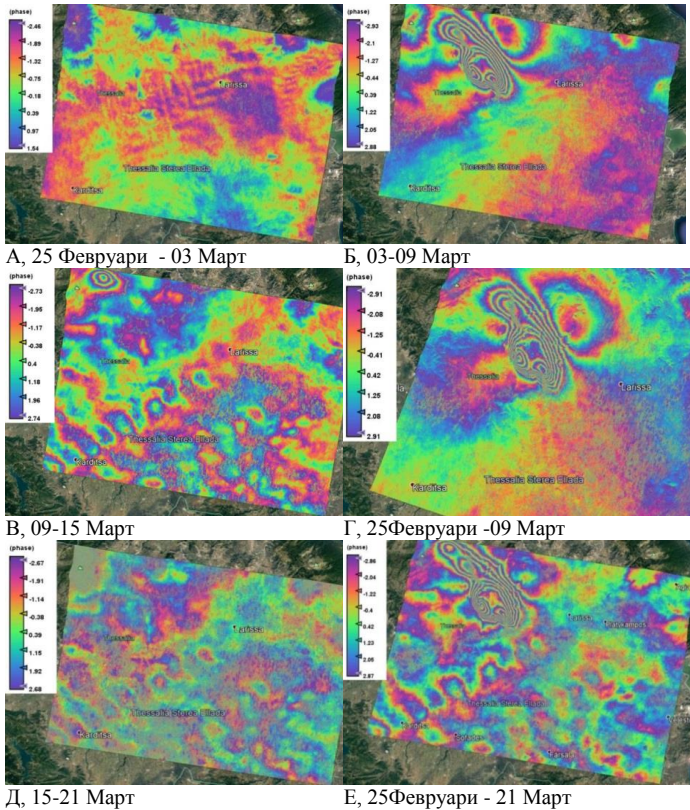


Фигура 5.3.2. Сцени от SAR данни от възходящи 175 и 102 и низходящи 7 и 80 орбити на Sentinel-1A/B, включващи района на епицентъра



Фигура 5.3.3 Орбити и дати на регистриране на SAR изображенията, формираници интерферограми

В процеса на тяхната обработка са формирани интерферометрични двойки (ИФД) за проследяване на последствията от събитието, като получената информация е изцяло базирана на промените във фазата съставлява радарния сигнал, отразен от повърхността на Земята. Тази информация, записана във формата на интерферометрични изображения (ИФИ), позволи да се определят стойностите на появилите се премествания. Тематичната обработка на SAR данните е извършена изцяло посредством представената в т. 4 методика, като на фигура 5.3.3 са показани обработените времеви серии и различни комбинации от двойки интерферограми за всяка една от орбитите.



Фигура 5.3.4 Интерферометрични изображения на района на земетресението получени от обработката на низходяща орбита 7 за различни времеви периоди

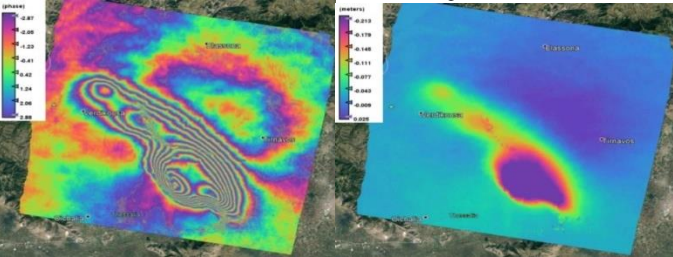
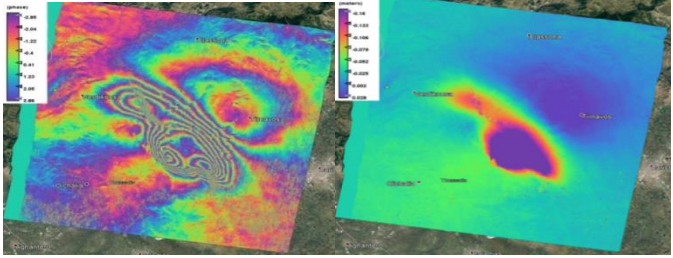
На този етап в самите ИФИ са локализирани интерференчните ивици (interferometric fringes), (фиг. 5.3.4 Б, В, Г, Е), показващи площите, където са протекли деформационни процеси. Всяка ивица както се спомена по-горе съответства на деформация от 28 mm и както се вижда на фигура 5.3.4.- Б, Г, Е за областите в близост до епицентъра се наблюдава поредица ивици. След прилагане на процедура за разгъване на фазата от ИФИ са получени нови изображения, в които се съдържа информация за относителните стойности на преместване на земната кора в метрична система. Получените премествания са определени количествено по посоката на визирната линия на сателита – LoS. Във вектора по LoS са включени както хоризонталните, така и вертикалните премествания. 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 афтершокове. Обикновено, използвайки приложението метод, се регистрират сумарните променения на земната кора за периода между две преминавания на спътниците, който за мисията Sentinel-1 (за 2021 г.) е минимум 6 дни. На интерферограмата показана на фиг. 5.3.4-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.

На фигура 5.3.5 А са показани фрагменти от получените ИФИ за района на земетресението от двата типа орбити преди разгъването на фазата, където се виждат фазовите разлики, предизвикани от събитието. Както се вижда броят интерференчни ивици от възходящите и низходящите орбити е различен. Този факт се обяснява с различната геометрия в момента на получаване на SAR данните, т.е. 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 PCA и са от порядъка на -10cm- -30 cm с отрицателен знак.

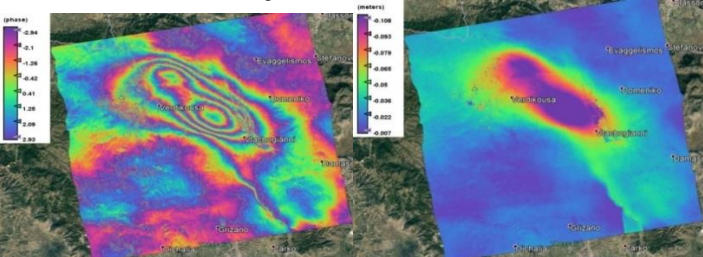
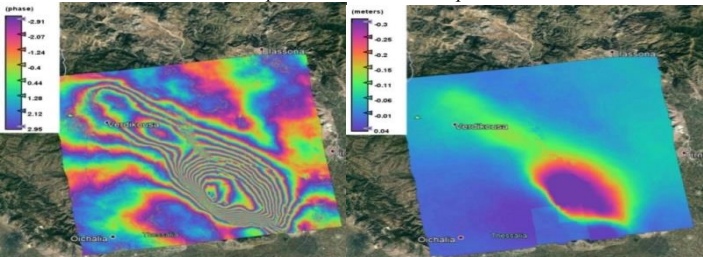
На фигура 5.3.5 са показани фрагменти от ИФИ А) и след тяхното разгъване на фазата В)

по предложения в т.4 метод са получени карто-схеми на настъпилите премествания на земната повърхност вследствие на събитието, а най-високите стойности за тях -30cm са получени от 175 орбита за периода 02-14 Март (сумарна стойност). Разликите в стойностите на преместванията на земната кора, наблюдавани от различни орбити, подчертават необходимостта при изследване на деформациите да се генерират интерферограми и от двата вида орбити. Интерферометрични изображения и карто-схеми на деформация по посоките на LoS за земетресението в Лариса са представени на фигура 5.3.5 и са генерирани двойки изображения за четири различни орбити. На фигура 5.3.6 с помощта на надлъжни профилни линии по направление северозапад - югоизток са определени относителните стойности на преместванията по земната повърхност. Тези премествания се свързват с интервала време между двете изображения.

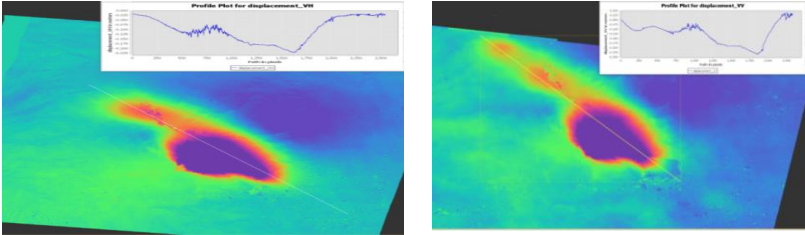
*Низходящи орбити, при които LoS е в посока II-3*



*Възходящи орбити при които LoS е в посока 3-II*

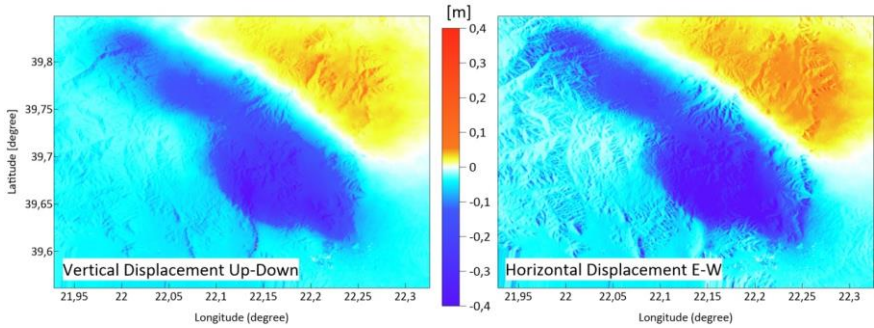


Фигура 5.3.5. Интерферометрични изображения на района на земетресението, от на възходящи и низходящи орбити и карто-схеми на преместванията, получени от тях по LOS



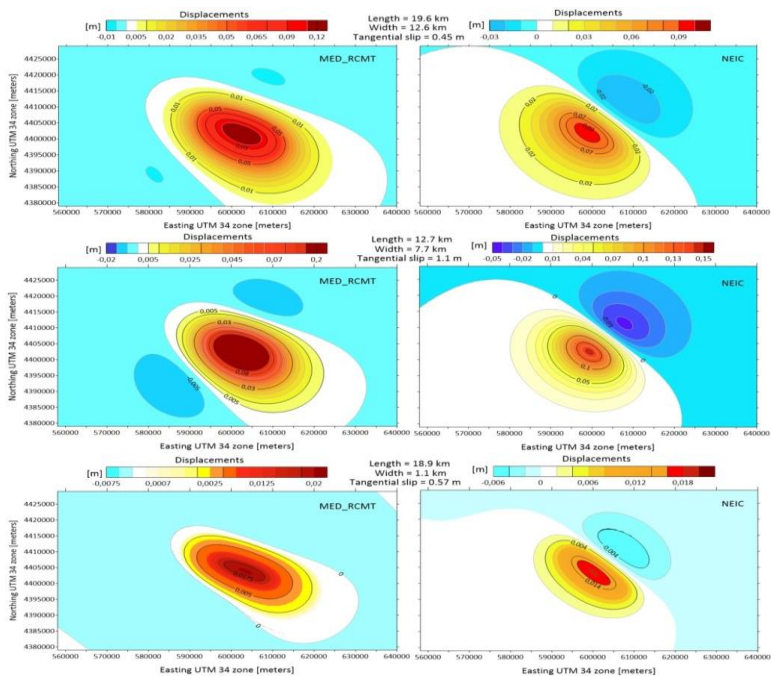
А) 25 Февруари -09 Март  
 Б) 25 Февруари -21 Март  
 Фигура 5.3.6. Карто-схеми на преместванията, получени от орбита 7 и профили на относителните премествания за интервала време между двете сцени.

Извършено е разлагане на векторите на преместване по LoS, за да се извлекат вертикалните (нагоре-надолу) и хоризонталните (E-W) компоненти на деформацията на земната кора, чрез сливане на възходящите и низходящите интерферометрични изображения. Този процес на сливане се улеснява от оператора „Collocate“ в рамките на софтуера SNAP, който обединява две изображения от различни орбити. Първоначално изображенията се обработват отделно за всяка орбита по описаната в т.4 методология. Извършва се геокодиране на SAR данните към избрана картна проекция, осигуряваща точно определяне на ъгъла на пресичане на линията на отразяване на елипсоида. Използва се операторът за изчисление на хоризонталните (изток-запад) и вертикалните компоненти на вектора на преместване. Полученият продукт предоставя информация за хоризонтални и вертикални движения, измерени в метри (виж фиг. 5.3.7).



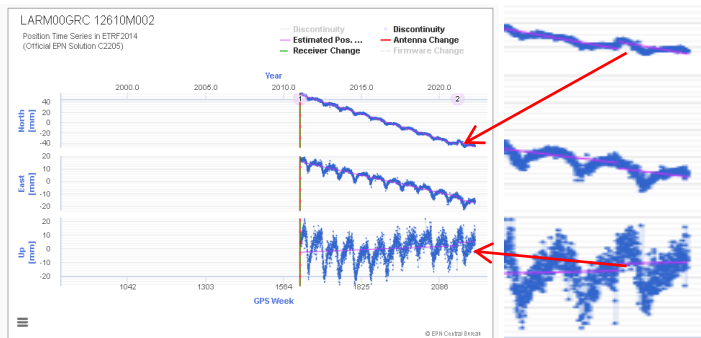
Фигура 5.3.7. Карто-схеми на деформацията за земетресение в Лариса, разложени на вертикални (горе-надолу) и хоризонтални (И-З) компоненти (Dimova & Raykova 2023).

Събрана е информация от два центъра за данни за механизмите на огнището на земетресението в Лариса. Тествани са двата механизма (Dimova & Raykova 2023; Atanasova et al., 2024d) за изчисляване на косеизмичните вертикални премествания, използвайки модела на Окада. Фигура 5.3.8 илюстрира изчисленията, като левите панели показват данните от MedNet Regional Centroid - Moment Tensors (INGV), а десните панели представят данните от Националния център за информация за земетресенията (NEIC) на САЩ. Освен това са избрани три различни конфигурации за геометрията на източника, които да бъдат тествани, като се променят дължината, ширината и тангенциалното приплъзване над разлома. Максималните и минималните вертикални премествания се възпроизвеждат от следната геометрия:  $L = 12,7 \text{ km}$ ,  $W = 7,7 \text{ km}$  и приплъзване = 1,1 m. Стойностите за вертикалните премествания са сравними с изчислените по процедурата DinSAR. Комбинирайки двата метода, DinSAR и моделирането на Okada, може да се оценят по-добре вертикалните деформации, генерирани след земетресение. Сравнявайки резултатите, може по-реалистично да се възпроизведат фокалните механизми на земетресението.



Фигура 5.3.8. Косеизмични премествания, изчислени с помощта на модела на Окада според три вида геометрия за земетресение в Лариса. (Dimova & Raykova 2023; Atanasova et al., 2024d)

GNSS данните от EUREF мрежата са използвани за 062 юлиански ден от 2021 г., който съответства на 3 март. Анализирани са времевите редове от координати от GNSS парманентна станцията LARM. Точката LARM се намира югоизточно от епицентъра на събитието. Фигура 5.3.9 илюстрира регистрираното преместване, наблюдавано в северния и вертикалния компонент (Атанасова & Николов 2023; Atanasova et al., 2024d).



Фигура 5.3.9. Времени редове на координатите на LARM GNSS станция от Европейската постоянна мрежа EUREF [https://www.epncb.oma.be/\\_networkdata/stationmaps.php](https://www.epncb.oma.be/_networkdata/stationmaps.php) (Атанасова & Николов 2023; Atanasova et al., 2024d).

Представените примери илюстрират практическото приложение на космически технологии като GNSS и InSAR в изследването и мониторинга на сеизмогенни зони. Тези технологии подчертават тяхната решаваща роля и предимства при установяването на модели на движение в тези зони.

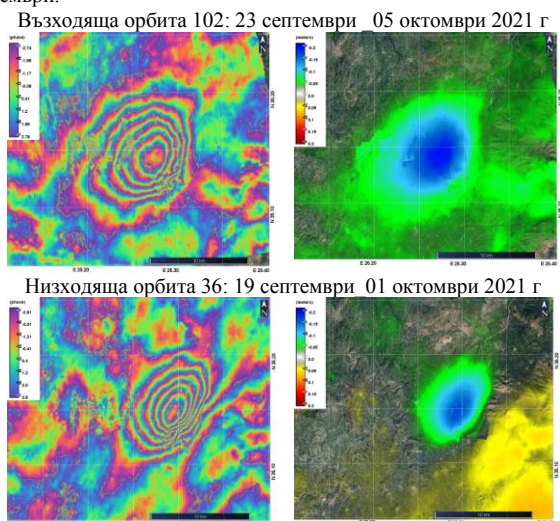


#### 5.4 Картиране и моделиране на настъпилите деформации на земната кора при земетресението от 27 септември 2021 г. на остров Крит.

На 27 септември 2021 г. силно земетресение с магнитуд Mw 5,9 или Mw 6,0 (определено от различни сеизмологични центрове) е локализирано в близост до разломна структура в централната част на остров Крит, Гърция (EMSC). Вторични трусове са последвали основния трус, като най-големият вторичен трус е на 28 септември 2021 г. с магнитуд Mw 5,2. Земетресението причинява смърт и около 20 ранени. Инцидентът причинява големи строителни щети в района на град Аркалохори и в други села в района.

Остров Крит е разположен в Гръцката субдукционна зона (Hellenic Subduction Zone - HSZ) и следователно се характеризира с висока сеизмичност и земетресения с големи магнитуди. Основният трус на 27 септември 2021 г. е единственото известно силно земетресение, разкъсало района на Аркалохори. Остров Крит, разположен в най-южната част на Гръцката дъга, изпитва висока сеизмична активност, приписвана на субдукцията на Африканската плоча под Евроазиатската. Както напреженията на разширение, така и на натиск, които съществуват в тази област, водят до създаването на изключително сложна тектонска среда, характеризираща се със значителни хоризонтални и вертикални движения. Тектонският грабен на Ираклион на север и тектонският грабен на Месара на югозапад доминират в централния район на Крит на брега (Ganas et al., 2021). Ираклионският грабен граничи на запад с планините Ида и на изток с планините Дикти по протежение на източните разломни зони Псилоритис и Кастели. И двете разломни зони следват почти североизточна-югозападна посока, като източната разломна зона на Псилоритис е по-забележима поради топографията на планината Ида (Ganas et al., 2021).

Основният източник на информация, използван за създаване на карти на възникналите движения на земята, са интерферометричните изображения, получени от DInSAR обработка на SAR данни от мисията Sentinel-1 на ESA. Диференциалните интерферограми и картите на преместването са показани на фигура 5.4.2. Те показват ясни съвместни сеизмични премествания по LoS, причинени от земетресението в Аркалохори. Основната зона на деформация има елипсовидна форма с голяма ос 10 km в посока ЮЗ-СИ и малка ос 7 km съпоставими с Vallianatos & Kouli, 2022. Интерферограмите показват подобна основна форма на потъване на повърхността, въпреки че максималните им стойности са различни поради противоположните им сателитни изгледи. Двете интерферограми са с добро качество и съдържат фазовата разлика между основните и подчинените изображения, получени от основното сеизмично събитие и неговите вторични трусове до 29 септември.

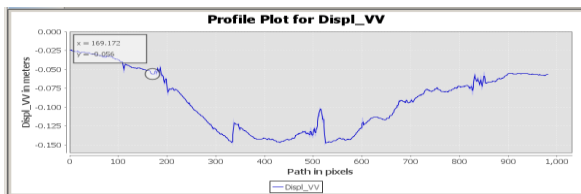


Фигура 5.4.2. Интерферометрични изображения и карти на преместванията след земетресението на остров Крит по посоката на LoS, определена от двата типа орбити (Atanasova et al., 2024b; 2024d)

Поради кратките времеви и геометрични базови линии, няма зони на ниска кохерентност в интерферограмите. Шест ивици, са очевидни, както във възходящата, така и в низходящата интерферограма (виж фиг. 5.4.2). Както се вижда на същата фигура, моделите на „фринжовете“

са доста сходни и в същото време запазват формата си при зоната на епицентровете. Този асиметричен модел на преместване е характерен за земетресения с нормални разломи, което показва, че слягането е по-голямо от повдигането.

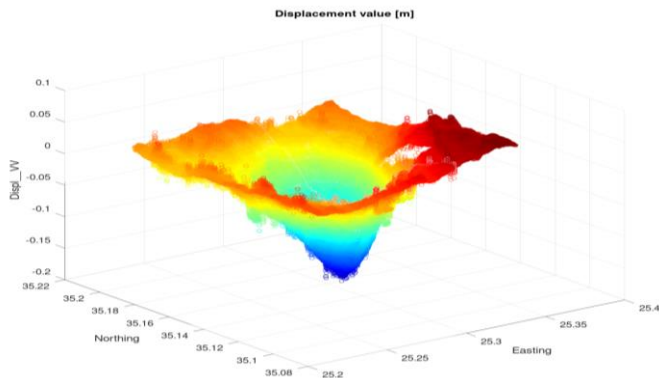
Картата на преместване по посока LoS във възходящата геометрия показва отрицателни стойности на преместване до 13 cm след земетресението с Mw6.0, включително преместванията на земята от всички сеизмични събития между 23 септември и 5 октомври (фигура 5.4.2, горен панел). За разлика от това, картата на преместването по LoS в низходящата геометрия на орбитите показва отрицателни стойности до 16 cm (след всички вторични трусове до 1 октомври) (фигура 5.4.2 отдолу). Доминирането на компонента на отрицателното вертикално преместване в двете геометрии на изображението LoS предполага нормално събитие на приплъзване. Разкъсването може да е свързано с наклонения на запад нормален разлом от източната страна на грабена Кастели. Слягането се доказва от нашите резултати от InSAR (Atanasova et al., 2024b; 2024d) и е ясно визуализирано на надлъжния профил на фигура 5.4.3.



Фигура 5.4.3. Преместване по профилна линия на низходящата орбита след земетресението на остров Крит на 27 септември 2021, получено от карта на преместванията в посоката на LoS за 19 септември 2021 г. – 01 октомври 2021 г. (Atanasova et al., 2024b)

Максималното слягане на земната повърхност е приблизително 20 cm и е изчислено от InSAR изображения, но този резултат също така включва деформациите, които може да са причинени от най-големия вторичен трус (Mw 5,2), настъпил на 28 септември 2021 г.

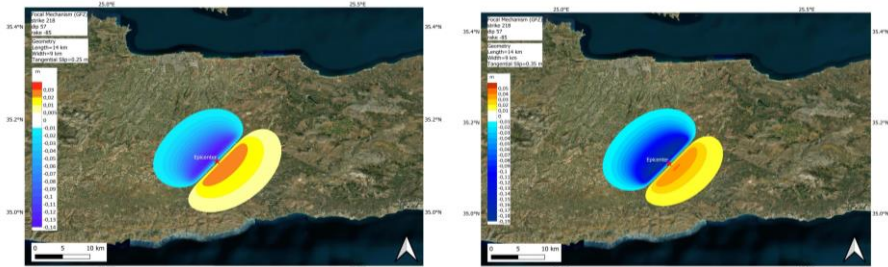
На фигура 5.4.4 е показана 3D реконструкция на слягането, което е резултат от двете споменати земетресения, както е регистрирано в данните за възходяща орбита. За да се създаде този 3D модел, е извлечена стойността от всеки пиксел, съответстваща на площта на най-големите земни движения, след което е начертана в 3D пространство. Малкото издигане в югоизточната зона, изобразено в дясна част на фигура 3.4.4 се забелязва и на фигура 5.4.5.



Фигура 5.4.4. 3D визуализация на регистрираните премествания в зоната на слягане (Atanasova et al., 2024b)

В допълнение към картите, произведени от SAR, моделиране на събитието е извършено и по метода на Okada от геофизиките Димова и Райкова и представено в Atanasova et al., 2024b с различни геометрии. При моделирането на земетресението в Крит са тествани няколко типа геометрии, вариращи по дължина, ширина и тангенциално приплъзване. Тествани са и няколко фокални механизма, тъй като някои от тях са доста различни (Atanasova et al., 2024b). Най-доброто съвпадение с изображението на InSAR е за геометрия с дължина  $L=14$  km и ширина  $W=9$

km. Най-подходящият фокален механизъм за това събитие е взет от центъра за данни на GFZ (strike 218.66, dip 57.47, rake -85.61). Фигура 5.4.5 показва резултатите за две стойности на преместването на разлома: 0,25 m и 0,35 m. Резултатите са допълнени с информация за добре известните разломи в региона (Basili et al., 2013). Картите, генерирани от данни за SAR, са сравнени с резултатите, получени с помощта на метода на Окада, разкривайки добра съвместимост между двата метода. Отрицателните стойности на слягането се виждат добре, както в изображенията на InSAR, така и в резултатите от моделирането на Okada.



Фигура 5.4.5. Косеизмични вертикални премествания, изчислени с помощта на модела на Окада, за земетресението от 27 септември 2021 г. на остров Крит за две стойности на тангенциалното приплъзване: 0,25 m (горен панел) и 0,35 m (долен панел).

Постоянните GNSS станции в изследваните райони се използват за идентифициране на сеизмични събития във времевите редове на GNSS. Скокове в хоризонталните и вертикалните компоненти на положението на станцията се записват и се използват, за да се отчетат настъпилите деформации в района на епицентъра. Според резултатите от обработката на GNSS данни (Ganas et al., 2021) за това събитие е установено, че вертикалното движение е по-ясно доловимо със записана стойност от 14 cm, което беше доказано и от нашите InSAR резултати, показани на фигури 5.4.2.-5.4.4. Въпреки това, повечето от GNSS станциите са разположени на повече от 20 km от епицентъра и следователно са уловили само малки премествания от порядъка на няколко милиметра. GNSS станцията в Ханя от мрежата EUREF е отличен пример за това как отдалечеността пречи за регистрирането на преместванията.

## 5.5. Определяне на косеизмични деформациите на земната кора вследствие земетресението 6 февруари 2023 г. в Турция-Сирия 2023

Две опустошителни земетресения с магнитуд 7,8 Mw и 7,5 Mw по Рихтер удрят Турция на 6 февруари 2023 г. Земетресенията се случват в зоната на Източния Анадолски разлом, западно от Газiantep. Земетресението е последвано от интензивна вторична трусова дейност. Изследването (Atanasova et al., 2023) представя едни от първите публикувани в Европа и света резултати от интерферометрична 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.

Територията на Турция представлява типичен пример за зона с висок сеизмичен риск. Турция е разположена между три големи тектонични плочи. По отношение на земетръсна активност този район е един от най-активните райони. Наблюдаваните земетресения са локализирани в резултат на сблъсъка на Арабската и Африканската плоча с Евразия. Въпреки, че плочите имат различни размери, в региона въз основа на пространственото разпределение на сеизмичността, предимно трите граници на плочите имат важна роля - Африканската, Арабската и Евразийската плоча. Африканската и Арабската плоча на юг и Евразийската плоча на север ображдат Анадолската плоча (или Анадолския малък тектоничен блок), където се намира Турция. Движенията между тези три плочи са причината за по-голямата част от активността в региона. Поради тази причина Анадолската плоча има висока сеизмичност. Анадолската плоча включва Северноанадолската разломна зона (NAFZ), Източноанадолската разломна зона (EAFZ) и Югоизточната анадолска разломна зона (SAT), които формират границите на плочата и важните активни разломни сегменти в цяла Западна Анадола (Kalafat et al., 2021).

Развитието на района в геоложки времена е следствие от няколко гранични взаимодействия между тези плочи, които включват субдукция, широкомащабни разломи, компресионни планински издигания и разширение на земната кора. При сближаването на Африканската и Арабската плочи Евразийската плоча води до затварянето на Средиземно море

и в същото време е причина движението на запад на Анадолската плоча (блок). Това движение се извършва предимно по протежение на разломите на двата Анадолски разлома – Северния и Източния (виж фиг. 5.5.1). Придвижването на Анадолия блок в западна посока се извършва основно по Северноанадолската разломна система, свидетелство за което са големият брой земетресения, регистрирани през втората половина на миналия век. От друга страна същият този блок се движи в югозападна посока спрямо Арабската плоча, като движението се реализира по Източноанадолския, където също така са регистрирани земетресения с магнитуд над 7 Mw. (Şengör et al., 2005).



Фигура. 5.5.1. Карта, на основните тектонични структури около Анадолската плоча.

Стрелките показват вектори на преместване на Анадолската и Арабската плочи спрямо Евразийската плоча.

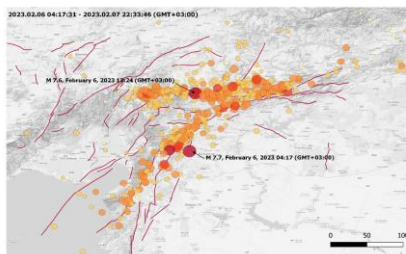
[https://en.wikipedia.org/wiki/East\\_Anatolian\\_Fault](https://en.wikipedia.org/wiki/East_Anatolian_Fault)

Алън (Allen, 1969) за първи път дефинира EAFZ през 1969 г. и според други автори (Over et al., 2004) тази структура се простира от трония възел Карлъва, където доближава Северноанадолската разломна зона на югозапад на около 600 km до трония възел на Кахраманмарас, близо до Антакия. Разломната зона се свързва с друга разломна структура - разломната зона на Мъртво море (Şengör et al. 1985). Има данни, че структурата се е формирала между късния миоцен и ранния плиоцен (Şengör et al. 1985).

Има исторически данни за разрушителни земетресения с Mw > 7 в източна Турция като последица от плъзгането по разлома. През миналия век около структурата е регистрирано само едно силно земетресение (на 4 декември 1905 г.; Mw = 6,8) ( Nalbant, 2002). Историческите и инструменталните записи показват съответно големи разлики между историческата и настоящата сеизмичност. Основните известни земетресения в района са настъпили съответно на 29 ноември 1114 г. (Mw >7,8), 28 март 1513 г. (Mw > 7,4) и 2 март 1893 г. (Mw >7,1) (Ambraseys& Jackson, 1998). Сегашното земетресение с магнитуд Mw 7.8 от 6 февруари 2023 г. в Южна Турция регистрирано близо до северната граница на Сирия е последвано след около 9 часа по-късно от подобно събитие с магнитуд Mw 7.5 на приблизително 90 km на север от първото. Свързаните с него вторични трусове, се намират в преходната зона между разломните системи на Мъртво море и Източноанадолския разлом. Предварителното местоположение на земетресението с Mw 7.8 го поставя в близост до точката, в която се събират Арабската и Африканската плочи и Анадолския блок. Второто по сила земетресение е в сеизмично активен район, разположен в западна посока от първия, но с по-слабо проявена до момента сеизмичност.

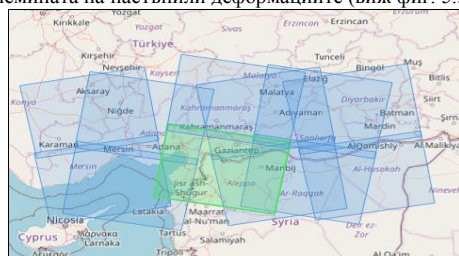
Епицентърът на земетресението от 6 февруари 2023 г. (земетресение от 7,8 Mw) се намира западно от град Газиантеп, Турция, а дълбочината на огнището му разкрива плитко събитие. След основното събитие е регистриран разрушителен вторичен трус в същата зона на разлома, на разстояние 100 km по-на север с магнитуд на момента Mw 7,5. Тези земетресения причиняват обширни първични и вторични ефекти върху околната среда, включително повърхностни разкъсвания, пукнатини на земята, явления на втечняване и хидрогеоложки аномалии, причинявайки обширни въздействия върху мрежите и инфраструктурата (Lekkas et al., 2023). За една седмица след основното земетресение последващите трусове включват повече от 3400 сеизмични събития. На фигура 5.5.3 е показана земетръсната активност за по-малко от две денонощия между 06.02.2023 г. 04:17 ч.– 07.02.2023 г. 22:33 ч. (Hancılar et al., 2023) по двата Анадолски разлома.

Последното научно предизвикателство пред което авторът и екип (Atanasova et al., 2023; Николов & Атанасова 2023) бяха изправени беше да се определят деформациите на огромните райони след двете опустошителни земетресения с магнитуд Mw 7,8 и Mw 7,5 по Рихтер, които удрят Турция на 6 февруари 2023 г. За много кратко време от порядъка на две седмици, беше



Фигура. 5.5.3. Земетръсната активност между 06.02.2023 г. 04:17 ч. – 07.02.2023 г. 22:33 ч. (Hancılar et al., 2023)

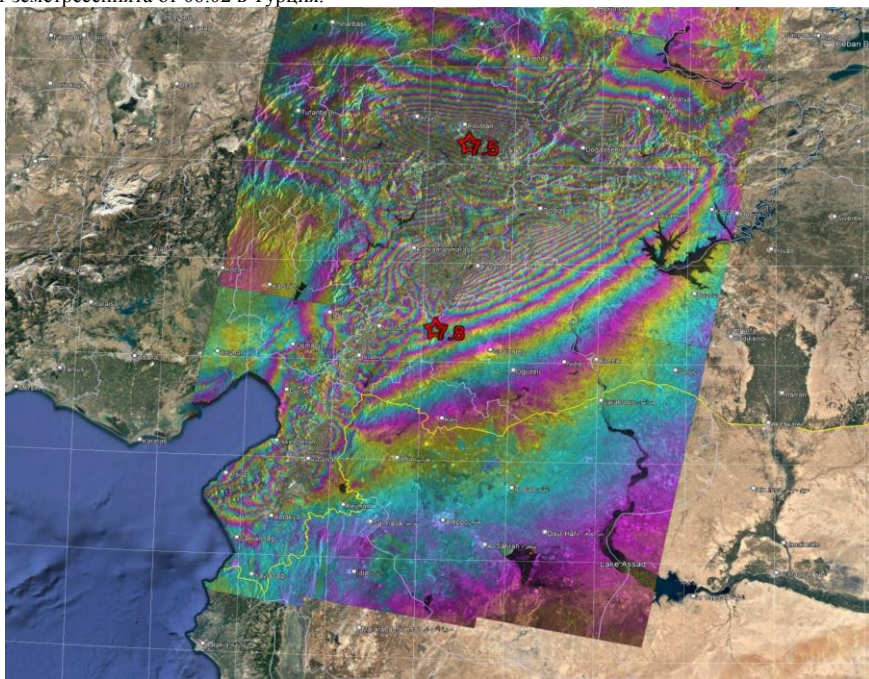
извършена обработка на няколко пълни SAR изображения, без да бъде намаляван обема от данните. Това изследване (Atanasova et. al., 2023) представя първите резултати от интерферометричната обработка на SAR данни от мисията Sentinel-1 на ESA, разкривайки засегнатата област и големината на настъпили деформации (виж фиг. 5.5.4).



Фигура 5.5.4. SLC изображения от Sentinel-1A за района на земетресението в Турция - възходяща и низходяща орбита (в зелено) <https://dataspace.copernicus.eu/browser/>

В рамките на изследването като цел е поставено получаването на достоверна информация за настъпилите деформации след поредицата сеизмични събития след извършване на тематична обработка на SAR данни за района на Кахраманмарас. SAR данните, използвани за мониторинга са от 21-вата низходящата орбита, а номерата на възходящите орбити са 14 и 116, тъй като изследваната зона е заснета и от двата типа орбити. Датите на придобиване за орбита 21 обхващат периода от 29 януари 2023 г. до 10 февруари 2023 г.

Деформациите на земната повърхност след поредицата от земетресения от 06.02.2023 г. в Турция са оценени чрез интерферометрична обработка на SAR данни и интерферограмата, представена на фигура 5.5.5 е произведена по метода на обработка на DInSAR. На фигури 5.5.5-5.5.6 са представени първите резултати, показващи района, в който са регистрирани деформации от земетресенията от 06.02 в Турция.



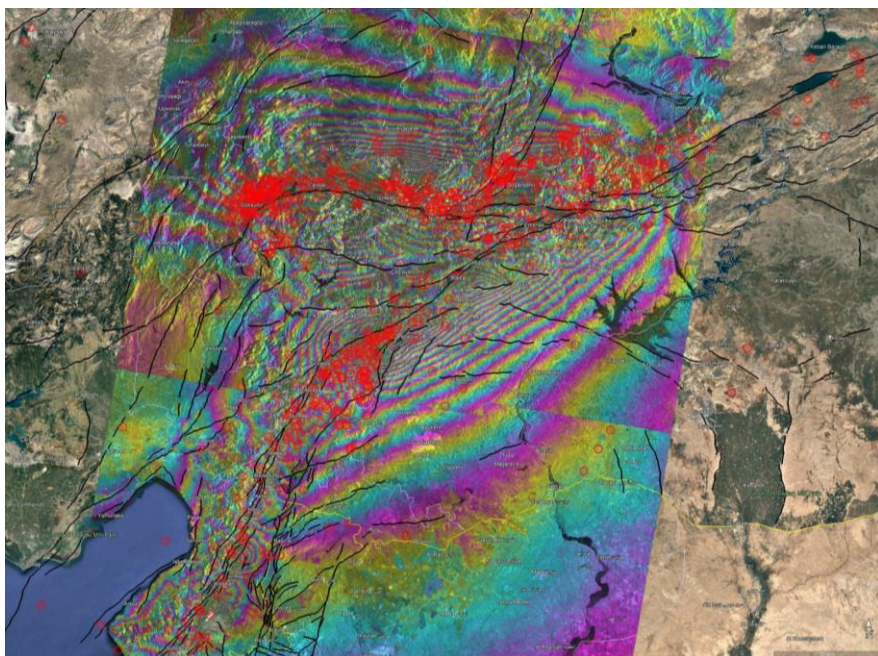
Фигура. 5.5.5. Интерферометрично изображение на района на земетресенията от 6 февруари 2023 г., определено от низходяща орбита 21 за периода от 29 януари 2023 г. до 10 февруари 2023г и епицентрове на двата основни труса (Atanasova et. al., 2023)

Като пример за по-голяма яснота, всяко едно SAR изображение се състои от 3 вертикални слота (IW1, 2, 3) и всеки един слот включващ 9 хоризонтални ивици (бърстове). За мониторинга на предходните земетресения от т.5.1-5.4 са използвани SAR данни за обработка от 2 до 3 хоризонтални ивици/бърста (виж и раздел 3). Аналогично всяко изображение съдържа  $3 \times 9 = 27$  бърста. За да се определи територията, засегната при деформации за района на град Лариса са използвани три от двадесет и седем бърста т.е.  $3/27 = 1/9$  от цялото изображения. Обхвата на Турското земетресение е толкова по-голям, че за определянето на засегнатия район се използват две изображения от 21-ва орбита ( т.е. 54 бърста) или засегнатата територия е близо 27 пъти по-голяма от територията с регистрираните деформации в района на земетресението при Лариса.

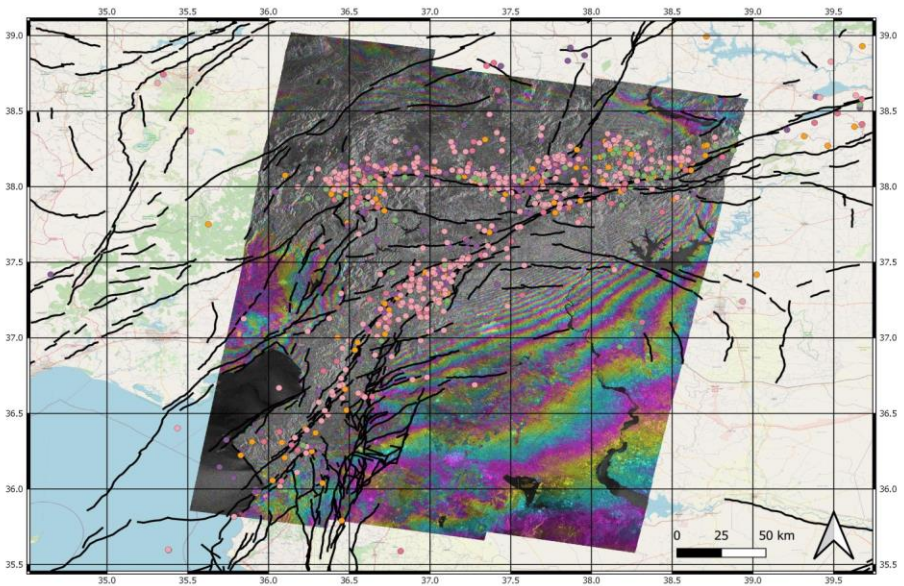
За да се демонстрира произходът на изследваното събитие на фигури 5.5.6. и 5.5.7. са използвани допълнителни източници на данни. Едни от тях са основните разломи, разположени в зоната и са представени с черни линии (Basili et al. 2013) и както се вижда, в тях са концентрирани преместванията, регистрирани от SAR данните. Точките показват местоположението на всички земетресения с магнитуд над 3,0, регистрирани от EMSC в периода 06.02.2023г.-12.02.2023г.

Получените резултати от InSAR обработката не отразяват последиците само от едно сеизмично събитие, а акумулативният ефект от всички афтершоци-земетресения, настъпили в изследвания регион между датите 29 януари 2023 г. и 10 февруари 2023 г. на регистриране от SAR инструмента (Atanasova et al., 2023; Николов & Атанасова 2023). За да бъде покрита огромната територия засегната при земетресението от 6 февруари са използвани общо 4 SLC фрема (сцени), т.е по два от всяка възходяща орбита 14 и 116 (виж фиг. 5.5.9) със застъпване между двата трака (орбитни пътеки).

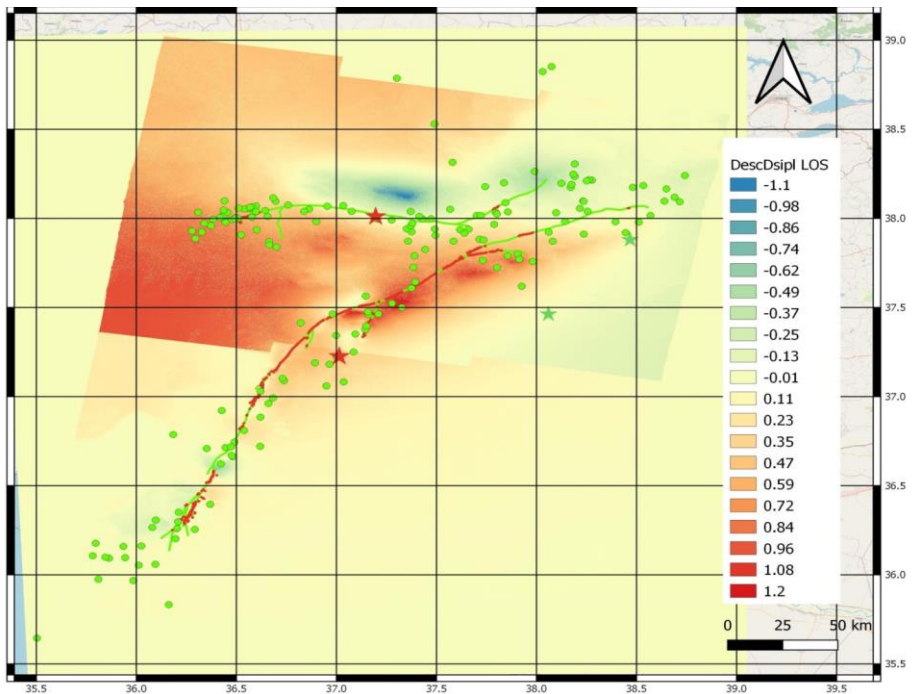
Това изследване показва резултати от регистрираните премествания на земната повърхност, настъпили след опустошителното земетресение в Турция и Сирия, като размерът и обхватът на засегнатата зона са определени по метода DinSAR. Данните за интерферометрично отместване на пикселите за фаза и обхват напълно покриват зоната на разломите, които са причинили земетресенията. Методът InSAR улеснява картографирането на повърхността, обхващаща земетръсните разломи.



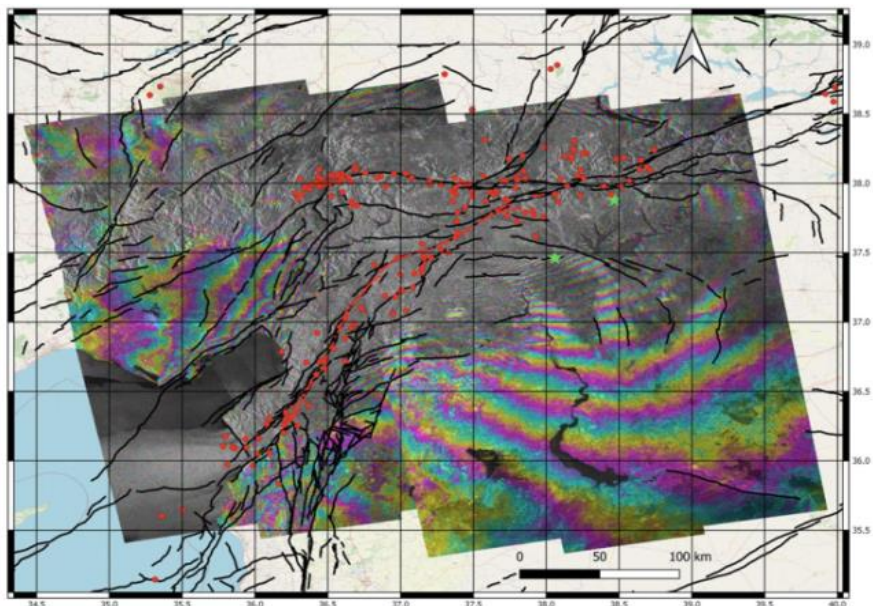
Фигура 5.5.6. Интерферометрично изображение на района на земетресенията от 6 февруари 2023 г., определено от низходяща орбита 21 за периода от 29 януари 2023 г. до 10 февруари 2023 г. и епицентровете на събитията и с магнитуд над 3,0, регистрирани от EMSC в периода 06.02.2023 г.-12.02.2023 г. и активните разломи (Атанасова 2023).



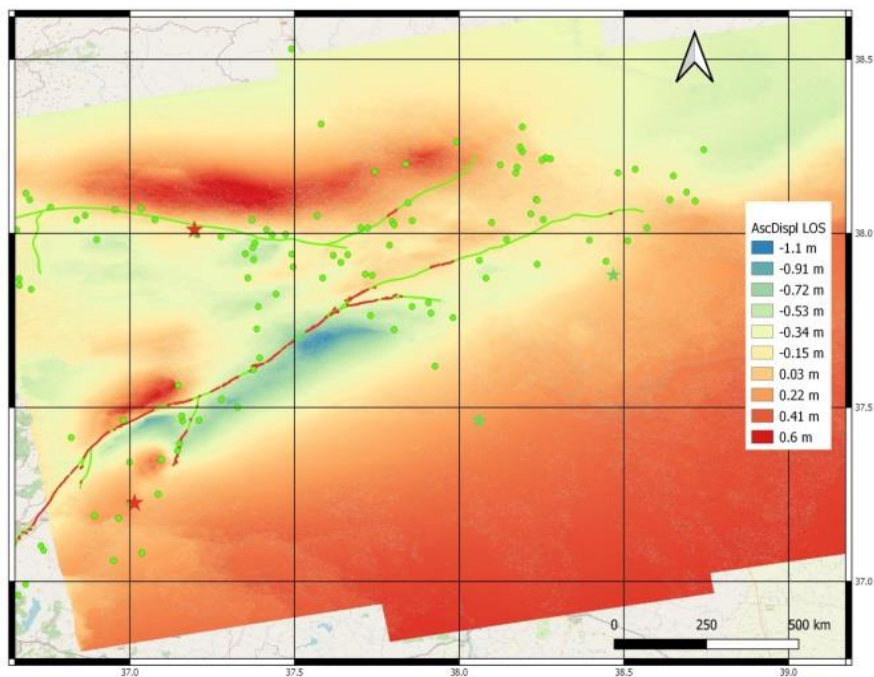
Фигура 5.5.7. Карта, включваща интерферометрично изображение от низходяща орбита от 29 януари 2023 г. до 10 февруари 2023 г. (Atanasova 2023)



Фигура 5.5.8. Карта на преместванията, регистрирани след косеизмичното събитие на 6 февруари 2023г., определени от технологията DInSAR (Atanasova et al., 2023)



Фигура 5.5.9. Интерферометрични изображения на района на земетресението в Турция - възходяща орбита, епицентри на събития от EMSC и активни разломи от EDAF (Atanasova et al., 2023; Николов & Атанасова 2023)



Фигура 5.5.10. Регистрирани деформации по SAR данни от възходяща орбита, зона на земетресение и епицентри (6 февруари 2023 г.), линии - активни разломи от EDAF (Николов & Атанасова 2023)



От представените резултати след обработката на SAR данните по метода InSAR може да се заключи, че те са допълнителен източник на информация за деформациите на земната кора, настъпили вследствие на земетресения. Доброто съответствие между InSAR картите и регионалната тектоника показва, че SAR методът е надежден и много полезен източник на информация. Предимството му е, че тази информация се получава за големи райони и за относително кратко време след събитието, което подпомага изготвянето на карти за преодоляване на последствията от него и актуализиране на плановете за подготовка при бъдещи силни събития в същата област. Методологията на обработка, приложена от автора, направи възможно получаването на ИФИ, които визуално представят преместванията около епицентровете. Данните за SAR са използвани за получаване на информация, показваща действителните повърхностни премествания. Разгледани са три основни случая, от които са получени следните резултати:

- Използвани са данни само от една орбита, поради силното залесяване и ниската кохерентност, както е показано в района на Хърватия.
- Получени са деформационни карти по протежение на линията на заснемане, както се вижда от земетресението на остров Крит.
- За земетресението в района на Лариса са определени деформации по протежение на LoS и са изчислени както слягането, така и издигането.

Основната цел е да се демонстрира възможността за определяне на степента на деформация на земната повърхност и да се изготвят карти на преместванията, които да се използват от голям брой експерти. Приложената методология за обработка, използвана от автора, успешно генерира интерферометрични изображения, които визуално изобразяват преместванията около епицентровете. Представените примери демонстрират приложението на сателитни технологии за наблюдение на Земята като InSAR за изследване и мониторинг на сеизмогенните зони на Балканския полуостров, подчертавайки тяхното значение и предимства при установяване на закономерности в движенията в тези зони. Тълкуването на пространственото разпределение и коезимичните деформации, причинени от големи земетресения, също дават представа за геодинамичните и тектонични процеси.

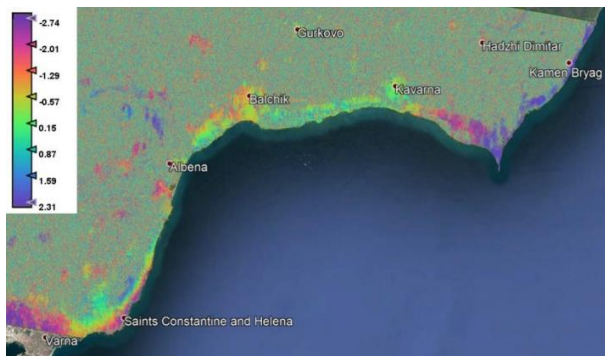
## **6. Мониторинг на свлачищни процеси от SAR данни за България**

Геодинамичните процеси и свлачищната дейност се считат за основен двигател на хоризонталните и вертикалните движения на земната кора. Свлачищата са част от разрушителни процеси, които могат да бъдат естествени или изкуствено причинени от човешката дейност. Тяхното проявление може да доведе до катастрофални условия в редица региони на света с негативен ефект по отношение на човешки жертви, тежки социално-икономически последици и влошаване на екологичната среда. Това налага използването на съвременни методи и средства за оценка, картиране и предприемане на превантивни мерки за смекчаване на негативните последици от тези геоложки опасни процеси.

Инвентаризацията на свлачищата и изготвянето на специализирани тематични карти са важни етапи за документирани и изследване на свлачищата в даден регион. Конвенционалните методи за създаване на такива карти отнемат време и ресурси. Съвременните сателитни, въздушни и наземни технологии за дистанционно наблюдение улесняват изготвянето на карти на свлачища, намалявайки времето и ресурсите, необходими за съставянето и системното им актуализиране. Една от модерните технологии за динамична картографска визуализация в реално време в геодинамично активни региони със свлачищна активност е диференциалната SAR интерферометрия (DInSAR). Комбиниран с други научни методи за изследване и технологии за визуализация, той е широко използван за геопропространствено представяне и изобразяване на свлачищна дейност, инвентаризация, картографиране и разработване на инструменти за ранно предупреждение и управление на кризи.

Съществуващите геоложки условия, ерозията, метеорологичните условия, неправилното земеползване, антропогенните дейности и земетресения са основните фактори, предизвикващи активиране на свлачища в много региони на България. Активизиране на такива процеси се наблюдава по Северното Черноморие и българското крайбрежие на р. Дунав (Bruchev et al., 2007; Verov, et al., 2020). В настоящия труд целта е да се демонстрира приложимостта на метода DInSAR за картиране и дългосрочен мониторинг на свлачищата в страната. За целта свободно достъпните данни от спътника Sentinel-1A/B (S-1) са обработени (Nikolov & Atanasova 2023a; Atanasova-Zlatareva et al., 2022; 2023b). Тук ще се представи използването на SAR данни от S-1, обработени чрез DInSAR, за да се произведе набор от интерферометрични изображения (ИФИ) за няколко региона, локализиращи по Северното българско Черноморие. Тези случаи включват свлачищния циркус „Дългия яр“ и свлачищата Фиш-Фиш и “Тракийски скали“ (Atanasova et al.,

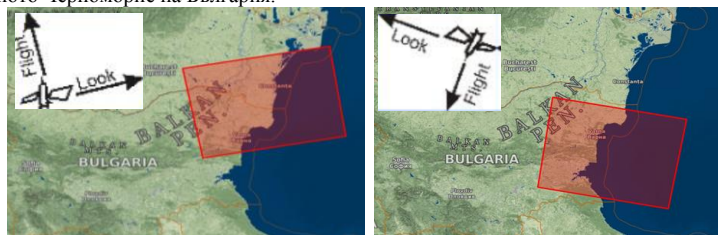
2022; Nikolov & Atanasova 2023; 2024a; Atanasova-Zlatareva & Nikolov 2024a). Северното Черноморско крайбрежие на България е един от регионите, които са известни и изследвани през последните десетилетия поради редица големи активни съвременни и стари (древни) свлачища. На фигура 6.1 е представено интерферометрично обработено подмножество от подсцена, която обхваща бреговата зона между Варна и нос Калиакра, където се намират изследваните свачища.



Фигура 6.1. Интерферометрично изображение (орбита 36 възходяща) за периода 20.11.2015\_11.03.2016 г. Северно Черноморско крайбрежие

Може да се отбележи, че голяма част от изображението е декорелирано, тъй като в този район по-голямата част от земната покривка принадлежи на селскостопанските класове, които променят своите разсейващи свойства за посочения период. Но за тясната ивица (широка около 20 km), която следва морския бряг, фазовият сигнал показва добро качество, което от своя страна означава, че за областите, разположени там, информацията, получена след етапа на разгъване на фазовият сигнал, може да се счита за надеждна. Това е причината да се съсредоточи изследването върху малка зона около всяко свлачище, което е в пълно съответствие с твърдението на Hanssen, 2001, че изолираните части с висока кохерентност могат да бъдат разгнати правилно, докато резултатът за по-големите декорелирани части няма да бъде точен.

За да се повиши надеждността на информацията, получена от данните за SAR, беше създаден локален архив от SLC изображения от S-1 от началото на 2015 г до момента, като в него са включени данни от спътници Сентинел-1 А/В от 36-та низходяща и 58-ма възходяща орбита (виж фигура 6.1) и обработените интерферометрични изображения, като до момента в него се съхраняват около 900 PCA продукта в SLC формат. В (Atanasova et al., 2022; 2023b) са показани извадки от множеството произведени интерферограми във времевите серии (редове) 2015-2022 г. по Северното Черноморие на България.



А) Възходяща орбита 058

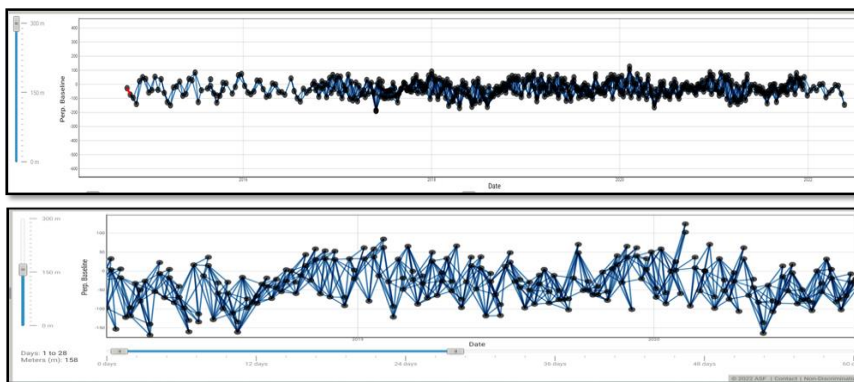
В) Низходяща орбита 036

Фигура.6.2. Район, регистриран от Сентинел-1 А/В от възходяща и низходяща орбити.

Приложена е методика за обработка по метода на диференциалната интерферометрия (DInSAR) за всяка една интерферометрична двойка, която се счита за една от най-важните стъпки, за да се получат крайните резултати. На този етап са обработвани само данни във формат Single-Look Complex (SLC). В този формат се регистрират както данни за амплитудния, така и за фазовия сигнал. Освен това тези данни имат добра позиционна информация за географска ширина/дължина и в същото време осигуряват пространствена разделителна способност (15 x 15 m), която е от значение за постигане на целите на това изследване, тъй като изследваните обекти имат неголеми площи. За създаването на единична интерферограма PCA данните бяха обработени

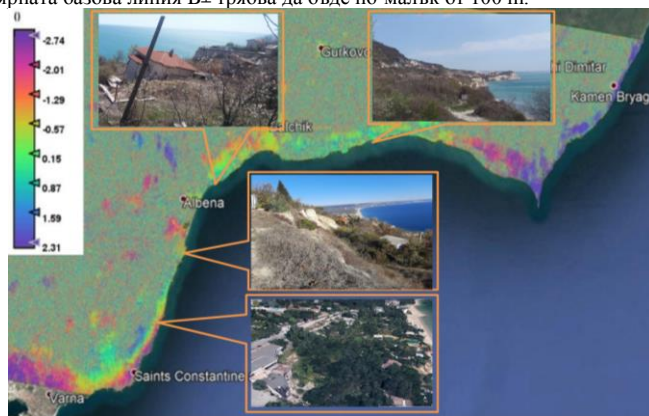
със софтуера SNAP, в който лесно се реализира добре установена методология за DInSAR (виж т. 4 блок-схема - Методология за обработка на интерферометрични двойки от PCA данните), а от друга страна позволява създаване на потребителски процедури за обработка на данните, както и възможност за пакетна обработка на набори от данни. Последната особеност улесни в голяма степен създаването на времеви поредици от интерферограми за изследваните обекти.

Вревата поредица на всички възможни интерферометрични двойки от PCA данните на Sentinel 1 е показана за целия период от началото на оперативната му употреба в края на 2014 г. Увеличаването на броя двойки, което е видимо на фигура 6.3 се дължи на изстрелването на втория спътник на съвездието през 2016 г. За съжаление, от началото на 2022г. не се регистрират данни от Сентинел-1 В, поради техническа повреда и данните, които ЕКА предоставя са отново през 12 дни на базата само на регистрираната от Сентинел-1 А информация.



Фигура 6. 3. А) Времеви редове от PCA данни за орбита 36 от 2015 до 2022 г.; В) Извадка от времеви редове от PCA данни 2019-2020 и формирани интерферометрични двойки (<https://search.asf.alaska.edu/#/>).

За да се направи правилният избор на PCA изображения, които формират конкретна интерферометрична двойка, е необходимо да се удовлетвори изискването за минимизиране на времевата декорелация, която се дължи на наличието на силно залесени райони в изследваните площи. Това препятствие може да бъде преодоляно, обработвайки само сцени от периода октомври – април, в които влиянието на растителността е по-малка. Други фактори, които трябва да бъдат отчетени, за да се получи надеждно интерферометрично изображение, са оценената преди обработка кохерентност да бъде поне 90%, а в същото време модулът на дължината на перпендикулярната базова линия  $B_{\perp}$  трябва да бъде по-малък от 100 m.



Фигура 6.4. Интерферометрично изображение и свлачищата “Трифон Зарезан”, свлачищен циркус „Дългия яр“, свлачища „Фиш-Фиш“ и „Тракийски скали“.

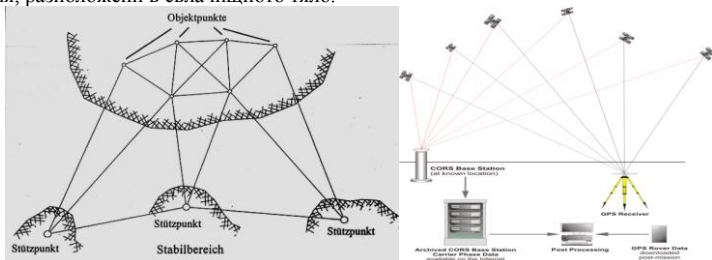
Генерирани са поредица от тематични интерферометрични изображения (виж фиг. 6.4), използвани за картографиране на деформации за района за свлачище “Трифон Зарезан“, свлачищен циркус „Дългия яр“, свлачища „Фиш-Фиш“ и „Тракийски скали“.

Крайните продукти от тази обработка са интерферометрични изображения, които регистрират движенията на земната повърхност и могат да бъдат използвани за определяне на зоните, в които се налага провеждане на подробни теренни измервания със средствата на Глобални навигационни спътникови системи. По този начин предлаганият комплексен подход осигурява ефективен метод от гледна точка на разходите за теренни проучвания на свлачищни райони и в същото време е осигурена възможността за постоянен мониторинг на големи площи от изследвания регион, включващи показаните на фигура 6.4 обекти. Този подход предоставя и допълнителна информация при актуализирането на наличните тематични карти за свлачищните зони в изследвания район на Североизточна България. Изпълнението на тези дейности даде възможност натрупаните резултати да се анализират и интегрират с резултати от другите проучвания. В рамките на това изследване се използват данни от PCA, като на базата на тях регулярно се получава информация за протичащите деформационни процеси на земната повърхност в определен район.

#### Геодинамични ГНСС мрежи

За верификация на получените резултати от SAR данните - за района на две от свлачищата са изградени локални геодинамични ГНСС мрежи.

Геодизическите мрежи, създадени за изследване на деформации (в конкретния случай проследяване на свлачищни процеси), се състоят от два типа точки (фигура 6.5) - контролни точки, разположени на стабилен в геоложко отношение терен и локални точки за провеждане на измервания, разположени в свлачищното тяло.



Фигура 6.5. Метод за наблюдение на свлачищни процеси с GNSS технология

Като стабилни точки с висока точност са използвани перманентните станции от ГНСС мрежата, поддържана и обработвана в „Националния център за обработка на ГНСС данни към НИГГТ-БАН“ (фигура 6.6). Изпълнението на дейностите стартира с регулярната обработка и анализ на данни от 6 перманентни ГНСС станции, локализирани в Североизточна България: Каварна – 2 станции, Варна, Шабла, Дбрич и Шкорпиловци – по една станция.



Фигура 6.6. Част от станциите на Националната перманентна ГНСС мрежа

Данните от станции на националната перманентна ГНСС мрежа са използвани за дефиниране на Референтната координатна система. Референтната система на ГНСС данните е 51

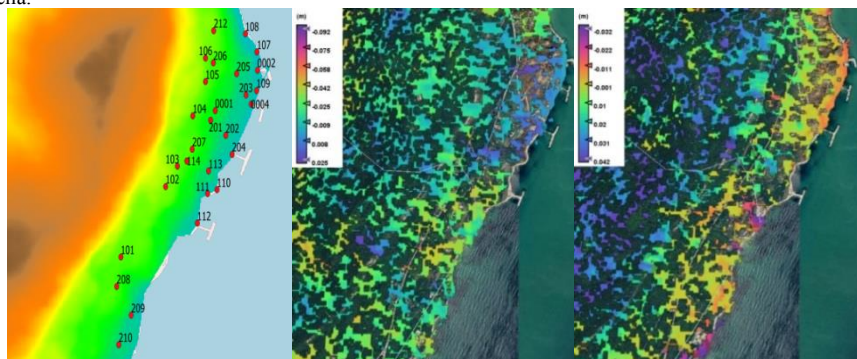
I TRF2018 Скоростите на точките от Националната ГНСС мрежа в Северното Черноморие са сравнително малки, под 1 mm/y. За да се получат движенията на точките от локалните геодинамични мрежи, се обработват техните GNSS измервания заедно с GNSS измерванията от точките на Националната GNSS мрежа.

За да бъдат успешно реализирани целите на изследването, беше изградена геодинамична мрежа, съставена от геодезически точки около и в района, подложен на свлачищни процеси. За целта са необходими циклични (кампанийни) ГНСС наблюдения през определен период, 1 година. По този начин може да се направи реална оценка на локалните движенията на земната кора в изследвания район. Станции от локалните ГНСС геодинамични мрежи са използвани за изследване на свлачище Дългия яр и свлачище Тракийски скали на Северното Черноморие. Точките са разположени в зоните на свлачищата и получените им скорости са със стойности около 25-30 mm/y

### 6.1. Свлачищен циркус "Дългия яр"

Изследваният район на свлачищния циркус "Дългия яр" се намира във Варненския свлачищен район, който включва крайбрежната ивица между Зл. пясъци и Кранево. Това са големи свлачищни комплекси (от циркусов тип), проявени по източния склон на Франговското плато – от ръба му до плажа. Този обект е доста специфичен, тъй като това е древна почти 10 km свлачищна ивица, която в момента е разчленена на по-малки свлачищни области. Установено е, че плъзгачата се повърхност на всички свлачища започва от плато, разположено на около 1 km от морския бряг. Трябва да се отбележи, че в тази област се наблюдава феномен – по-малко свлачище се развива в по-голямо. През следващите 25 години поради засилената техногенна намеса (строеж на къщи и друга инфраструктура) е имало няколко активации, които разрушават около 30 къщи. В „Годишния отчет на Геозащита ООД“ от 2019 е потвърдено, че в зависимост от геоложките и хидрогеоложките условия свлачищата са в относително стабилно състояние, близко до гранично равновесие, което може лесно да бъде нарушено от строителни дейности. Това е потвърдено от активирането на голямо свлачище, което води до срутване на десетки хиляди кубически метра земни маси по линия с дължина около 2 km. Това събитие разрушава напълно фара и сгради в рибарско селище, поставяйки в опасност морския път Варна-Балчик.

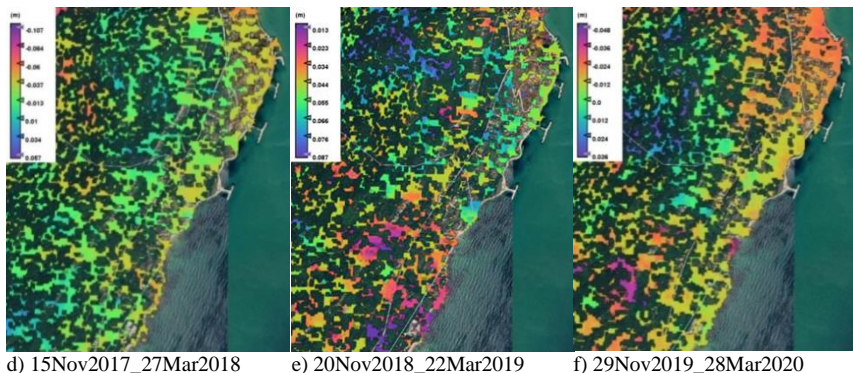
От прилагането на DInSAR (Nikolov & Atanasova 2023a) са получени цветно кодираните земни премествания в LOS, изчислени от фазовия сигнал за няколко периода чрез обработка на S-1 данни, показани на Фиг. 6.1.1 b-f. Периодът от време обхваща 4 месеца за зимните месеци от ноември 2015 г. до март 2020 г. Както се вижда, изчислените премествания са в диапазона между 2 cm (повдигане) и -10 cm (слягане). Получените ИФИ показват, че регистрираните деформации са концентрирани в някои локални зони с неравномерна структура. От тях е създадена карта на концентрацията на преместванията на земната кора. Пикселите със стойности на кохерентност под 0,3 във всички ИФИ са премахнати, тъй като се считат за ненадеждни. Цветът на пикселите представлява движението на повърхността в метрични единици за изследвания период, вариращ от тъмно синьо до лилаво. Особено уязвимите зони са показани в лилаво, а по-малко уязвимите в жълто и зелено. Зоната, оградена от полигона от геодезическите ГНСС точки 208, 209, 201, 102, 111 и 112 (фиг. 6.1.1a), е недостъпна, тъй като има стръмин отвесни склонове и голям наклон на терена.



a) GNSS мрежа

b) 20Nov2015\_11Mar2016

c) 26Nov2016\_20Mar2017



Фигура. 6.1.1 Случай на приложение на метода за изследване DInSAR за свлачище „Дългия Яр“:  
 а) геодезическа мониторингова мрежа; б-е) карто-схеми на преместванията

Тези точки се наблюдавани от GNSS измервания в отделни кампании (Atanasova et al., 2023b; Atanasova-Zlatareva et al., 2023c). Следва да се отбележи, че движенията на земната повърхност вътре в този полигон се наблюдават само по SAR данни и имат едни от най-значимите стойности на слягане за изследвания период.

Картите, показващи средните повърхностни премествания в посока LOS, са показани на фиг. 6.1.1.b-f. Изследователският подход демонстрира потенциала и способността на DInSAR да изучава и наблюдава свлачищата и да измерва тяхната тенденция в LOS със сантиметрова точност във времето, използвайки свободно достъпни данни и софтуер. За свлачищен циркус „Дългия яр“ е създаден набор от интерферометрични изображения за различни интервали време:

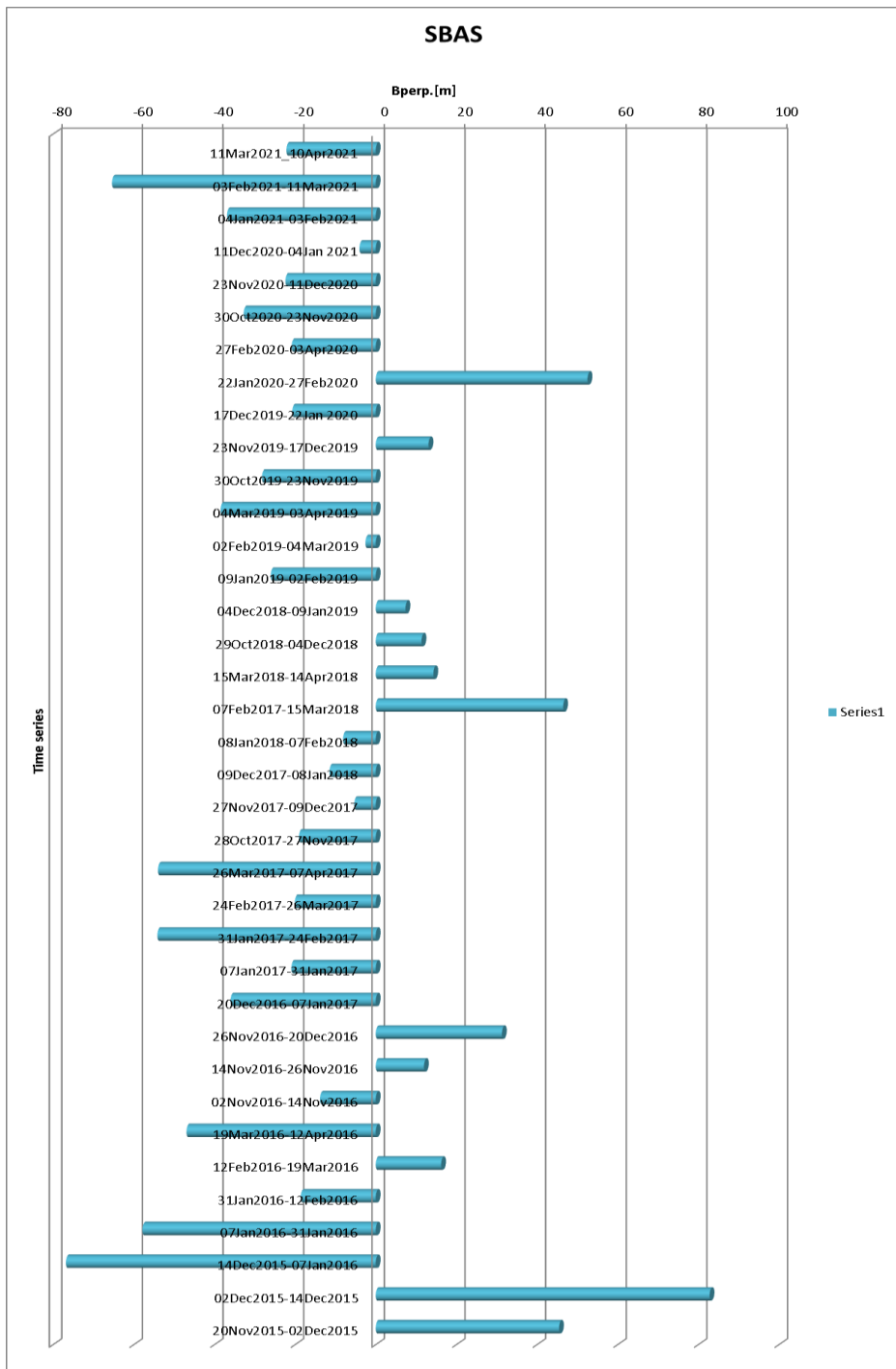
1) 4 месеца (8 месеца), включващи пролетни и есенни изображения (фиг. 6.1.1 )

2) времева серия през 12 до 30 дена (фиг. 6.1.3) и приложение на комбинирано MT-InSAR и SBAS (виж фиг. 6.1.2)

По време на изпълнението на изследването за оценка на движенията на земната повърхност в района на свлачищен циркус „Дългия яр“, бе предложено да се използва последователният метод DInSAR, който комбинира по-къси базови линии (short baseline subsets – SBAS) и кратък период от време между регистрациите на PCA данните, не по-дълъг от един месец, и по този начин да бъде най-подходящият за този конкретен обект. Направеният тест доведе до удовлетворяването на посочените ограничения в комбинация с високата пространствена разделителна способност на използваните PCA данни и позволи определянето на преместванията на земната повърхност по визирната линия на радара да бъдат по-точно изчислени.

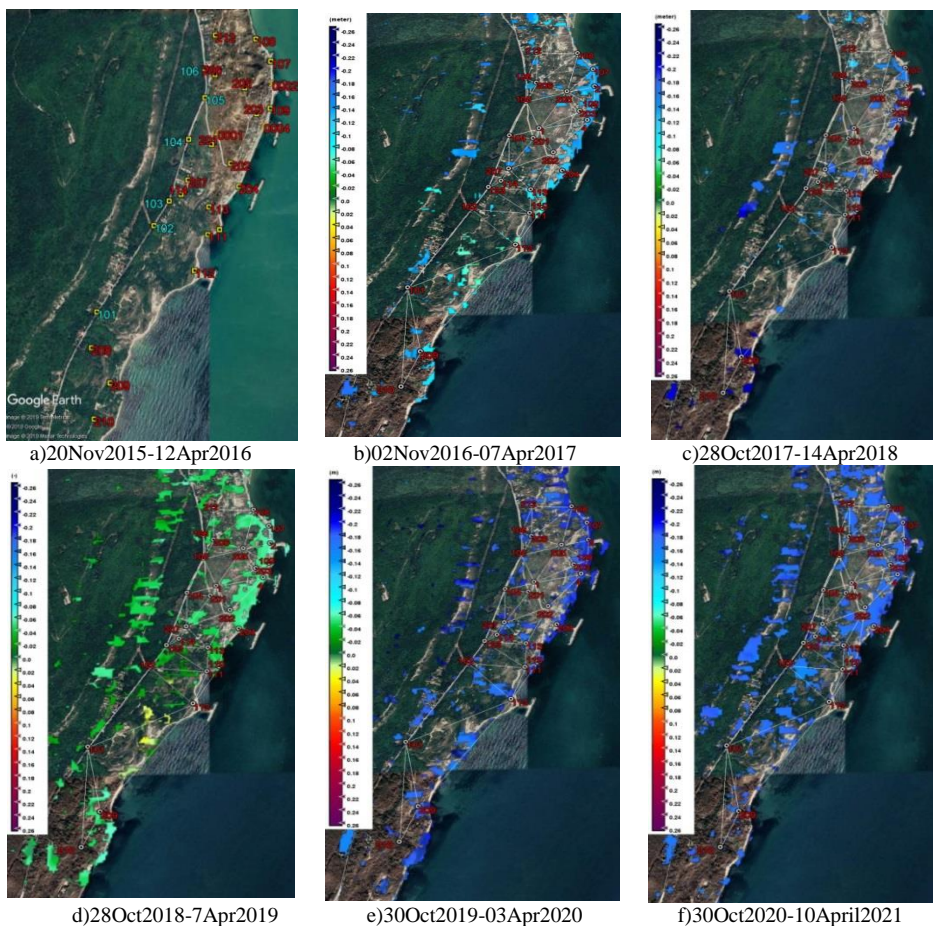
Подходът MT-InSAR се прилага широко в геонаучната общност. Той работи най-добре за естествени среди в голям мащаб и може да се използва за разглеждане на постепени промени на терена с течение на времето. MT-InSAR изисква като вход времева поредица от интерферограми, а като краен резултат създава времева серия, показваща повърхностните премествания.

На фигура 6.1.2 са показани използваните изображения, които формират времева серия от орбита 36 на Sentinel-1 за зимния период за времеви диапазон 2015-2021 г., заедно с перпендикулярната базова линия Врегр, използвана за откриване на активирането на свлачища в изследваната зона на „Дългия Яр“. Извършена е обработката на времеви редове от радарни данни за интервал от 12- 24 дена за свлачищен циркус „Дългия Яр“. Тази времева серия формира набор от интерферограми, чрез обработка на двойки данни със стойности за Врегр по-малки от 100 m, което е необходимо за намаляване на влиянието на топографията на терена в единична интерферограма и по този начин да се приложи подхода с множество от първични изображения. Този избор е оправдан от ограниченията за ниска времева декорелация и висока кохерентност и фазова точност. Друга цел, която се постигна при използване на времеви серии, е свързана с минимизиране на изкривяването на радиосигнала вследствие на атмосферните закъснения, което влияе негативно върху крайните резултати във фазовия канал на интерферометричните изображения. Те са причинени от факта, че състоянието на атмосферата, и особено на тропосферата и йоносферата, не е постоянно по време на регистрацията на данни от PCA апаратурата. Както бе казано по-горе, този ефект може да бъде намален чрез осредняване на няколко интерферограми за една и съща област.



Фигура 6.1.2. Времени редове от РСА данни орбита 36 за периода 2015 – 2022 г. и SBAS

Само пикселите със стойности на кохерентност по-висока от 0,3 са визуализирани на показаните на фигура 6.1.3 премествания, получени по MT-InSAR метода. Прави впечатление, че формите на зоните с валидни пиксели не са постоянни, което може да се дължи на промяната на позицията на повърхностни отражения, тъй като в изследваната зона са видими площи заети предимно от растителност. Друг факт, който се потвърждава от резултатите е, че движението на повърхността варира от година на година, което предполага, че те не са постоянни във времето, което най-вероятно се дължи на външни фактори, свързани с метеорологичните условия.



Фигура 6.1.3. Премествания регистрирани от PCA данни в посока LOS по MT-InSAR

**Контролна геодезическа мрежа** е създадена, в района на свлачищната зона „Дългия Яр” - „Фара”. Тя се състои от общо 30 точки, стабилизирани с метални тръби с дължина 35 cm метални болтове в скала (виж. фиг. 6.1.3 А). Локалните ГНСС измервания са проведени с помощта на 1 референтен и 1 подвижен ГНСС приемник. ГНСС приемниците са от тип СНСi80. Измерванията на всички точки са извършени в статичен режим с продължителност на измерването един час, а референтната станция е с наблюдения за около 6-8 часа с интервал на записа от 15 секунди. Референтната система е дефинирана от станции на националната перманентна ГНСС мрежа на НИГТ-БАН. Новосъздадената геодезическа мрежа, разположена вътре в зоната на свлачището е измервана веднъж годишно. Измервания на геодезическата мрежа "Дългия Яр" са извършени в периода 19-23 юни 2019 г. и 22-27 юни 2020г. 21-28 юни 2021 г. и 01-07 юли 2022г. Деформационният анализ на геодезическите мрежи е направен след третия цикъл на измерване. Точки 0204, 0208, 0211 са унищожени след първия цикъл, поради което не са включени в



последващ анализ. Преместванията на локалните GNSS точки (разположени в тялото на свлачищния циркус), изчислени между епохите 2019-2021 г. (между първи и втори, втори и трети и първи и трети цикъл) се основават на разликите на координатите за всеки цикъл и са представени в таблица 6.1.1 за северната и източната компоненти и компонентата нагоре. Изчислен е и 2D (хоризонталния) вектор на преместване за всяка точка от локалната мрежа.

Таблица 6.1.1. Премествания на точките от локалната GNSS мрежа „Дългия яр“, изчислени за епохи 2019-2021.

7	2020-2019 [mm]				2021-2019 [mm]				2021-2020 [mm]			
	ID	n	e	h	2D	n	e	u	2D	n	e	u
1	12.6	4.2	32.1	13.3	4	2.4	21.5	4.66	-8.6	-1.8	-10.6	8.79
2	1.8	16.1	2.8	16.2	1.3	16.7	8.4	16.8	-0.5	0.6	5.6	0.78
4	-15.9	12.6	-24.6	20.3	-13.5	20.4	63.9	24.5	2.4	7.8	88.5	8.16
101	-13.5	15.6	0.5	20.6	-19.4	34	3.2	39.1	-5.9	18.4	2.7	19.3
102	-28.5	25.1	24.2	38	-95.9	18.6	93.7	209	-67	160.5	69.5	174
103	-20.2	20.2	34.5	28.6	-28.2	53.1	21	60.1	-8	32.9	-13.5	33.9
104	-14.1	5.5	27	15.1	-21.3	-9.3	25.3	23.2	-7.2	-14.8	-1.7	16.5
105	-8.3	7.4	-4.3	11.1	-6.1	-9	14.9	10.9	2.2	-16.4	19.2	16.5
106	-2.7	0.1	-0.7	2.7	5.6	-24.8	24	25.4	8.3	-24.9	24.7	26.2
107	10.6	10.7	-3.4	15.1	10.8	6.3	24	12.5	0.2	-4.4	27.4	4.4
108	5.2	8.9	0.1	10.3	16.4	2	10.8	16.5	11	-6.9	10.7	13.2
109	8.1	-3.8	-60	8.95	13	-1	-5.1	13	4.9	2.8	54.9	5.64
110	-14.4	69.9	80.6	15.9	-15.4	10.7	87.4	18.7	-9.9	37.4	6.8	38.7
111	-21.2	5.7	-22	22	-11.3	24.3	32.6	26.8	9.9	18.6	54.6	21.1
112	-7.6	2	17.7	7.86	21	15.6	59.2	26.2	29	13.6	41.5	31.7
113	-23.3	16.4	31.6	28.5	-24.4	39.9	41.3	46.8	-1.1	23.5	9.7	23.5
114	8.3	12.8	-24	15.3	1.9	6.2	5.3	6.48	-6.4	-6.6	29.3	9.19
201	1	1.5	15.1	1.8	-9.4	3	32	9.87	-10	1.5	16.9	10.5
202	-5	2.9	12.7	5.78	-14.3	-1.1	26.4	14.3	-9.3	-4	13.7	10.1
203	3.4	3.5	17.1	4.88	8.3	-0.7	33.7	8.33	4.9	-4.2	16.6	6.45
205	-15.9	-14.8	24.2	21.7	-41	55.1	90.9	68.7	-25	69.9	66.7	74.3
206	2	-6.1	4.7	6.42	-5.9	3.9	32.2	7.07	-7.9	10	27.5	12.7
207	-18.1	4.7	40.1	18.7	-4.2	5.2	42.9	6.68	14	0.5	28.1	13.9
209	11	24.9	-50.3	27.2	54.8	34.2	-50	64.6	44	9.3	0.2	44.8
210	-21	-17.26	-21.4	17.4	-21.1	-17.4	-22	17.6	-0.6	-17.1	-24.3	17.1
212	-11.3	-1.5	37.1	11.4	-11.9	15.3	51.5	19.4	-0.6	16.8	14.4	16.8

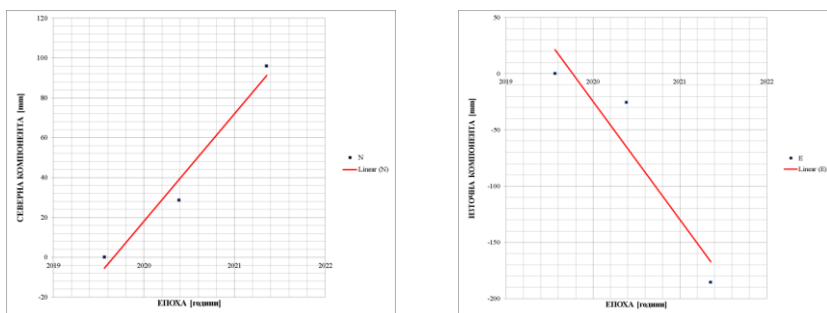
Честа практика е използването на редуцирани (към повърхността на референтен елипсоид или в проекция на картата) геодезически измервания. Подобен подход, който е императивно приложим в геодезията, води до значителни неточности на деформационния модел. Трябва да се спомене, че съществуват различни геодезически методи, които се използват за определяне на преместванията на точки от земната повърхност, обхващащи фиксиран период от време, причинени от активирани на различни геодинамични явления. Тези премествания са свързани с избора на използваната координатна система с фиксирано начало. Трябва да се подчертае, че абсолютно фиксирани точки на земната повърхност не съществуват - така че самите движения са

до известна степен относителни. Поради това е по-целесъобразно анализът на изследваните геодинамични явления да се базира на елементи, независими от координатното начало – базисни линии. Определят се базови линии, чиито деформации във времето ще бъдат основа за определяне на основните деформационни компоненти на изследвания обект по два основни начина: чрез координатите на техните крайни точки и чрез директно измерване на базовите линии. Директното определяне на дължините на хордите в пространството е в съответствие с най-точните и съвременни геодезически методи - ГНСС, Лазерни скенери, LIDAR. На този принцип се възприе стратегията за изследване на деформационните процеси чрез използване на пространствени хорди на базата на геодезически измервания. Извлечение от базисните линии е представено в таблица 6.1.2.

Таблица 6.1.2. Съпоставяне на разстоянията от геодезически измервания - епохи 2019-2021 г.

Baseline ID	2019	2020	2021
0001->0203	255.3331	255.3306	255.3326
0001->0202	196.0049	196.0235	196.0192
0001->0201	75.4893	75.5011	75.5091
0001->0205	304.7517	304.7176	304.7179
0001->0206	337.2371	337.2221	337.2279
0001->0105	217.2407	217.2401	217.2343
0001->0106	378.8347	378.8397	378.8419
0002->0107	128.0989	128.1059	128.1179
0002->0108	270.0403	270.052	270.0633
0002->0109	144.131	144.1192	144.1143
0002->0207	741.9788	742.0012	742.0229
0111->0004	699.9488	699.9462	699.9451
0112->0004	929.0988	929.0588	929.0694
0113->0004	567.9632	567.96	567.9611

За апроксимация на скоростите е използван линеен регресионен модел. По време на обработката може да се избере дали всички измервания от всички епохи да бъдат включени в повечето изчисления, или тези, които показват големи отклонения, трябва да бъдат премахнати. Пространствените координати X, Y, Z се трансформират в локални координати с компоненти север N, изток E и нагоре U, докато епохата 2019.4658 се счита за нула. В този случай се определя нарастването по северната (източната) компонента и координатите на точката за всяка следваща епоха се намаляват със стойностите на координатите от нулевата епоха. Абсцисата показва графично нарастването по северната (източната) компонента, а по ординатата на времевите интервали. Апроксимирана е стойността на скоростта като линейна функция (линейна регресия), показваща апроксимацията на стойностите на скоростта по северната и източната компонента за точка 102, подходът е аналогичен за останалите 30 точки на мрежата ( фигури 6.1.5а. и 6.1.5б.).



Фигура 6.1.5. Скорости на преместване по северната и източната компоненти за т. 102 точка от локалната геодезическа мрежа, определени чрез линейна регресия.

За по-голямата част от геодезическите изследвания на деформации се използва Методът на крайните елементи (МКЕ) при анализ на движенията на станции (точки) въз основа на резултати от обработка на GNSS данни, за да се получат тензорите на деформацията и натрупването на деформация. Както се спомена по-горе, възприетата методика за изследване на деформационните процеси е чрез използване на пространствени хорди, въз основа на геодезични измервания.



Фигура 6.1.6. Линейни деформации за периода 2019-2021 (червени вектори - разширения; сини вектори - компресия) и главни оси на относителна деформация спрямо центъра на тежестта на триъгълниците.

За всеки от триъгълниците се съставя и определя система от три уравнения, в резултат на които се получават тензорни компоненти на "чиста" деформация. Изчислени са и главните оси на относителните деформации спрямо центъра на тежестта на триъгълника. Всички тези елементи характеризират деформационните процеси, приведени към равнината на съответния триъгълник. Графични изображения на основните оси на деформация са дадени на фигура 6.1.6. Използвани са

резултатите от GNSS измервания за периода 2019 - 2021 г., на базата на които са изчислени базовите линии между точките (фиг. 6.1.6).

Получават се относителните линейни деформации на всеки краен елемент и те са показани на фигура 6.1.6 (компресия в синьо и разтягане в червено). Относителните главни деформации на крайните елементи в участъците в циркуса показват, че през изследвания период от време движенията са с преобладаващо разтягане в диапазона от 0,5 mm до 30 mm и посоките са предимно запад-изток. На фигура 6.1.6 ясно се виждат разтягания в северната и в южната част на свлачищния циркус, които са приблизително с еднаква големина. Посоките на основните деформации на разтягане или свиване на всеки краен елемент доминантно се определят от вида на деформациите на страните на съответния краен елемент.

Разработена е методика за съвместно използване на наземни и сателитни РСА данни и тяхното съвместно интерпретиране с данни от допълнителни източници. Анализът и оценката на геопроцесите в свлачището "Дългия яр" е да спомогне за предотвратяване на рискове и бедствия от природен и антропогенен произход. Важен етап е безпроблемното включване на данни от различни източници като геодезически измервания, сателитни данни от РСА, както и геоложки и геофизични данни. Създадената гео-база данни структурира събраната информация за опасни геопроцеси в споменатия район и я въвежда в средата на ГИС (Географска информационна система). Целта е да се улесни анализа на наличните данни за това свлачище и да ги интегрира с резултатите от измервания от редовен мониторинг. В базата данни са включени интерферометрични изображения (ИФИ), данни от перманентни ГНСС станции и от локална геодинамична ГНСС мрежа, геоложки, сеизмични и геофизични данни, актуализирани геоложки карти и карти на риска от свлачищни процеси. ИФИ са създадени с помощта на добре установена процедура по т.4 за обработка на голям брой РСА данни от Sentinel-1 на специално създадения локален архив. Друг ключов елемент, използван за подобряване на крайните резултати от обработката на РСА данни и важна част от геобазата данни, е използването на прецизен цифров модел на релефа (DMP - DEM Digital Elevation Model), който е много по-добър по отношение на хоризонтални и вертикални разделителни способности от тези с отворен достъп (напр. SRTM). Координатите на ГНСС точките са получени от изравнението и анализа на измервания на геодинамичната контролна мрежа на свлачището "Дългия яр".

Важни условия за развитието на ерозионни, абразионни и свлачищни процеси по склоновете са: специфичното разнообразие на скалите и почвите, наклонът на пластовете, наличието на глинести пластовете, слаби пластовете, тектонски нарушени зони и наличие на подземни води (Berov et al., 2024; Nankin & Ivanov. (2019). Склоновете се влияят от природни и техногенни фактори, които допринасят в различна степен за възникването на свлачища. Природните фактори са свързани с подсичане на основата на склоновете, причинено от ерозионното действие на реките и техните притоци чрез образуване на дерета, както и от морската абразия. Съществува тясна връзка между районите с активна ерозия и абразия и протичането на гравитационни процеси – свлачища, каменопади и плъзгащи склонове. Тъй като предметът на изследването са свлачищни процеси, регионалните данни относно геологията, земното покритие/земеползването и сеизмичността са изследвани като движещи фактори за появата на свлачища и времето развитие.

Основният принос на това изследване е прилагането на мултitemпоралния метод по DInSAR, базиран на РСА сателитни данни за регистриране и изчисляване на движенията на повърхността, причинени от бавно движещите се свлачища в района на изследване и като краен информационен продукт за получаване на карти относно тяхното времево поведение. Трябва да се подчертае, че за някои области в района на изследване това може да е единственият подход за редовно получаване на информация за протичащите свлачищни процеси, тъй като стръмните наклони на някои места възпрепятстват преките теренни измервания.

В рамките на изследването за създаване на интерферометрични изображения с възможно най-високо качество е използван локален DEM, който има пространствена разделителна способност, сходна с тази на обработените данни. Тъй като в тази специфична област на изследване доминиращите обекти на движение на повърхността на това изследване са в посока запад-изток, това предопределя използването РСА данни да бъдат от низходяща сателитна орбита. От споменатата посока на орбита радарното засенчване за изследваната област е относително малко, ако има такова.

Крайбрежната част на този район е част от древно свлачище, започващо от курорта Златни пясъци, южно от град Крушево. Специфични за този участък от брега са отрицателните понижения, блоковите възвишения, локалните блата и плитките подпочвени води. В рамките на тази древна, сравнително стабилизирана свлачищна зона са обособени локални активни свлачищни зони – спирките „Кипарис“, „Обзор“, фар „Екрено“, „Панорама“ и „Рибърско селище“.

На 8 октомври 2012 г. в 3.30 часа сутринта се активизира огромно свлачище в района на фар Екрене. Пропаднаха са няколко десетки хиляди кубически метра земна маса. Обхванатата от него ивица е близо 2 km, като най-засегнато е рибарското селище на плажа. Свлачището е унищожило изцяло 100-годишния фар. Пътят до морето е напълно унищожен, затрупани са рибарските фургони, които са били на плажа. Бетоновата алея на брега на морето е повдигната с 15 метра. Пътят Златни пясъци – Кранево е застрашен от пропадане.

Свлачището между геодезически точки 212 и 108 започва своето развитие през 1998 г., през 2012 г. се разраства още повече и към момента засегнатата площ се оценява на 7,5 ха. Основните причини за активизирането на съвременните свлачища са проникналите дъждовни и отпадъчни води, влошили якостните показатели на скалите. В централната част на това свлачище вдлъбнатината е над 10 m. В момента се счита, че се движи бавно, но активно и продължава разширяването си в северна посока, което се доказва от разширяването на съществуващите пукнатини и повята на нови.

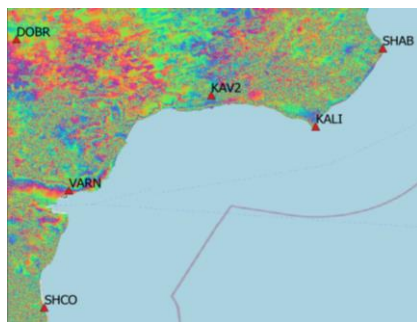
В района на следващото свлачище се намират геодезическите точки – 201, 202, 203, 0001 и 205. Първото регистрирано активизиране на това свлачище е през 1971 г. Образуван са свлачищен ров с височина до 15 м и свлачищни валове в морето с височина 4,0 м, както и е установена денivelация на земни маси до 17 м. Това свлачище е с дължина около 250 м и ширина около 800 м. В периода 1971-1983 г. около 30 вили са напълно разрушени, а други са частично засегнати. Основните причини за неговото активизиране са комплексни – геоложки и хидрогеоложки условия; морска ерозия; строителните дейности и водоснабдяването на тази вилна зона; липсата на канализация (Годишен отчет на Геозащита ООД, 2019).

Основните резултати от това изследване са от два източника данни – полеви и сателитни. Първият се състои от обработени данни от националната перманентна ГНСС мрежа, главни разломи, регистрирани в EDSF <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf>. и локални разломи, въведени в националната геоложка карта с мащаб 1:100 000 (виж фигура 6.1.8).

Проучваният свлачищен район е изобразен на фигура 6.1.10, където са дадени приблизителните местоположения на известните и регистрирани свлачища.



Фигура 6.1.8. Точки от Национална перманентна ГНСС мрежа (червени триъгълници), главни разломи (сини и кафяви линии) и регионални разломи (черна пунктирна линия)



Фигура 6.1.9. Станции от Национална перманентна ГНСС мрежа (червени триъгълници), подложен растер от примерна ИФИ (Atanasova-Zlatareva et al., 2020).

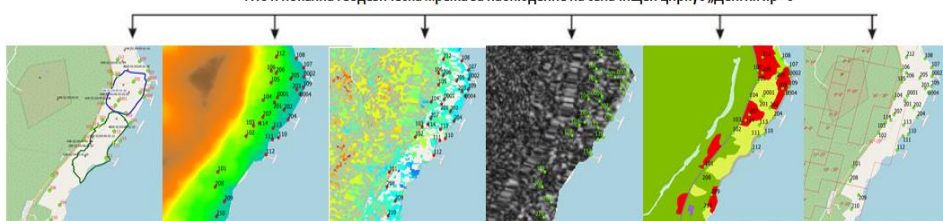
Както се спомена в предишния раздел, за получаване на надеждна информация след обработка на данните за РСА, изборът на правилната посока на орбита – възходяща (посока S-N) или низходяща (посока N-S) играе ключова роля. Този избор е важен, защото за сателита Сентинел-1 антената на радара винаги сочи надясно. Видът на орбитата определя ъгъла, под който изследваните участъци от земната повърхност се „виждат“ от инструмента и поради това регистрираните относителни премествания са различни за двата типа орбити. За това изследване се оказа, че обработката на данни от низходяща орбита осигурява по-добри резултати, така че резултатите относно получената информация за SAR, показана на фигури 6.1.9, 6.1.12 и 6.1.13 са от тази орбита. На фигура 6.1.9 е представено ИФИ, създадено от данни за РСА за периода 26 ноември 2016 г. – 20 март 2017 г.

На фигура 6.1.12 е показана растерна карта-схема на преместванията от произведените ИФИ, получени от РСА данни, обхващащи периода 26 ноември 2016 г. – 20 март 2017 г. Те са получени след изпълнение на процедурата за разгъване на фазовия сигнал и след трансформиране на целочислените  $\pi$  стойности в метрични единици. Цветът на пикселите представлява

движението на повърхността в размерност на метър за изследвания период, вариращ от тъмно син (съответстващ на  $-0,14$  м) до червен (съответстващ на  $0,07$  м). Особено уязвимите зони са показани в тъмно синьо (фигура 6.1.12), а по-малко уязвимите в жълто и зелено. На същата фигура се вижда, че има „празни“ области, защото за тези области стойностите за кохерентния растер са под прага от 0,3 и поради тази причина са намахнати (виж фигура 6.1.12). От прилагането на този подход се предоставя само значима и надеждна информация за по-нататъшен анализ.

Площта, оградена от полигона от точки 208, 209, 201, 102, 111 и 112 е недостъпна, тъй като е с най-голям наклон и поради това не е възможно да се поставят геодезически точки и да се провеждат ГНСС измервания. Преместванията в тази зона се наблюдават само чрез данни за РСА и имат едни от най-високите стойности на потъване за периода. Пример за оценка на свлачищната активност въз основа на това ИФИ, показана на фигурата 6.1.12 е че слягането варира до  $-92$  mm.

ГИС и локална геодезическа мрежа за наблюдение на свлачищен циркус „Дългия яр“ с



Фигура 6.1.10. Локална геодезическа мрежа, използвана за наблюдение на свлачищата в местността „Дългия яр“ и районите на изследваните свлачища

Фигура 6.1.11. Локална геодезическа мрежа, използвана за наблюдение на свлачищата в района на „Дългия яр“ върху DEM с хоризонтална разделителна способност от 8 м

Фигура 6.1.12. Локална ГНСС мрежа, използвана за наблюдение на свлачищата в местността „Дългия яр“ върху растер, съответстващ на денивелации и регистрираните премествания за периода 26.11.2016 г. – 20.03.2017

Фигура 6.1.13. Локална геодезическа мрежа и растерен слой, съответстващ на стойностите на кохерентност, регистрирани в ИФИ за периода 26.11.2016 г. – 20.03.2017

Фигура 6.1.14. Локална геодезическа мрежа, използвана за наблюдение на свлачищата в района на „Дългия яр“ под класовете от продукта Coastal Zones 2018

Фигура 6.1.15. Локална геодезическа мрежа, използвана за наблюдение на свлачищата в местността „Дългия яр“ и наклона на склоновете

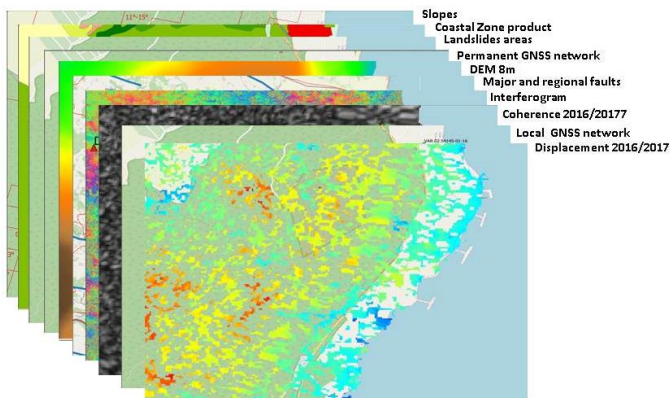
На фигура 6.1.13 е представен растерният слой със стойностите на кохерентност за същата област, както е показан на фигура 6.1.12. Значението на тези стойности е посочено по-горе, но трябва да се отбележи, че за точките от локалната геодезическа мрежа тяхната величина е висока, което се представя от цветове, вариращи от светло сиво до бяло. За да се получи големината на повърхностните премествания в хода на интерферометричната обработка, от съществено значение е да се елиминира приносът на релефа във фазовия сигнал, поради което е необходим външен референтен DEM. В това изследване авторът използва широко валидиран продукт от мисията SRTM с хоризонтална разделителна способност от 1 arcsec ( $\sim 30$  м в хоризонталната равнина). Важен елемент в това проучване е наличието на локален цифров модел на релефа за тази зона на изследване (показан на фиг. 6.1.11). Този DEM е използван по време на интерпретацията на ИФИ, както и в процеса на анализиране на получената информация, обосноваваща резултатите.

За да се подчертае важноста на резултатите, са използвани и други спомагателни данни, като продукт CoastalZones 2018 от програма „Коперник“, наклони на терена и приблизителни контури на свлачищата (<https://land.copernicus.eu/local/coastal-zones>). На фигура 6.1.14 е представена извадка от продукта CoastalZones 2018 за изследваната зона, която се използва за растерна подложка под точките от локалната геодезическа мрежа. Както се вижда, има няколко класа – 11120 плътна градска среда в червено; полустествени пасища - в жълто; естествена и полустествена широколистна гора в зелено; крайбрежни скали в сиво. Този слой от геобазата данни се използва за обозначаване на заплахата, която представляват изследваните свлачищата, главно за постройките и инфраструктурата в района, както и за ландшафта.

На фигура 6.1.15 са показани също наклоните на релефа (в градуси) за района на изследване (<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-landslide-susceptibility-map-elsus-v2>). Причината за включването на тази информация в реализираната геобазата данни е необходимостта от оценка на податливостта за бъдещо активиране на свлачища, причинени от природни (дъждовна, морска ерозия) и техногенни (незаконно строителство, повреди на водопроводи)

дейности. В комбинация с информацията от фигура 6.1.16 могат да се изготвят по-добри планове за управление на ландшафта или да се постигне по-добра готовност при управлението на кризисни ситуации.

Основната цел е да се създаде локална база данни с геоданни, за да се подобрят знанията и да се улеснят бъдещите базирани на ГИС изследвания в една от свлачищните зони. Основните елементи на тази база геоданни са растерните слоеве, получени от обработката на РСА данни – интерферометрични и кохерентни изображения, както и изображения на неразгънатия фазов сигнал. Всички споменати слоеве са в координатна система UTM35 и WGS84, за да бъдат полезни в повечето настоящи и бъдещи приложения, а не в БГС2005, която най-често се използва само специализирано от геодезисти. Освен споменатите слоеве, са включени и други, за да се подобри разбирането на протичащите геодинамични процеси и да се подпомогне оценката на щетите, причинени от активирането на свлачищата. Избраната структура на тази база геоданни е да интегрира по безпроблемен начин възможно най-много свободно достъпни пространствени набори геоданни, които се обработват и анализират от софтуер с отворен код.



Фигура 6.1.16. Слоеви, включени в създадената геобаза данни за мониторинг на свлачищата в местността „Дългия яр“ (Atanasova-Zlatareva et al., 2020).

На фигура 6.1.16 са показани всички включени в момента слоеве в разработената ГИС база геоданни. Неговата цел е да подпомогне учените, експертите и местните власти при изследване на протичащите геодинамични процеси чрез предоставяне на надеждна информация от тематично обработени РСА данни и комбинирането ѝ с други налични данни, за да се улеснят анализите в ГИС среда.

Резултатите от обработката на РСА данните, посочени по-горе, потвърждават факта, че ИФИ, получени от сателитни РСА данни, предоставят надеждни данни за изследване на земните премествания, възникнали в резултат на движение на свлачища. За някои райони от зоната „Дългия яр“ тази информация може да се счита за единствен източник за повърхностни движения, тъй като релефът затруднява достъпа до тях за друг вид техника. Тази информация е ключовият елемент от създадената локална база геоданни за изследвания регион и затова едно от предизвикателствата е да се гарантира нейната надеждност, докато други източници на данни се считат за вече валидирани, преди да бъдат предоставени на обществеността. Разработеният продукт може да се разглежда като първа стъпка към разработването на регионален хъб данни, който може да се използва за справяне с много по-широк набор от проблеми от тези, които са предмет на това изследване.

## 6.2. Свлачище "Тракийски скали"

Свлачището „Тракийски скали“ е активно свлачище, намиращо се в близост до с. Топола, община Калиакра. Вписано е в Националния регистър на свлачищата като DOB 17.05009-01-03. Свлачището се развива по крайбрежния склон, точно пред входа на голф клуб "Тракийски скали" (фиг. 6.2.1). Според „Геозащита Варна“ ООД (2018 г.) свлачище „Тракийска скала“ се проявява в предната част на древно стабилизирано свлачище „Калкан тепе“. Древното свлачище е от блоков тип (Nankin et al., 2020). На терена ясно се виждат свлачищни пакети, разположени на различни нива. Между тях са оформени множество негативни безотточни форми с различни размери, които задържат голямо количество повърхностни води (Nankin et al., 2020). След извършения оглед на

03 април 2019 г. е констатирано, че видимо свлачището е активно. Пътят към голф клуба е асфалтиран и в новата настилка на места се виждат тънки пукнатини с размер 2-3 cm, които в рамките на 4 години (2019-2022) са се увеличили и дори са се появили и нови. Под пътя ясно личи движението по десния (източния) борд на свлачището, който е насечен от няколко свлачищни блокове и ясно се очертават множество пукнатини, които се увеличават всяка година с по 2-3 cm (фигура 6.2.1 и 6.2.2). Масивните сгради преди входа на голф клуба, които са засегнати от протичащите свлачищни процеси, са наклонени, с пукнатини, необитаеми и видимо изоставени.



Фигура 6.2.1. Свлачище преди голф клуб „Тракийски скали“.

От направените теренни наблюдения в зоната на това свлачище се изчислява, че площта му е около 11 ха и има неправилна форма, като склона на свлачището е с височина между 12 и 15 м. Геолозите предполагат, че повърхнината на плъзгане се намира на дълбочина 10 – 15 м. (Nankin et al., 2020). Повърхностните движения в района му са причинени от два различни, но допълващи се процеса – първият е преовлажняването на земните маси от дъждове и снеготопене, както и други водоизточници с неизвестен произход, а вторият е морската ерозия. В литературата (Bruchev et al., 2007; Verov et al., 2013) по проблема се посочва, че основният материал на земните масиви в този район са арагонитовите глини, които проявяват значителна чувствителност и са склонни да образуват свлачища при намокряне. Местоположението на изследваната зона и актуална снимка (юли 2021г.) на свлачищния район са показани на фигура 6.2.1 и 6.2.2. На тях се виждат и изключително стръмният склон в долната част на свлачището, което прави невъзможни теренните наблюдения.

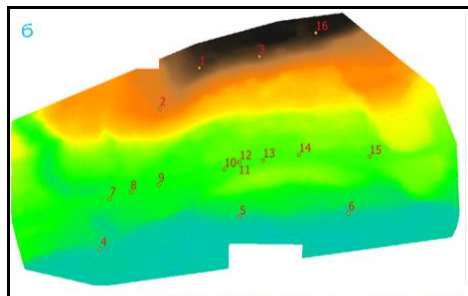


Фигура 6.2.2. Източен борд на свлачището преди голф клуб „Тракийски скали“ - 2021г.

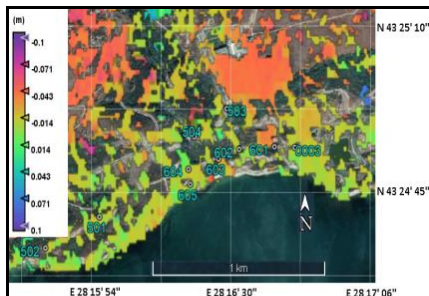
Целта при изследването на този обект е да се създаде солидна основа за изследване на съвременните геодинамични процеси в свлачищната зона, разположена между селата Топола и Божурец на Българското Черноморие. Изследваният район, в който се намира обектът през последното десетилетие е подложен на силен антропогенен натиск, тъй като в него са изградени



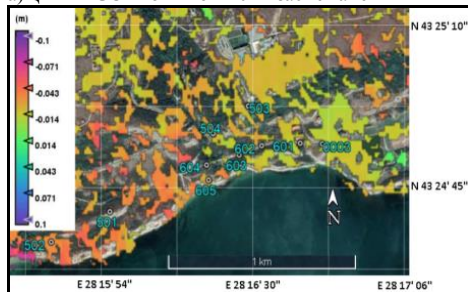
няколко туристически и ваканционни имота, някои от които вече са разрушени поради липса на предварителен мониторинг на повърхностните движения в него. За да се регистрират предходни и текущи движения на повърхността, са използвани данни от РСА, който е основният инструмент на мисията Sentinel-1. За тази цел е създадена локална геобазата данни (ЛГБД), в която е събрана цялата налична информация относно тази конкретна зона, включително геоложки карти, хидроложки описи, геодезични данни от национални и местни геодинамични ГНСС мрежи информация за земеползването/земното покритие в споменатото крайбрежно зони, оптични изображения от безпилотни летателни системи и сателити, освен данните от РСА.



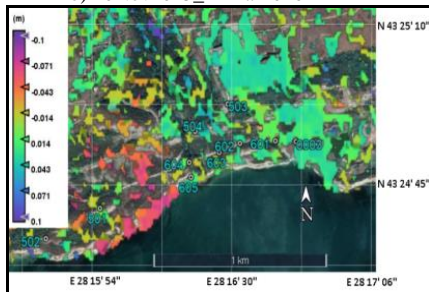
а) ЦМТ и GCP точки от БЛА заснемане



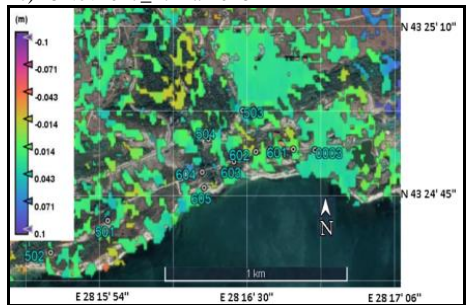
б) 20Nov2015\_22Mar2016



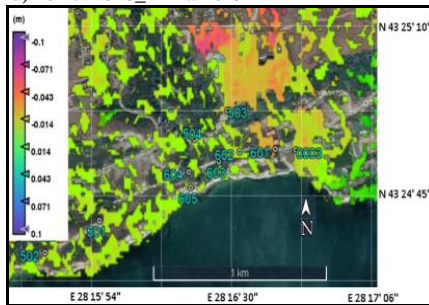
с) 15Nov2017\_27Mar2018



д) 20Nov2018\_22Mar2019



е) 29Nov2019\_28Mar2020



ф) 23Nov2020\_23Mar2021

Фигура 6.2.3. ЦМТ създаден от БЛА заснемане и GCP точки; б-ф) карти на преместване на земната повърхност.

На фиг.6.2.3.б-ф са показани карти на преместванията на земната повърхност, получени след обработка на интерферометричните изображения на SAR данни, обхващащи различни периоди. Те са получени след изпълнение на процедурата за разгъване на фазовия сигнал и след трансформиране на целочислените  $\pi$  стойности в метрични единици. Цветът на пикселите представлява движението на повърхността в метрични единици за изследвания период, вариращ от тъмно синьо до лилаво. Получените стойности след обработката на възникналите премествания на земната повърхност в LOS са в интервала между +8 и -10 cm за фиксиран период от време. Предимството при използването на метода DInSAR е, че позволява получаване на информация за поведението на големи площи без необходимост от скъпо оборудване и човешки усилия.

Технологията също така позволява дългосрочни наблюдения, проследяване на различни геоложки явления и получаване на много по-големи количества и достатъчно точни данни за картографиране на пукнатини и наблюдение на развитието на свлачищата.

Създадена е **геодезическа мрежа**, обхващаща свлачищната зона и пътя за голф клуб „Тракийски скали“. Тя се състои от общо 10 точки, стабилизирани с метални тръби с дължина 35 cm, използвани за наблюдение на деформациите по пътя, водещ до голф клуба (точки 601 – 604 на фигура 6.2.4) и точки, разположени в скалите и пътеката, свързваща морския бряг с курорта „Топола Скайс“ (точки 503, 504, 605 на фигури 6.2.4). Първият цикъл на измерване на ГНСС мрежата е извършен 18-23 юни 2019 г., вторият - 20-24 юли 2020г., третият 21-28 юли 2021 г., и четвъртия 01-07 юли 2022г.

За установяване на земните премествания на точките от създадената локална GNSS мрежа са използвани данни от националните перманентни станции, поддържани от НИГГТ-БАН. Обработени са три цикъла на GNSS измервания на локалната геодезическа мрежа (2019, 2020, 2021г.). Резултатите за преместванията, регистрирани по този метод, са показани в таблица 6.2.1. За съжаление, точката с номер 504 не е намерена (вероятно унищожена) по време на последното GNSS измерване и това е причината в същата таблица да има липсващи стойности.



Фигура 6.2.4. Свлачище голф клуб „Тракийски скали“ и геодинамична ГНСС мрежа.

Таблица 6.2.1 Премествания, получени чрез обработка на данни от три цикъла GNSS измерване на геодезическа мрежа, обхващаща свлачищната зона голф клуб „Тракийски скали“.

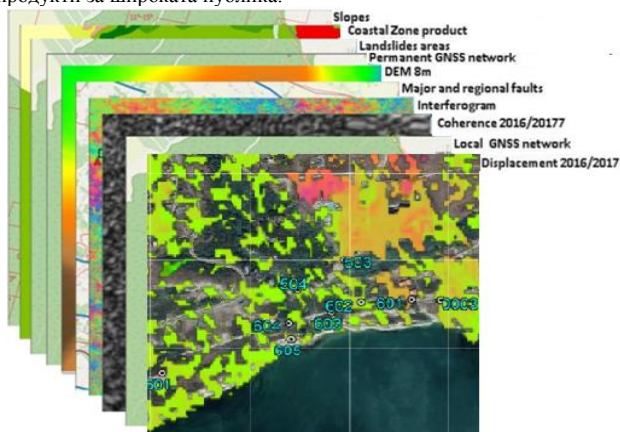
	2020-2019			2021-2020			2021-2019		
	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	$\Delta H$ [m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	$\Delta H$ [m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	$\Delta H$ [m]
501	-0.032	0.002	-0.054	0.042	-0.03	0.087	0.01	-0.028	-0.067
502	0.007	-0.004	-0.019	0.008	-0.03	0.005	0.015	-0.034	-0.014
504	0.007	0.016	0.01	–	–	–	–	–	–
601	-0.025	0	-0.032	0.011	-0.033	0.064	-0.014	-0.033	0.032
602	-0.022	-0.018	-0.024	0.01	-0.028	0.066	-0.012	-0.046	0.042
603	0.005	-0.013	-0.017	-0.004	-0.034	0.058	0.001	-0.047	0.041
604	0.007	-0.006	-0.032	-0.003	-0.038	0.08	0.004	-0.044	0.048
605	-0.011	0.004	-0.032	0.008	-0.04	0.06	-0.003	-0.036	0.028

От предоставените резултати в таблица 6.2.1 е видно, че вертикалните движения не са постоянни и равномерни. Периодите 2020-2019 г. и 2021-2020 г. показват различно поведение, променящо се от слягане към повдигане. Това предполага, че има продължаващи свлачищни движения, които не са само от тип плъзгане, но част от земните маси са се натрупали в долната част на свлачището, причинявайки това повдигане.

Заснемането на свлачище "Тракийски скали" с БЛС и създаването на локален, високоточен цифров модел на релефа (ЦМТ) е извършено през ноември 2021 г като са използвани Ground Control Points (GCP) точки измерени чрез RTK (Real Time Kinematic GNSS – ГНСС кинематика в реално време) метод (виж фигура 6.2.3 а).

Друга цел на изследването е създаването и актуализирането на споменатата ЛГБД с помощта на инструменти за обработка с отворен код, като QGIS, включваща публично достъпни данни от различни източници, напр. данни и продукти на Коперник. Ключов елемент от това изследване е да се хармонизират вече наличните данни и да се създаде методология за тяхното

интегриране в ЛГБД, както и да се създаде протокол за бъдещо събиране на данни от споменатите източници и тяхното интегриране в геобазата данни. Създадената ЛГБД позволява **синергична** интерпретация на данните, като по този начин осигурява по-добро моделиране на изследваните геодинамични процеси от голям брой експерти в различни области на приложение. **Синергия** (синергизъм) е взаимодействието между фактори, обуславящи сходни процеси, при което полученият ефект е по-голям от сумата на индивидуалните ефекти, дължащи се на отделните фактори. Така полученият информационен продукт е с високо качество и позволява безпроблемна интеграция на създадената ЛГБД в по-обхватни регионални хиперкубове с данни, които набират популярност за приложения за машинно обучение в науките за Земята и дори се използват за предлагане на продукти за широката публика.



Фигура 6.2.5. Структура на ЛГБД за свлачище „Тракийски скали“ (Nikolov & Atanasova 2024a).

В представяното изследване за наблюдение на повърхностните движения в зоната на проучваното свлачище е приложен подход, който интегрира данни и допълнителна информация от няколко източника. Основната част от информацията, както се описва по-горе, е от интерферометрична обработка на PCA продукти от мисията S-1, която се предоставя редовно от ЕКА. Тази информация от интерферометричната обработка представлява преместването на повърхността, възникнало по визирна линия на сателита между двете му последователни преминавания над изследваната област. За да се повиши качеството на тази информация, са използвани само данни от низходящи орбити на сателита и от сезони с малко растителност. За разработване и проверка на резултатите от PCA са използвани данни от перманентни станции на национални GNSS мрежи, както и данни от локални GNSS мрежи. В процеса на създаване на ЛГБД споменатите източници са допълнени с други налични такива като геоложки (напр. национална геоложка карта с мащаб 1:100 000) и литоложки карти, почвени карти, сеизмологична информация, карти на земното покритие и земеползване, цифрови модели на релефа (DEM), оптични изображения от многоканални инструменти с висока и средна пространствена разделителна способност.

Получените резултати са от данни за PCA, обработени чрез подхода SBAS. Пример за интерферометричните изображения, получени в резултат на това изследване, е даден на фиг. 6.2.3 г). Той е произведен от S-1 PCA данни 29 ноември 2018 г. и 28 март 2019 г. и доказва, че регистрираните движения по визирна линия са разположени в източната част на свлачището. Други важни резултати са преместванията, получени от интерферометрични изображения, които включват недостъпните части на свлачището, поради стръмния терен в отделни части на обекта.

На фигура 6.2.5. са показани понастоящем включените в ЛГБД слоеве, както е описано по-горе. Основната цел на ЛГБД е да служи като инструмент на експертите за по-добро разбиране на текущите процеси в изследваната област и по този начин да бъдат създадени модели, които биха могли да предвидят тяхното поведение при различни сценарии.

### 6.3. Свлачище „Фиш-Фиш“

Поредното свлачище по Северното Черноморие, което е активно през последните години, е във в.з. Фиш-Фиш до град Балчик (фиг. 6.3.1). Неотдавнашното му активизиране до голяма степен се дължи на антропогенните дейности (основно строителство на жилища), които се извършват през последните три десетилетия в този район.



Фигура 6.3.1. Снимка на активното свлачище „Фиш-Фиш“.

Неблагоприятните процеси, случили се в това свлачище, разположено по стръмните склонове на платото към морето, са част от древно по-голямо и относително стабилизирано свлачище. През последните години свлачището се развива като детрузивно, с по-големи премествания в горната му зона – около 8-10 mm, които по посока на вала показват намаление от 3 mm или по-малко за година (Геозащита–Варна ООД 2018).

В зоната на ж.к. „Фиш-фиш“ са обособени три свлачища – едно потенциално, едно активно и едно стабилизирано. След официални публикации на компетентните местни власти, активни свлачищни процеси са регистрирани за първи път през 2000 г., като причина за това активизиране е посочена авария на водопровод (по данни на Геозащита – Варна ООД). До 2010 г. засегнатата площ допълнително се е увеличила до 5600 m<sup>2</sup>. Впоследствие е трудно да се установи точния размер на площта, тъй като има висока и гъста растителност по страните на свлачището и следващи провадания на земни маси. Експертна оценка при теренни наблюдения потвърждава, че в момента неговата площ е около 57 000 m<sup>2</sup>, т.е. 10-кратно увеличение. Според посочения източник това свлачище се е активирало два пъти през последните 6 години, разрушавайки къщи и други обекти от инфраструктурата.

Основната причина за изследване на този район е активното свлачище, намиращо се в източния край на вилна зона „Фиш-Фиш“ на ул. „3-та“ и „4-та“, което е регистрирано в МРРБ като свлачище Фиш-Фиш – Изток. То се развива по посока към морето над ръба на склон с височина 65-75 m и наклон 50°-60°.

В периода 2010-2014 г. свлачищните процеси засягат силно споменатата зона и откоса на свлачището Фиш-Фиш Изток. След този период той започва да нараства на изток и нагоре по склона в рамките на потенциалното свлачище Западни Караманлии. В края на 2015 г. между 50% и 75% от площта му вече е в Западно Караманлийското свлачище. През февруари 2015 г. на част от терена са установени увеличения на размера на пукнатини в района на ул. „1-ва“ и на пътя, свързващ курорт Албена с гр. Балчик и са започнати проучвания. През септември-октомври същата година пропадането достига и се придвижва североизточно от улица „2-ра“.

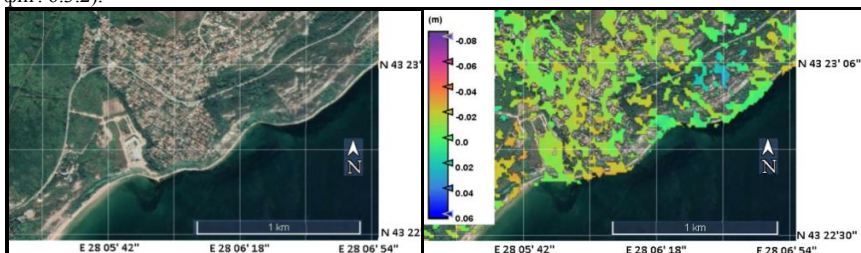
Всички подробности, посочени в предходния раздел, ясно показват необходимостта от непрекъснат мониторинг на свлачищните процеси в тази конкретна зона. Това наблюдение е от съществено значение, но за да се постигне по-добро разбиране на тези процеси, е очевидна необходимостта от допълнителни данни, които биха допълнили моделирането свлачищните процеси в локален мащаб. Тези допълнителни данни трябва да предоставят информация от предходни и настоящи изследвания относно геологията, сеизмологията, климата, растителната покривка, почвите, геодезията и др. получена от проучвания на терена и наскоро от безпилотни летателни системи (БЛС). Тяхното интегриране с данни, получени от дистанционни изследвания на тази област, предоставяни редовно, определени от времето за повторно преминаване на сателитите, със сигурност води до предоставяне на нова, надеждна информация за изследваната зона. Тъй като повечето от споменатите данни трябва да бъдат в цифров вид под формата на растерни или векторни тематични изображения и по този начин безпроблемно могат да се използват в ГИС. След въвеждането им в ГИС е формиран локален хиперкуб данни, реализиран като пространствена геобаза данни. По този начин моделирането на земните деформации, възникващи по склоновете по дължината на изследваната зона, води до по-надеждни изходни продукти като карти, таблици, готови за WebGIS данни и др.

Определянето на настъпилите деформации за района за свлачище „Фиш-Фиш“ са обект на

няколко научни статии. Първо е изследван ефектът на едно събитие (срутване), случило се през август 2018 г. и е добре регистрирано от PCA данни. И този случай отново потвърди, че наличието на стръмни склонове в изследваната зона възпрепятства регистрирането на PCA данни от възходяща орбита. Получените резултати, въпреки краткия период са последователни (показващи едно и също движение в зоната на срутването) и надеждни (имат високи стойности на кохерентността). Както е показано на фигура 6.3.2 по-долу откритите деформации за по-малки и по-големи периоди потвърждават, че очакваните премествания са в диапазона от 0,02 – 0,06 m и показват сезонни вариации. Тези вариации са видими, тъй като броят на точките с високи стойности на кохерентност не е постоянен.

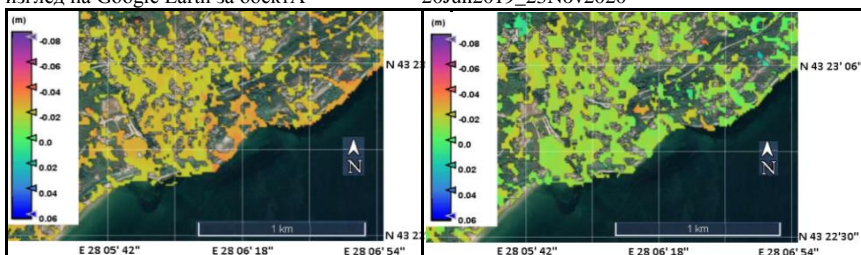
Освен данните от PCA, районът на свлачище „Фиш-Фиш“ е изследван и в рамките на две кампании с безпилотни летателни системи (БЛС) (първата на 22 юни 2019 г. и втората на 25 ноември 2020 г.). И двете са проведени с цел установяване на преместванията в района за посочения период. Но трябва да се подчертае, че за редовен и дългосрочен мониторинг на този обект БЛС имат недостатък, зависят силно от метеорологичните условия. Въпреки това предоставят данни с висока пространствена разделителна способност за зони от обекта недостъпни за теренни измервания – за този специфичен обект зоната между засегнатата зона и морския бряг има части, чийто наклон на някои места достига 60 градуса. Ето защо при определени обстоятелства може да е подходящо те да заменят ГНСС измерванията в локални геодезически мрежи, когато се прави сравнение с резултатите от SAR.

За този случай, за да се сравнят и анализират резултатите, получени от БЛА и PCA по отношение на движенията на земята, настъпили в свлачищната зона за интервал от 1 година и 5 месеца (между двете кампании с БЛС), са обработени редица PCA изображения за различни интервали, за да се сравнят стойностите, получени и от двата метода. За да се оцени степента (съответно влиянието) на времевата декорелация от големите времеви интервали в DInSAR, авторът експериментира, като създаде набор от интерферограми на различни времеви интервали (виж фиг. 6.3.2).



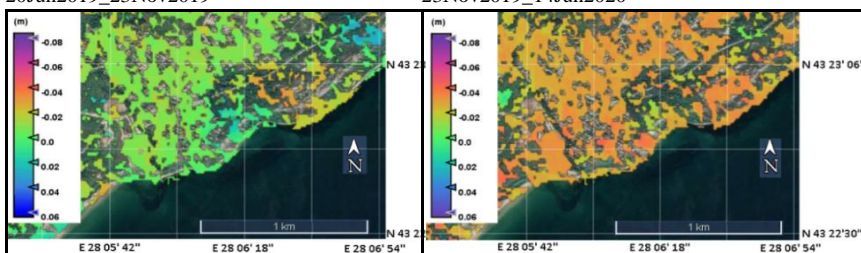
изглед на Google Earth за обекта

20Jun2019\_23Nov2020



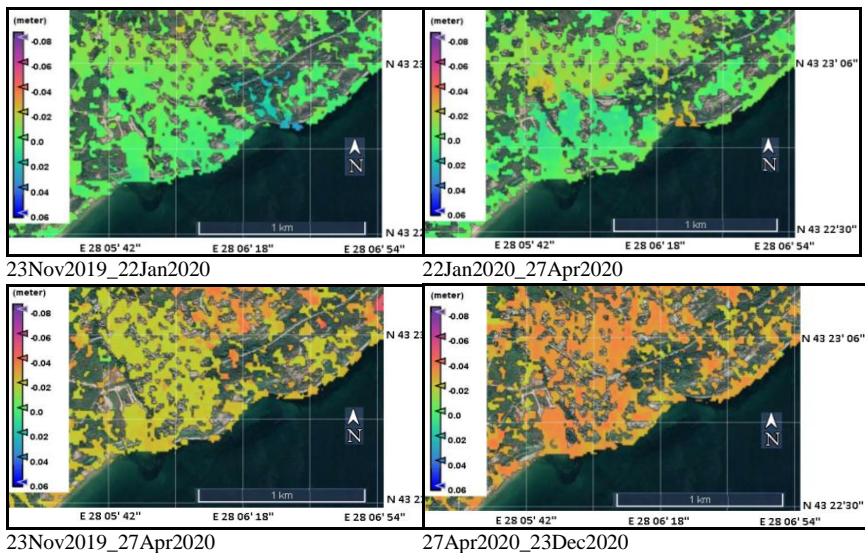
20Jun2019\_23Nov2019

23Nov2019\_14Jun2020



20Jun2019\_14Jun2020

14Jun2020\_23Nov2020



Фигура 6.3.2. а) изглед на Google Earth на изследваната област; б-г) Регистрирани премествания от изследвания за свлачище „Фиш-Фиш“ за периода 2019 – 2020г.

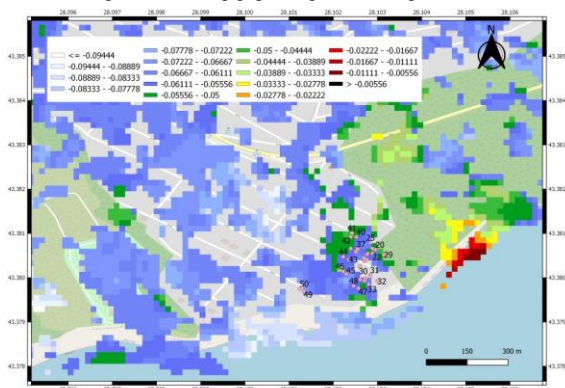
На фигура 6.3.2б са представени получените PCA премествания за целия период от 1 година и 5 месеца, където може да се види, че ефектът на декорелация е видим, тъй като получените стойности са в интервала (-0,04м - 0,02 м), което е сравнимо с тези за много по-кратки периоди (два месеца, напр. фигура 6.3.2h) и поради тази причина не трябва да се взема предвид. Резултатите, показани на изображения е) и ж) на фигура 6.3.2 потвърждават приноса на високата декорелация в резултатите в случай, че периодът от време между регистрациите на PCA е твърде голям, напр. една година или 8 месеца. Останалите извадки (фигура 6.3.2d, e, g, h, i и k) се считат за отразяващи правилно земните движения, настъпили през споменатите периоди.

За да се избегне използването на изображения със снежна покривка и голяма листна маса, които водят до поява на нежелан шум в данните от PCA и намаляват корелацията, т.е влияят съществено на качеството на създадените ИФИ се използват есенни и пролетни сцени и се наложи промяна във времевия интервал на 4 и 8 месеца. Тази промяна не доведе до намаляване качеството на получаваните крайни резултати.

Изучаването на процесите на повърхностна деформация за този обект се основава на мултитемпорална DInSAR обработка на сателитни PCA данни, за да се открие и регистрира магнитуда на това бавно движещо се свлачище в района на вилна зона „Фиш-Фиш“, включително и допълнителни данни, всички те обобщени в локална геобазаданни. Резултатът от обработката на данните от PCA е изработването на информационен продукт под формата на инвентаризационни карти относно времевото развитие на посоченото свлачище. Поради особеностите на терена на изследваната територия, в случая стръмни склонове с наклон над 30°, което прави геодезическите измервания невъзможни, подходът за дистанционно наблюдение е единственият начин за получаване на нови данни и по този начин за актуализиране на този продукт. За изследваната зона по този подход са използвани данни от сателитни PCA и оптични данни от БЛС. Недостатък при използване на БЛС е, че те са силно зависими от метеорологичните условия и се нуждаят от повече човешки усилия за получаване на надеждни данни.

По отношение на сателитните данни трябва да се спомене, че са използвани само такива, регистрирани от низходящи орбити на мисията Sentinel-1 на ESA, за да се избегнат геометрични изкривявания и ефекта на радарната сянка. Информацията, отразяваща движенията на повърхността, се получава от интерферограма, като се използва регистрираният обратно отразен радарен сигнал от две последователни регистрации. За да се повиши качеството на информацията от PCA данните, предварителната селекция на продуктите с изходни данни е важна стъпка, тъй като колкото по-малка е перпендикулярната базова линия, която свързва позицията на сателита по време на регистрацията, толкова по-добра интерферограма се получава, която разкрива движенията на повърхността.. Споменатото качество също зависи от времевата декорелация,

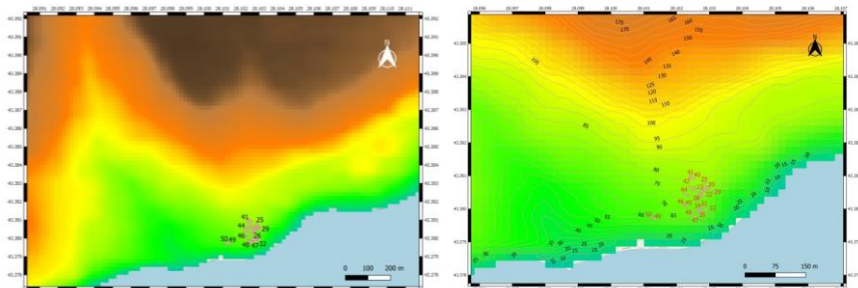
причинена от растителността, открита в изследваната зона, и точността на цифровия релефен модел (DEM), използван по време на интерферометричната обработка.



Фигура 6.3.3. Карта на преместванията за периода 20 юни 2019 г - 23 ноември. 2020 г.

Примерна карта на преместванията за изследваната област, получена от обработката по DInSAR, е представена на фигура 6.3.3, където пикселите, които не могат да се считат за надеждни поради ниска кохерентност, са премахнати и това е причината в някои части растерната подложка да се вижда. За тази конкретна карта трябва да се отбележи, че въпреки че периодът между заснеманията е повече от една година, резултатите са задоволителни за зоната на изследвания обект, като показват, че общите движения са слягания и са в интервал  $-0,03$  м в северната му част до  $-0,07$  м в най-засегнатите райони.

Важен елемент за тази локална база геоданни е локалният DEM, тъй като той се използва при обработката на DInSAR за подобряване на пространствената разделителна способност на окончателните карти на преместване, както и може да се използва като допълнителен растерен слой при моделиране на вероятното бъдещо развитие на свлачището.

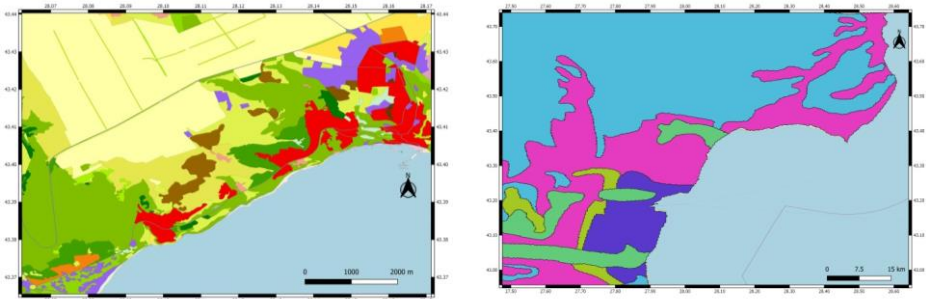


Фигура 6.3.4. Локален DEM и интерполирани хоризонтали като номерираните точки показват местоположението на изследваното свлачище (Atanasova & Nikolov 2024a).

Използван е DEM, получени по метода на ортофото от оптични изображения. Както се вижда на фигура 6.3.4 б някои от склоновете на изследваната свлачищна зона са изключително стръмни (достигащи  $30^{\circ}$  в някои части), което прави невъзможно преките теренни проучвания. Тази информация за наклона на склоновете в изследваната зона е от значение, тъй като ключовите фактори за задействане на свлачището са дъждовете и снеготопенето, което повишава нивото на подпочвените води и по този начин намалява устойчивостта на земните маси върху хлъзгателната равнина.

За да се допълни локалната геобазаданни, някои допълнителни слоеве са включени, като например крайбрежната зона от последната версия на продукта, разработен от Европейската агенция по околна среда. Наличието на този слой (виж лявата карта на фигура 6.3.5) позволява по-добро разбиране на въздействието от техногенното натоварване в изследваната зона и активирането на свлачищата, което се потвърждава от предоставената номенклатурна информация

относно земното покритие/земеползването. От значение е класът на земеползване, плътна градска среда (ярко червено), която съответства на застрояване на жилищни райони, където въздействието на свлачищните процеси върху човешкия живот е очевидно. Дясната карта на същата фигура 4 изобразява литоложката обстановка, която е от решаващо значение за разбирането на процесите на ерозия и морска абразия. Въпреки ниската пространствена разделителна способност на тази карта (размер на пиксела 200m), тя дава ясни доказателства за образуването на свлачища, тъй като там са представени главно варовици, мергели и чакъли.



Фигура 6.3.5. Карти на земното покритие/земеползване и литология (Atanasova & Nikolov 2024a)

Разработената локална ГИС геобазаданни за зоната на свлачище, разположено в жилищен район „Фиш-Фиш“, е насочена към по-доброто моделиране на минали и протичащи геодинамични процеси. Предоставени са включените в момента растерни и векторни слоеве, които улесняват изпълнението споменатата задача. Трябва да се подчертае, че всички данни и информация произхождат от валидирани свободно достъпни източници на данни и се обработват със софтуерни инструменти с отворен код. Реализираният подход за създаване на тази локална база геоданни в ГИС среда дава възможност за интегриране и на нови геопространствени данни.

#### 6.4. Свлачище „Трифон Зарезан“

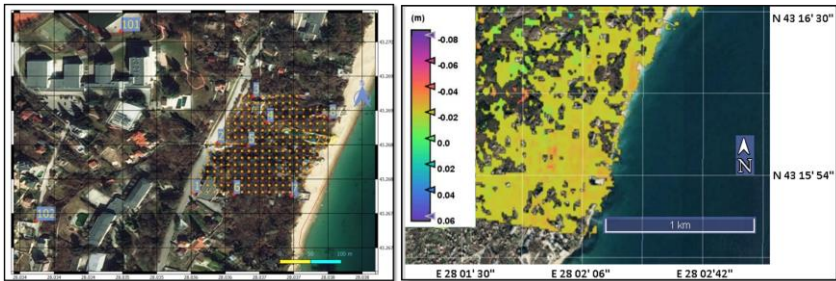
Това свлачище обхваща крайбрежния склон в района на път IV-90023 - Варна - к.к. Златни пясъци, започващ от спирка "Спортпалас" и завършващ при ресторант "Трифон Зарезан" (вече почти съборен от свлачището), част от плажа под него и подводния крайбрежен склон. Това място все още е засегнато от активни свлачищни процеси.

Свлачището се прояви на 18 февруари 1998 г. на крайбрежния склон под пътя Варна-Златни пясъци. В периода 2001-2005 г. свлачищните процеси се засилват и горната им граница достига до пътя. От 2005 г. крайбрежният път е затворен и не се използва и до днес.

Проучванията (Геозащита – Варна ООД 2018; 2019; Nikolov I., 2016;), направени през последните 25 години в тази свлачищна зона, показват, че зоната, която е по-близо до морето, се активира под въздействието на морска ерозия, валежи и топене на сняг, което допринася за повишаване нивото на подпочвените води. Всички тези фактори, съчетани с липсата на мерки за намаляване на ефекта им върху активирането на свлачищата, водят до земни маси, които бавно се срутват в морето, унищожавайки плажа. Потвърждение на този факт е, че площи между 30x103 m<sup>2</sup> и 50x103 m<sup>2</sup> сега са под морското равнище. Трябва да се добави, че за посочения период е потвърдено, че посоката на движение е източна, на места вертикалното слягане надхвърля 1м, докато хоризонталното движение е между 5 и 10 м. Вследствие на посочените движения са повредени инфраструктурни обекти като сгради, електро- и водопроводи, пътища и др., които се виждат в зоната на свлачището.

Свлачище „Трифон Зарезан“ е „пилотния обект“ по Северното Черноморие, където за първи път са използвани SAR данни за мониторинг на свлачища по морския бряг на територията на България (Atanasova & Nikolov 2017a). За проследяване и анализ на това свлачище е използвана успешно DInSAR технологията. Резултатите от PCA са получени от набори от данни от създадения локален архиви са избрани да съвпадат с последния трети цикъл на проведените GNSS (Nikolov I., 2016) измервания и обработени по DInSAR като са използвани VV поляризираны SLC данни (Atanasova & Nikolov 2021b).





Фигура 6.4.1. Геодезическа мрежа (числата на син фон) и оранжеви точки от създадената мрежа (грид) и карта, представяща преместванията, получени от PCA за по-голяма зона около свлачище “Трифон Зарезан” от дати 25 ноември 2014 г.-13 март 2015 г.

Интерферограмите са получени от двойка PCA данни за периода 26 ноември 2014 г. – 07 април 2015 г. от възходяща орбита и за периода 25 ноември 2014 г. – 13 март 2015 г. от низходяща орбита, като и двете съвпадат с периода между второто и третото измерване с GNSS, което бе предоставено (Nikolov I., 2016).

За да се извлекат стойности за цялата площ на свлачището, беше създадена равномерна мрежа (грид) с разстояние 20 m между центровете на пикселите (оранжевите точки на фигура 6.4.1a), която бе използвана за извличане на повече данни от PCA изображението, за да се получат настъпилите премествания. Предназначението на тази мрежа е да се изготвят статистически данни за цялата област на това свлачище.

## 7. Проследяване на геодинамични процеси в района на град София с приложение на SAR данни.

Изследването на съвременните движения на земната кора е една от приоритетните области на науките за Земята. Геодезическите методи заемат особено важно място в общия комплекс от измервания и изследвания на съвременните движения на земната кора, тъй като дават количествена информация за съвременните условия и протичащото развитие на геодинамичните процеси. Изследването на движенията на земната кора е сложен проблем, за който анализът на геодезически данни дава важна информация. Рисковите геодинамични процеси с природен и техногенен произход са широко разпространени в много райони на света. Техният мониторинг може да се осъществи чрез наличие на работеща GNSS мрежа, която непрекъснато предоставя данни или чрез използване на данни от дистанционно наблюдение като SAR технологията.

SAR инструментът е активна микровълнова система за изображения с възможност за проникване през облаци, която е в състояние да предоставя данни от дневни и нощни придобивания. Технологията SAR е универсална, с ключовата си способност не само да създава изображения на характеристики, но по-скоро да предоставя дистанционни измервания в големи географски области. Значително предимство при използването на този метод е, че плътността на вземане на проби е много по-висока от тази, осигурена от GNSS мрежите, без да се компрометира надеждността на получената информация.

Тук изследването е ориентирано върху установяването на директен метод за наблюдение на земните движения, причинени от разширението на земната кора в югозападния регион на България с използване на данни от радари със синтетична апертура (SAR). След тематичната им обработка получената информация може да послужи като индикация за предстоящи или смекчаване на щетите от вече възникнали опасни събития, като свлачища или каменопади.

### 7.1. Район на изследване

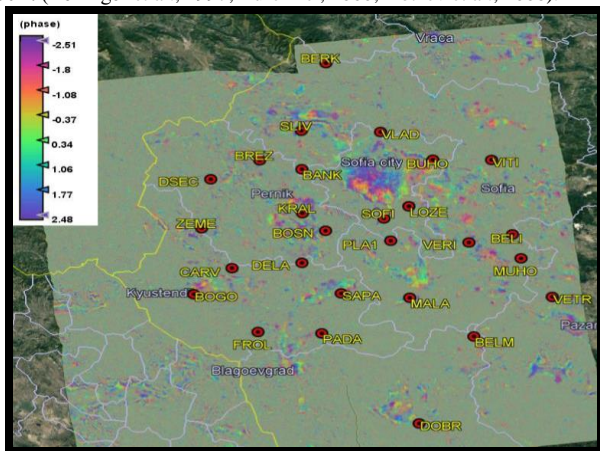
Районът на изследване е ограничен на север от южните склонове на Стара планина, на юг с южните склонове на Рила планина, на запад със западната граница на България и на юг с началото на Тракийската низина. Съвременната геодинамика на района, както и на територията на Южна България, се определя от неотектонските процеси на разширение в Югозападния регион на България, като част от широката Източносредиземноморско-Балканска система (Burchfiel et al., 2000). Тази област е от особен интерес поради високата си гъстота на населението и високата концентрация на промишлени съоръжения и ресурси. Еventуално силно земетресение и свързаните с него опасни процеси като свлачища, слягания, срутища и др. ще нанесат големи материални щети и ще имат негативен психологически ефект върху населението. Изложеното подчертава социалната значимост на изследваната територия и необходимостта от получаване на

достоверни геодезични данни, разкриващи текущата геодинамична дейност.

От друга страна, Южна България се намира в активна тектонска зона със забележима сеизмичност, която предопределя възникването на опасни геодинамични процеси. Геодезическите методи за оценка на природните деструктивни процеси осигуряват конкретни количествени стойности на съвременните движения на повърхността. В исторически план районът на София е известен с появата на няколко силни земетресения с предполагаеми магнитуди от Mw 5,5–7,0 (Radulov et al., 2012; Yosifov et al., 2018).

## 7.2. GNSS геодинамична мрежа за мониторинг на движенията на земната кора в района на София

В периода 1996-1997 г. от ЦЛВГ-БАН, днес департамент "Геодезия" в НИГГТ, е изградена GPS геодинамична мрежа за дългосрочен мониторинг на движенията на земната кора в района на София и Югозападна България (фиг. 7.1). Точките от мрежата са стабилизирани върху основните структурни блокове в района. Началото на GPS измерванията на Софийската геодинамична мрежа е поставено през 1999 г. Мрежата е предназначена за високоточни GNSS измервания за оценка на координати и скорости на точките и дългосрочно наблюдение на движенията на земната кора. Пълно измерване на цялата мрежа с обработка и анализ на резултатите досега е извършено само в две епохи 1997 и 2000 г. (Reilinger et al., 1997; Burchfiel, 2000; Kotzev et al., 2006).



Фигура 7.1. GNSS точки от мрежата, създадена за проследяване на деформации в югозападна България. Интерферограма, създадена от две изображения: 12 ноември 2016 г. (основно) и 5 април 2017 г. (подчинено).

През периода 2000 – 2018 г. периодично се провеждат GPS кампании за определяне на движенията на земната кора в района. В края на 2019 г. стартира проект „Мониторинг на геодинамични процеси в района на София“ на департамент „Геодезия“, финансиран от Фонд „Научни изследвания“. Този проект (Dimitrov et al., 2020; Dimitrov & Nakov, 2022) предостави възможност за ново цялостно измерване и анализ на геодинамичната мрежа в периода юли-август 2020 - 2023г. Налични GNSS данни от перманентни и локални геодезически мрежи са използвани за валидиране на информацията, получена от обработката на SAR данни за изследваната област. Тази информация допълва с надеждни данни наличната база данни относно протичащите рискови геопроцеси за района на Югозападна България. За картографиране на гео-процесите в изследваната област са създадени интерферометрични изображения на интервали от 4 месеца. Резултатите от обработката на данните от SAR недвусмислено показват наличието на гореспоменатите движения в определени части от тези зони, но за да се обоснове тяхното наличие, е необходимо да има и данни, получени от верифицирани геодезически измервания на място.

## 7.3. Приложение на DInSAR за района на град София

Мониторинг на сеизмогенна зона в района на град София е извършен от (Димитров и Ботев 2016), използвайки данни от ENVISAT. Районът южно от град София е извадена в структурно-геоморфоложко, тектонско и сеизмично отношение сеизмогенна зона, където могат да се очакват силни земетресения. Тази зона се свързва с т.н. “Витошкия разлом”, разделящ Витошкия морфоблок от потъналите под неогенски утайки, сложно разбит Софийски грабен. Повърхностните изяви на Витошкия и Лозенския разломи са представени върху сателитните изображения, определени с InSAR метод заедно с релативни вертикални деформации получени от

мониторинговата GNSS мрежа. (Димитров и Ботев, 2016). Мониторинг на протичащите геодинамични процеси в този район чрез допълващо използване на SAR и GNSS данни е основна цел на изследването тук. GNSS данни от паранентни и локални геодизически мрежи се използват за валидиране на получената от SAR информация.

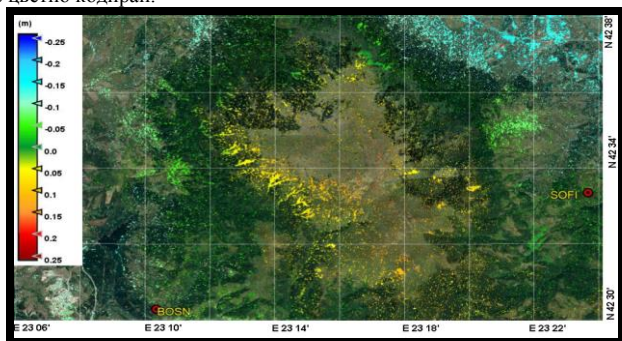
Един доказан метод за непрекъснато наблюдение на деформациите на земната повърхност е използването на данни от активно радарно дистанционно наблюдение със създаване на интерферометрични изображения (ИФИ) за количествена оценка на регистрираните земни движения на земната повърхност в рамките на фиксиран интервал от време. Получаването на важна и достоверна информация за протичащите геодинамични процеси в Софийска област е важно, тъй като в национален мащаб изследването на рисковите процеси е сред приоритетните научни направления „Природни рискове и опасности“.

Напоследък интерферометричният подход се използва широко в геодизическите изследвания и DInSAR техниката при определяне на земните движения в Югозападна България.

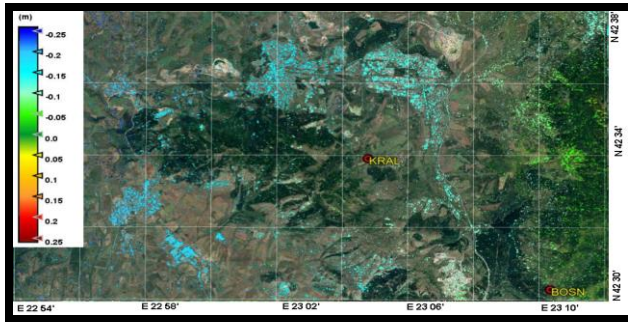
С използване на SAR данни за изследвания район са изчислени перпендикулярните базови линии между всички възможни двойки ИФИ и са избрани най-подходящите за по-нататъшна обработка на следващия етап. Използвани са сцени от Sentinel 1A/B за периода 2015-2023 г. Областта на изследване, обхваната от SAR изображения на мисията Sentinel-1 на ESA, припокриващи се от възходящи и низходящи орбити; 102, 7, 29 и 80.

Приложена е процедурата за DInSAR обработка на всяка ИФ двойка и SNAP софтуер, предоставен от ESA, с който лесно се реализира добре установена методология за DInSAR. На фигура 7.1 е представена примерна интерферограма, създадена от две изображения от 12 ноември 2016 г. (основно) и 5 април 2017 г. (подчинено). С помощта на описания в т. 4 метод е създаден набор от времеве поредици на ИФИ за интервали от 24-30 дни за зимните месеци и когато е трябвало да се проучи конкретно събитие на движение на земната кора.

За да се направи правилния избор на интерферометрични изображения, е необходимо да се имат предвид някои изисквания: декорелацията, която възниква в резултат на силно залесяване може да бъде избегната чрез обработка само на зимни сцени за периода от ноември до март, изисква се модалната кохерентност да бъде над 90% и да се използват най-късите перпендикулярни базови линии между орбитите. Трябва да се вземе предвид различното почвено покритие и неговата водопроницаемост, които отразяват сигнала по различен начин и понякога водят до декорелация между двете изображения. По същия начин се регистрират смущения поради невъзможността да се елиминира влиянието на йоносферата и разликите в преминаването на сигнала през атмосферните слоеве. Що се отнася до процеса на обработка се следва препоръката, направена в (Hanssen 2001) за обработка на по-малки части от интерферометрично изображение, за да се избегнат области с ниска кохерентност, което за изследваните обекти е от значение, тъй като, както се вижда на фигура 7.2, повечето от тях включват райони с горска растителност. От неразгънатата фаза се получават стойностите на преместване в LOS. Накрая се извършва трансформация към желаната геодизическа координатна система, която позволява изображенията на преместване да бъдат анализирани и в ГИС или друг софтуер. Анализът на информацията, получена от DInSAR обработката, се основава на създадените карти на преместванията в метрични единици за съответния период. На фиг. 7.2 е представен пример за възникнали земни премествания в LOS. За периода от 4 месеца за 2016-2017 г. изчислените премествания са с максимални стойности от 2 до -25 cm. Те са изчислени от разгънат фазов сигнал, който е цветно кодиран.



Фигура 7. 2.Извадка (Subsets) на картата на преместванията, създадена от две изображения: 12 ноември 2016 (главно) и 5 април 2017 (подчинено), (Atanasova & Nikolov, 2023),



Фигура 7. 3. Извадка (Subsets) на картата на преместванията, създадена от две изображения: 12 ноември 2016 (главно) и 5 април 2017 (подчинено), ( Atanasova & Nikolov, 2023),

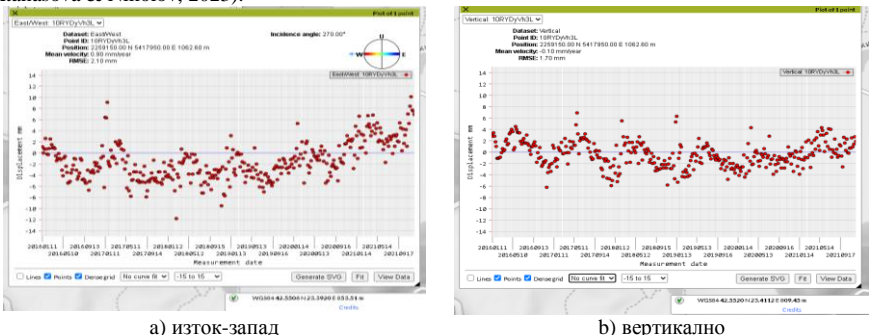
Получените ИФИ разкриват, че регистрираните премествания са концентрирани в някои области, показващи неравномерен модел. От тях е създадена и карта на концентрацията на преместванията на земната кора. На фигура 7.2 много ясно се вижда издигането в свлачищните райони от южната страна на Витоша. В района на гр. Перник и други открити рудници са установени слягания от порядъка на 2 cm, които потвърждават предишни изследвания (Atanasova & Nikolov. 2021c).

Приложената комбинация от прецизни GNSS измервания и интерферометрични резултати от обработени сателитни SAR данни за наблюдение на геодинамичните процеси и движения на Земната кора, предостави полезна и надеждна информация. В раздела по-горе се споменава, че за повечето обекти единственият източник за наблюдение на цялата площ на изследване са данни от дистанционно наблюдение, тъй като наличието на стръмни склонове, скали и гъсто растителни райони са характерни за този район. Сателитната SAR технология е универсална с ключовата си способност не само да създава изображения на характеристики, но и да предоставя дистанционни измервания в големи географски области. Значително предимство от използваното ѝ е, че плътността на вземане на проби е много по-висока от тази, осигурена от GNSS мрежите.

#### 7.4. Приложение на EGMS данни за мониторинг на сеизмогенна зона в района на град София

EGMS - European Ground Motion Service, управлявана от Европейската агенция по околна среда (EEA), се присъединява през 2022 г. към семейството на Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) (Larsen et al.). Тази услуга се основава на сателитни придобивания от S-1, като възприема интерферометрична SAR (InSAR) технология и извършва мониторинг с пълна разделителна способност на земните деформации за териториите на всяка една страна-членка на Европа. По този начин се прави сравнение на получените резултати на скоростите на място и времевите серии спрямо съответните MT-InSAR стойности на EGMS (Costantini et al., 2021).

Пет станции от GNSS геодинамична мрежа за мониторинг на движенията на земната кора в района на София са използвани за валидиране на базата данни от EGMS. Сравнението е извършено за станции от GNSS мрежата: SOFI, BANK, LOZZ, BUHU, GURM (виж Таблица 7.4.1) (Atanasova & Nikolov, 2023).



а) изток-запад

б) вертикално

Фигура 7.4. Премествания в станция SOFI, регистрирани от EGMS. ( Atanasova & Nikolov, 2023)

На фигура 7.4 са показани данните от времевите редове за станция SOFI, които са регистрирани от EGMS – а) представляващи премествания на запад и б) вертикални премествания.

За валидиране на информацията, получена от SAR данни (на EGMS) за изследваната област са използвани GNSS данни от геодезически мрежи. Тази информация допълва наличната база данни за протичащите рискови геопроцеси за района на Югозападна България.

Получените резултати предоставят нови данни за тектониката и сеизмичността в активния район. В сравнение с първите публикувани резултати от GPS мрежата новите резултати потвърждават, че общата тенденция на движение на повърхността в района на Централна Западна България е в южна посока по отношение на стабилна Евразия. Скоростите са в диапазона от 1,5–2 mm/y до 3–4 mm/y. Те нарастват като цяло от север на юг. Промяната в полето на скоростта обикновено е свързана с активни разломи. Установява се, че удължаването е основният механизъм на деформация.

Таблица 7.4.1. Скорости на GNSS станциите и скорости на премествания определени от EGMS за същите позиции (точку), (Atanasova & Nikolov, 2023)

Name	GNSS		SAR	
	East [mm/y]	Up [mm/y]	East/West [mm/y]	Vertical [mm/y]
BANK	0.47	0.32	3.59	-8.19
BUHO	-0.52	1.29	-1.20	-0.50
SOFI	0.07	-0.79	0.89	-0.10
LOZ2	0.17	-1.32	-1.70	-1.50
GURM	0.78	3.17	0.69	-0.80

Тук възниква проблем, тъй като, както е известно, методът InSAR в посока север-юг не определя правилни стойности за възникналите премествания, затова и няма съпоставка на данните в това направление.

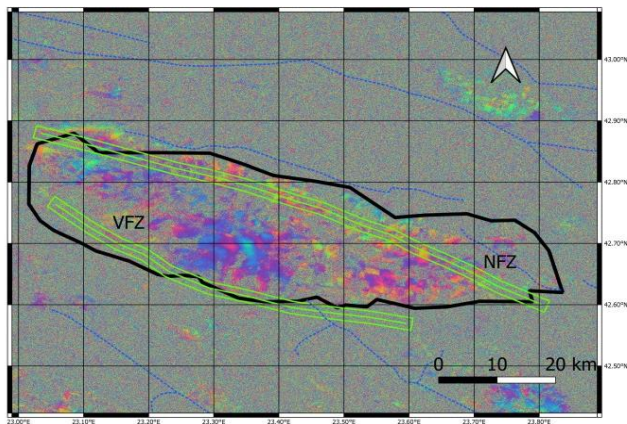
Използвайки сателитни данни за SAR, са анализирани серия от изображения и са изготвени интерферометрични карти. Разликите в стойностите от различните орбити потвърждават необходимостта от изготвяне на интерферограмни изображения от двата вида орбити и последващото им сравнение с геодезически измервания или резултати от други източници при изследване на деформации, получени след обработка.

### 7.5. Прилагане на PS-InSAR (Persistent Scatterer Interferometry) за изследване на Софийската котловина

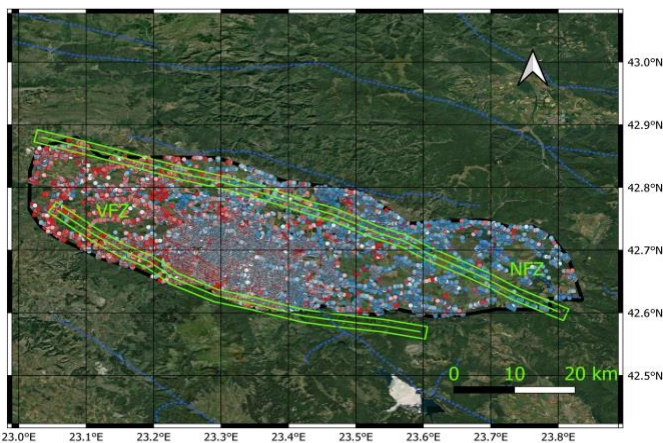
В много случаи технологията InSAR изисква сложни алгоритми, за да генерира точни резултати. В тази част ще се даде приложението на интерферометрията с постоянни отражатели, известна като PSI или PS-InSAR - Persistent Scatterer Interferometry). Използват се постоянни отражатели/разсейватели (PS): радарни цели, характеризирани се с високи стойности на отразяване, генериращи много ярки пиксели в SAR сцената, обикновено съответстващи на отделни изкуствени структури.

В този раздел се изследва хипотезата, че преобладаващите земни движения в региона на Софийската котловина са резултат от активност по Витошката разломна зона (VFZ - Vitosha Fault Zone) с ориентация СЗ-ЮИ границите на грабена на юг и Негушевската разломна зона (NFZ) (виж вмъкването на фигура 7.5), съобразявайки се с посоката на движение, предложена от геолози и сеизмолози (Nikolov & Atanasova 2024b). Тук се предполага, че малки, но еднопосочни движения могат да бъдат използвани като предшественик на възможни по-големи земни премествания и да предоставят допълнителна информация за картите на риска, които трябва да бъдат създадени за тези области. За да се открият движения на повърхността в сантиметров мащаб, са използвани данни от радар със синтетична апертура (SAR), за да се генерират карти на преместване за анализирания регион. Поради акцента на изследването върху фините движения, е от съществено значение да се получат времеви серии, обхващащи продължителни периоди за точен анализ. Първоначалният използван набор от данни произхожда от мисията Sentinel-1 (S-1), обхващаща периода от 2016 до 2021 г. Фигура 7.5 представя карта, произведена от неразгънатата фаза от продуктите с SAR данни S-1 (низходяща орбита), обработени по метода DInSAR. Както се отбелязва, информацията в сегашния си вид е предизвикателство за тълкуване. За да се отговорно на това, са генерирани по-обширни времеви серии от данни за SAR за по-голяма яснота и разбиране. От тези набори от данни са извлечени само точки с висока информационна стойност и взети под внимание (фигура 7.6).

За да се оцени големината на преместванията, записани от InSAR по протежение на двата разлома, са създадени два полигона с ширина 10 km и центрирани около тях като векторни файлове (Nikolov & Atanasova 2024b). Тези полигони са използвани за избор само на валидни точки от растерните интерферограми. Северният полигон (NFZ) обхваща площ от 152,6 km<sup>2</sup>, докато южният (VFZ) обхваща 109,3 km<sup>2</sup>. За Софийската котловина са генерирани 45 интерферограми, от които са получени повърхностните премествания в линията на видимост (LoS) на сателита. Изследването е фокусирано единствено върху зоната на Софийската котловина, като са изключени планински и други гъсто залесени/растителни/ региони поради техните ниски стойности на кохерентност, което означава ненадеждна информация от тези точки. Въпреки че това ограничение повишава достоверността на получената информация, то води до намаляване на наличните точки за последваща статистическа обработка.



Фигура 7.5. Интерферограма на неразгънатата фаза от S-1- низходяща орбита. Зоната на Софийската котловина (SV) е обозначена с черна линия, и полигоните около разломите със зелени линии. Негушевската (NFZ) и Витошката (VFZ) (Nikolov & Atanasova 2024b)



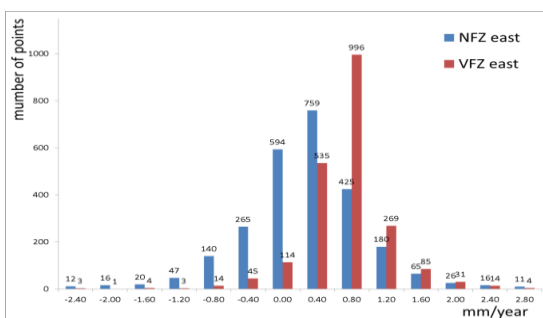
Фигура 7.6. Вектор на хоризонталните преместванията - посока изток -запад, получени от S-1 данни за цялата Софийска котловина. Червените цветове показват движение на изток, а сините - на запад (Nikolov & Atanasova 2024b).

Селективно са извлечени точки от данни от времевата поредица от SAR данни, като са използвани единствено върху тези в рамките на определените 10 km полигони по двата основни разглеждани разлома. За региона са генерирани два набора от данни, съдържащи точки, получени от обработката на S-1 продукти от данни от двата типа орбити. Това е направено, за да се улови източната компонента на вектора на движение, както и компонентната-нагоре. Като се има предвид огромния брой придобивания на S-1, продуктите двойки са формирани изключително от тези, показващи висока прогнозирана кохерентност. След интерферометрична обработка

само точки, които поддържат високи стойности на кохерентност във всички интерферометрични двойки - по-специално 0,6 и повече - са допълнително разгледани. В рамките на полигоните на двата разлома броят на генерираните точки възлиза на 2612 за Негушевска разломна зона (NFZ) и 2127 за Витошката разломна зона (VFZ).

Фигура 7.6 изобразява пример за източната компонента на вектора на преместване, получена от времевата серия S-1 InSAR. Важно е да се отбележи недостатъкът на близката полярна орбита S-1, която усложнява регистрирането на движения на север. Следователно само компонентите на изток и нагоре на вектора на скоростта са получени и представени по-долу. Трябва да се отбележи, че в допълнение към подобрените възможности за събиране на данни на инструмента S-1, през последните години е постигнат значителен напредък в методите за обработка на данни за SAR. Този напредък допринася за повишаване на надеждността на резултатите след разлагането на вектора на движение, подобрявайки резултатите, получени от мисиите ERS. Праг на кохерентност от 0,7 е приложен към двата набора от данни, като най-високата стойност на кохерентност достига 0,95. Тези прагове гарантират надеждността на информацията, получена от отделни точки от данни. Въз основа на хистограмите, представени на фигура 7.7 за споменатите набори от данни, е очевидно, че скоростите за двата изследвани разлома не са идентични (Nikolov & Atanasova 2024b).

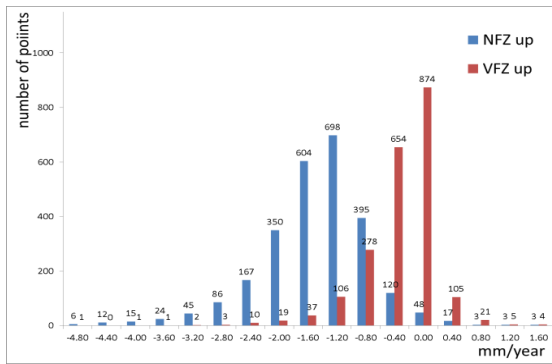
Северният разлом (NFZ) показва по-голям брой точки с положителни стойности, показващи движения на изток, докато южният разлом показва по-голям брой отрицателни стойности, което предполага движение на запад. Тези констатации са в съответствие със заключенията в (Matova, 2006).



Фигура 7.7. Източна компонента на вектора на преместване, получен от S-1 данни за разломите VFZ и NFZ (Nikolov & Atanasova 2024b).

Хистограмата на източната компонента на вектора на движение на повърхността, получена от S-1 интерферограми, е илюстрирана на фигура 7.7. Премахването на точки с екстремни стойности е мотивирано и оправдано от липсата на значими събития, водещи до премествания в Софийска котловина, като земетресения, регистрирани от сеизмолозите по време на изследвания интервал. Тази липса на значителна сеизмична активност поражда опасения относно надеждността на откриването на големи премествания в една точка. Наблюдава се, че докато посоката остава постоянна, движенията на изток на северния разлом са по-бавни в сравнение с тези на южния разлом.

Резултатите за компонентата нагоре на декомпозирания вектор на движение за двата изследвани разлома са показани на фигура 7.8. За зоната на NFZ слягането е по-ясно изразено въз основа на големия брой отрицателни стойности. За VFZ може да се заключи, че преместванията, възникнали в тази компонента, са по-малко динамични, тъй като повечето от стойностите за точките са в диапазона между 0 – 1 mm/у и не може да се конкретизира дали е потъване или издигане. Това изследване е предварително и се фокусира върху откриването на земни движения в изследваната SV зона - Софийска котловина, чрез сателитни SAR продукти и тяхната интерферометрична обработка. Изследването има двойна цел – да демонстрира ефективността на данните за SAR за редовно наблюдение на активни разломи в региона на SV и да установи времеви серии от данни за SAR, способни да разкрият движения на повърхността в сантиметър мащаб. Поради това фокусът е стеснен до изучаването само на два, макар и най-големи и добре изразени разлома в Софийска област – VFZ и NFZ разломи.



Фигура 7.8. Компонента *Up* на вектора на преместване, получена от *S-I* данни за разломите *VFZ* и *NFZ* (Nikolov & Atanasova 2024b).

Получените резултати потвърждават, че преобладаващите повърхностни движения по тези разломи са еднопосочни във времето, като например на югоизток за *NFZ*. Важно е обаче да се отбележи, че скоростите не са постоянни в цялата област на разломните зони. Освен това наличието на непрекъснати времеви редове с данни за *SAR* би могло да улесни оценката на последствията, причинени от малки и умерени земетресения, като по този начин допринесе за по-добро картографиране след бедствие. Активните разломи имат различна морфоложка изразеност на сателитни и аеро-изображения. Дълбочинните разломи, които са източници на сеизмични екокатастрофи, се проявяват на сателитни изображения, като зони, включващи разривни и нагнати дислокации - размествания. Като резултат от дешифриране на сателитни изображения и съпоставяне на получената информация с геоложка, геоморфоложка и геофизична информация се получава възможност за класифициране на разломите по дължина, ширина, дълбочина и др. Такава класификация позволява отделянето на различни по размери блокове на земната кора, отличаващи се по ландшафтни признаци.

## 8. Мониторинг на движения на земната кора от техногенен характер на базата на *SAR* данни

### 8.1. Провадия

Техниката за диференциална радарна интерферометрия (*DinSAR*) предоставя бързи и точни средства за откриване на малки премествания на земната повърхност с величина в диапазон от сантиметри. Прилагайки този метод за наблюдение надеждно се регистрират земни движения от естествен, а и от антропогенен произход. Информацията се произвежда аналогично от интерферограми в резултат на целенасочена обработка на фазовия сигнал, присъстващ в две *SAR* изображения от различни дати на една и съща област както бе обеснено многократно.

#### Област на изследване

Мотивацията зад това изследване е да се проучат преместванията на земната кора, в района на Мировското солно находище (Nikolov & Atanasova, 2023b).

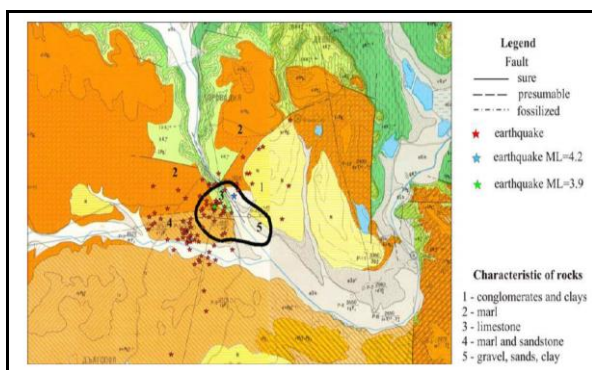
Мировското солно находище се намира край град Провадия в Североизточна България. Мината се експлоатира от 1956 г. От 1980 г. в този район са регистрирани няколко умерени земетресения ( $M > 4.0$ ). Множество изследвания са фокусирани във връзка с наблюдаваната по-висока сеизмична активност и вероятни прояви на техногенна сеизмичност в региона. Провадийската сеизмична зона се характеризира с висока индикация на слаби земетресения, чиито величина рядко надвишава 4,5 Mw. Тази концентрация на земетресения се дължи можв би на пресичането на няколко разлома (Dimitrov et al., 2013). Допълнителен фактор за увеличаване на броя на земетресенията през последните 35 години навярно е и интензивната експлоатация на солното находище, чрез извличане на разсол и образуването на големи подземни кухни. Засага няма тенденции за спиране на експлоатацията на солното депо. За по-добро проучване на развиващите се процеси се създават локални сеизмични и геодезични мрежи в региона около град Провадия (Trifonova et al., 2023).

Слаба сеизмичност се наблюдава в добре изразените и известни разломни структури в региона. Най-активната част е разположена между Южно-Мизийски субекваториален разлом и Северноподбалкански разлом (South Moesian subequatorial fault and North Subbalkan fault) (Dimitrova et al. 2020). Повечето от тях са концентрирани в централната част на Провадийската



котловина, която е покрита от солното находище Мирово. Значително по-голям брой земетресения се реализират в района на солното тяло и в 1 km разстояние от него в югозападна посока. Магнитудът на земетресенията варира до 3.1 М, като дълбочината на земетресенията достига 5 km. фигура 8.1.1 показва сеизмологичните и геоложка комбинирана карта (Dimitrov et al., 2013).

Геоложката обстановка може да се опише като сложна поради няколко пресичащи се разлома и поради тази причина е необходимо по-подробно проучване. Както е посочено от в (Cavazza et al., 2004) тази зона се формира чрез издигане на източната част на Мизийската платформа през Мезозойската и Кайнозойската епохи и се характеризира с блоково разломяване, грабени от различни ранг и хорст. Въз основа на геофизични изследвания Мировско солно подземно находище има приблизително формата на пресечен конус, чиято горна част е на 20 m под повърхността и достига дълбочина от 3,6 km.



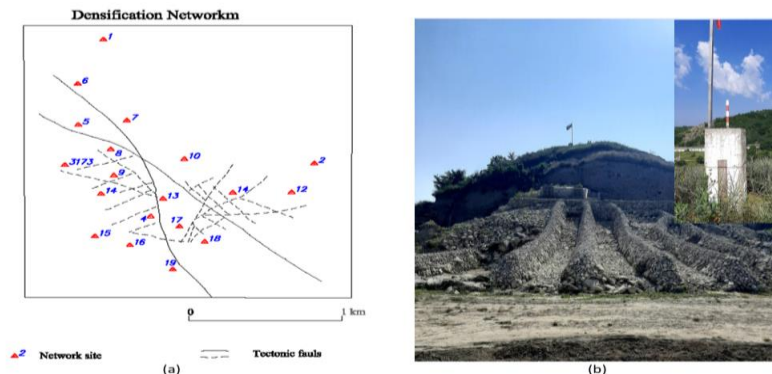
Фигура 8.1.1. Карта на района на Мировското солно находище с епицентри на слабите земетресения след 2006 г., свързани с геоложката карта 1:100 000 (Cheshitev et al., 1999). Черната линия очертава солното находище на ниво 2000 m дълбочина (Dimitrov et al., 2013).

В границите на Провадисол ООД се намира археологическият комплекс Солницата Провадия, който е признат за най-древния център за производство на сол в Европа от 5500 г. пр. н. е. и за това време е от първостепенно значение за снабдяването на региона на Балканския полуостров с този жизненоважен минерал. Разположен в североизточния регион на България (виж фигура 8.1.2 b) близо до град Провадия (на около 5 km южно от него) този значителен праисторически обект се състои от производствена зона, укрепено селище и ритуални зони с приблизителна площ от 13 ха. (Nikolov V., 2016).

Съвременната експлоатация на солното находище започва през 1920 г., а 35 години по-късно започва промишлената експлоатация с изграждане на специализирано преработвателно предприятие. Технологиията, използвана за извличане на минерала, се основава на излужване на солта, чрез инжектиране на вода под високо налягане в сондажи-кладенци.

След започване на активен добив на разсол от находището, за да се гарантира стабилността на сондажите и останалите инфраструктурни обекти в района, са създадени два типа мрежи за наблюдение на земните движения. Изградена е геодизическата мрежа през 1990 г. (Milev et al., 1994), а сеизмологичната е изградена през 1993 г. В края на 90-те години на миналия век и двете мрежи са подобрени и надградени и оттогава те предоставят надеждна информация относно земетресения и повърхностни деформации.

Сеизмологичната мрежа се състои от шест постоянни измервателни станции. Данните от тях разкрива, че за последните 20 години няма събития, регистрирани с магнитуд по-голям от 4,5 Mw, но от друга страна, броят на събитията с величина по-малко от 3,5 Mw е значим. (Dimitrova et al., 2020). Основният фактор за концентрацията на земетресенията в района на Мировското солно находище и увеличаването на броя на слабите земетресения през последните 50 години се дължи (може би) на интензивната експлоатация на сол чрез извличане (инжектиране на вода под високо налягане в земните пластове), като се образуват огромни подземни камери. Този метод на извличане ускорява процесите на деформация на земята около солното тяло, тъй като в резултат на това то става по-леко в горната си част и води до напрежение, което се освобождава чрез слаби земетресения.



Фигура 8.1.2. Геодинамичната мрежа за района на Мировското солно находище - обща схема (а) (Milev et al., 1994; Valev et al., 2015) и архитектурен обект - Солницата – точка и стълб за прецизно центриране (б), (Nikolov & Atanasov 2023b).

През 1988 г. е изградена локална геодезическа мрежа за наблюдение на земните деформации в района на Мировското солно находище (Milev et al., 1994). Това е мрежа за определяне на хоризонтални премествания и в момента се състои от 26 точки (виж фиг. 8.1.2), които включват 6 съществуващи точки от Държавната геодезическа мрежа на Република България и 20 нови точки, които са целево изградени. Новата нивелачна мрежа включва един вековен репер от първокласната нивелачна мрежа на България, един репер от второкласната нивелачна мрежа, няколко репера от държавната мрежа, 3 новоизградени вековни репера, 37 нивелачни марки със специална конструкция, закрепена към сондажните колони, 13 дълбочинни репера с фундаменти на 5 m под повърхността, 123 повърхностни репера на дълбочина 2 m и 26 репера, стабилизирани към фундаментите на точките от хоризонталната мрежа. Първият цикъл геодезически измервания е извършен през май 1990 г. (Milev et al., 1994) Оттогава тази мрежа се поддържа и периодически измервана от „Геопрециз“ ООД. Има проведени над 35 цикъла на измерване (виж фигура 8.1.2а). След комбинирана обработка и анализ на получените резултати при всяко геодезическо измерване е установено и многократно потвърдено, че регистрираните повърхностни движения са потъване в центъра на солното тяло. В (Valev & Kastreva, 2014 г.) за един от нивелачните репери е установено слягане е 0.7 m за периода от 1993 - 2011 г. и ако се приеме линеен модел за процеса на слягане тази стойност в момента трябва да бъде около 0,9 m.

Промените в координатите на точките от геодинамичната мрежа показват скорости на преместване, които достигат до 35 mm/год, със средно квадратично отклонение  $\pm 1$  mm/y. За точките 4, 11, 14, 16, 17, 18 са установени максимални скорости от 12,6-18,5 mm/y и значително максимално слягане за точка 13 със скорост от порядъка на 24,3 mm/y (Atanasova-Zlatareva, 2016; 2017). Трябва да се подчертае, че при тези начални изследвания не се извървя „отстраняване“ на пикселите с кохерентност под 0,3, а се приемат всички стойности за надеждни.

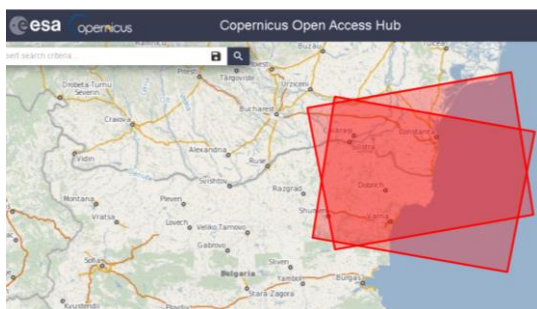
За съжаление през последните 10 години резултатите от геодезическите данните не са обществено достъпни и не се предоставят на учените. Тук важна роля изиграват дистанционните методи на наблюдение. Това е първият обект на територията на България, при който е приложен DInSAR метода за откриване и проследяване на земни премествания (Atanasova & Nikolov 2016; 2017). Трябва да се подчертае, че при тези начални изследвания не се извървя „отстраняване“ на пикселите с кохерентност под 0,3, а се приемат всички стойности за надеждни.

Това в момента се отчита като допуснатата неточност, но въпреки това не омаловажава получените резултати от 2016г. Тъй като в конкретния случай обект на изследване е ж.п. линията, преминаваща през гр. Провадия и в близост до солното находище, която е част от трасето София-Варна, е представен кратък преглед на извършените геодезически измервания по нея. През последните няколко години (след 2010 г.) целево е изградена допълнителна геодезическа мрежа от 36 точки за наблюдение на повърхностните деформации по ж.п. линията (Valev et al., 2015). На тази мрежа редовно се извършват нивелачни и GNSS измервания. Нейните точки се измерват по-често поради по-голямата важност на този инфраструктурен обект, тъй като той засяга обществената безопасност. Движението по железопътната линия се счита за опасно динамично натоварване, което може да доведе до разхерметизиране на сондажите в близост до нея, както и да има проблеми с безопасността на влаковете. От извършените геодезически измервания е направен извод, че вертикалните и хоризонталните денивелации в района на ж.п. линията са със значителни стойности.



Фигура 8.1.3. Локална сеизмологична мрежа (зелени триъгълници), локална геодезическа мрежа (червени точки) и локална геодезическа мрежа за мониторинг на железопътната линия (червени звезди) в района на Мировското солно находище (червен контур) (Atanasova-Zlatareva & Nikolov2022)

. Известно е, че сляганята, регистрирани в железопътната инфраструктура, разположена в близост до минните изработки, са причинени от деформации на опън и натиск, свързани с пътувания на горния слой на минните изработки (Valev et. al., 2016).



Фигура 8.1.4. SAR данни, изтеглени от две основни хранилища –EKA и HASA.

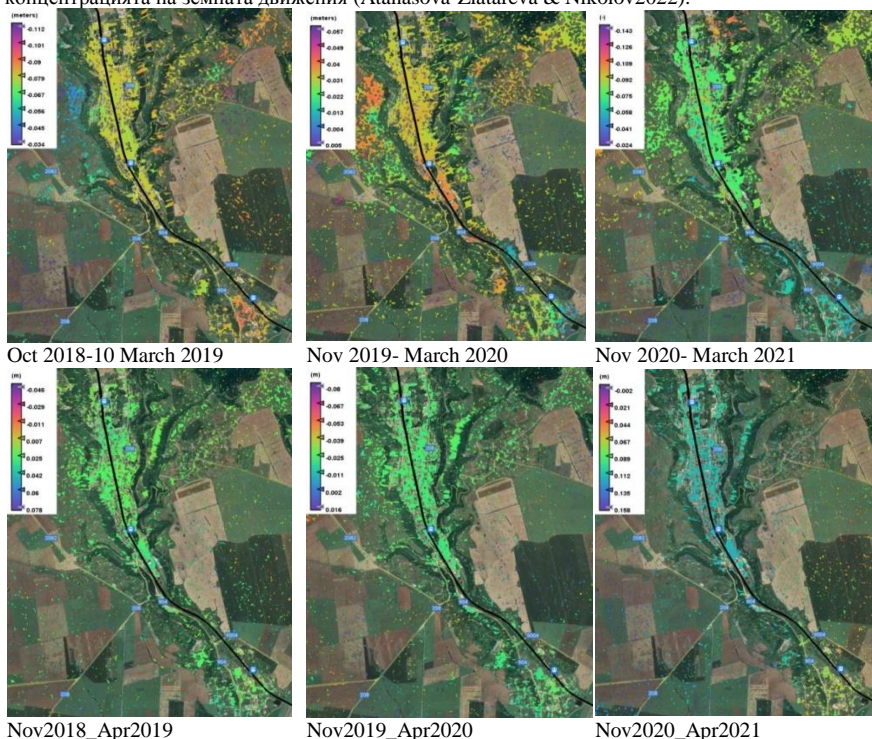
За това проучване се създаде също локално хранилище със SAR данни, изтеглени от две основни хранилища – EKA и HASA. Целта на тези архиви е да предоставят бърз достъп до всички регистрирани SAR продукти за изследваните региони за годините 2015 – 2021 г. и да се направи възможен избор на най-подходящите от тях за по-нататъшно обработка. Всички стъпки на обработка, посочени в раздел 4 са изпълнени в софтуер SNAP. За да се получат унифицирани резултати и за да се ускори процеса на обработка на SAR данните са използвани само двойки, които имат перпендикулярна базова линия Врегр и за двете придобивания под 100 m (виж таблица 8.1.1). По време на стъпката за избор на данни, специфичните характеристики на проучвания обект трябва да се вземат предвид. Това се отнася да късните пролетни и ранните есенни архелогически разкопки, които се извършват в обект „Солницата“ и внасят двусмислие в изследваните премествания. Това е причината да се обработват само данни, получени за останалите месеци. След създаване на интерферограма от всеки ИФИ е извлечена по-малка област, която покрива само изследвания регион (виже фигури 8.1.4).

Таблица 8.1.1. Параметри на наборите от SAR данни, избрани за обработка

Primary	Secondary	Bperp [m]	Modelled coherence
29 Oct 2018	10 Mar 2019	-40.77	0.85
05 Nov 2019	28 Mar 2020	-29.47	0.84
11 Nov 2020	23 Mar 2021	-88.94	0.81
05 Nov 2018	10 Apr 2019	-88.04	0.79
12 Nov 2019	29 Mar 2020	-76.46	0.82
06 Nov 2020	11 Apr 2021	-1.80	0.85

Интерферометричната фаза се трансформира от  $(-\pi; \pi)$  в метрични единици, като по този начин предоставя стойности за повърхностните движения, открити от DInSAR. Установено е в (Larsen, 2020), че разлагането на получения след DInSAR фазов сигнал в LOS на E-W, N-S и

вертикални компоненти не е тривиална задача, тъй като е неправилно поставен проблем за извличане на три неизвестни от едно уравнение. След това са премахнати пикселите (основни елементи) с ниска кохерентност, които се считат, че са повлияни от времевата декорелация (виж фигура 8.1.5). Последната стъпка, извършена в SNAP, е геокодирането на крайните резултати в координатна система WGS84, което е необходимо за използване на резултатите като изображения във външни софтуерни продукти за анализ и визуализация. С помощта на горепосочените стъпки е създаден набор от ИФИ на интервали от 4-5 месеца, за да се установят преместванията по протежение на изследваното трасе на железопътната линия и археологическия паметник, както е извършено в (Atanasova-Zlatareva & Nikolov 2022; Nikolov & Atanasov 2023b). Валидирането на информацията, получена от създадените ИФИ е извършено с помощта на данните от локалната GNSS мрежа (фигура 8.1.2). На фигура 8.1.5 са представени примери за възникнали повърхностни движения в LOS, получени от SAR изображения за периода зима 2018-2021 г., включително наблюдаваната железопътна линия. Те се изчисляват от неразгънатия фазов сигнал, който е цветно кодиран. Получените ИФИ показват, че регистрираните премествания са концентрирани в някои области, показващи неравномерен модел. От тях е създадена карта-схеми на концентрацията на земната движения (Atanasova-Zlatareva & Nikolov2022).



Фигура 8.1.5. Премествания на земната кора, определени от спателитни орбити 36 и 58 на железопътната линия, (Atanasova & Nikolov2022).

За пикселите, разположени по протежение на железопътната линия от шест представени изображения, които съдържат премествания в LOS, са определени някои статистически параметри, които позволяват да се направят съответни заключения. Най-напред се изясни въз основа на информация от „лентата“ на кохерентност на всяко изображение, че (не за всички пиксели) носят информацията, получена от данните за SAR и може да се счита за надеждна, тъй като може да се вярва само на пикселите в „лентата“ на преместване, които имат кохерентност над 0,3. В този случай значително вариращият брой валидни пиксели може да се дължи на продължителността на периодите на придобиване и на метеорологичните условия към датата на придобиване.

От анализа на получените резултати по-горе основният извод е, че представената модел предоставя достоверна информация по отношение на движенията на земната повърхност в района

на град Провадия на всички заинтересовани страни. Също така трябва да се подчертае възможността за редовно наблюдение на региона с по-малко финансови и човешки инвестиции.

## 8.2. Козлодуй

### 8.2.1. Приложение на метода DInSAR с подхода SBAS

Осигуряването на безопасна работа е от първостепенно значение за всяко промишлено предприятие. Това съображение в още по-голяма степен засяга атомните електроцентрали. Една от основните заплахи по време на нормалната им работа на тези инфраструктурни обекти са земните движения, които могат да възникнат поради няколко причини, като сеизмични дейности и геоложка нестабилност.

АЕЦ Козлодуй е единствената електроцентрала от този тип в България и в Югоизточна Европа. Тази АЕЦ е най-големият производител на електроенергия в страната с годишно производство от около 2 MW, което го прави незаменим и с безспорна роля за енергийната сигурност в региона. Заводът е разположен на южния бряг на река Дунав, основно в Козлодуйската низина и заема част от общините Козлодуй и Хърлец. Намира се на около 5 km източно от гр. Козлодуй и на около 120 km от столицата София. Общата заета площ от АЕЦ е около 4,5 km<sup>2</sup>, но зоната на основните производствени мощности е 1 km<sup>2</sup>, а останалите са допълнителни обслужващи съоръжения като ذخариващи водопроводи, помпени станции, електропроводи и др. Реалните строителни работи започват през 1970 г. и в края на 1974 г. той е свързан с електрическата система на страната. От фазата на проектиране на АЕЦ безопасността се смяташе за първи показател за ефективност и оради тази причина централата е под тежки инспекции и сертификати от международни (IAEA, WANO, EC) и национални органи - Агенция за ядрено регулиране (<https://www.kznpp.org/en>).

Един от важните аспекти на безопасността на атомните електроцентрали е стабилността на земната повърхност на зоната, в която се намират и са изградени съоръженията. Както е посочено в (Drakotou et al., 2014) в близост до района на АЕЦ не се установяват активни разломи и следователно тя се счита, че (централата) е „в най-стабилната част на платформата Мизия“. Очаква се също, че ендегенните параметри на геоложката среда няма да се променят в бъдеще.

Мизийската платформа е достатъчно голяма с площ от 50 000 km<sup>2</sup>, където не се е случвало земетресение с магнитуд, по-голям от Mw>4.5 и затова местоположението на АЕЦ-а е избрано да бъде в най-безопасната му част. Най-силното инструментално регистрираното сеизмично събитие в радиус от 30 km е с Mw=3.6 (Solakov et al., 2015). Въпреки това съществуват две работещи мрежи за наблюдение на повърхностните деформации в зоната на АЕЦ – една локална сеизмична мрежа, състояща се от три станции (MPE, VLD, ORH), които записват слаби земетресения (Solakov et al., 2015) и локална геодезическа мрежа, измерена в пет кампании от 1998 г. (Valev et al., 2016). По данни от локалните и дейността на националната сеизмична мрежи, както и от допълнителни научни проучвания, се стигна до заключението в (EIAR 2022), че зоната на АЕЦ може да бъде считана за „сеизмично най-спокойна част от територията на България“. Констатациите от геодезическите измервания подчертани в (Valev et al., 2016) потвърждават геоложките и сеизмологичните аргументи, показващи, че не е имало големи премествания, регистрирани в зоната на АЕЦ и тя може да се счита за стабилна. В същия документ се посочва, че „хоризонталните премествания са много по-големи от вертикалните“.

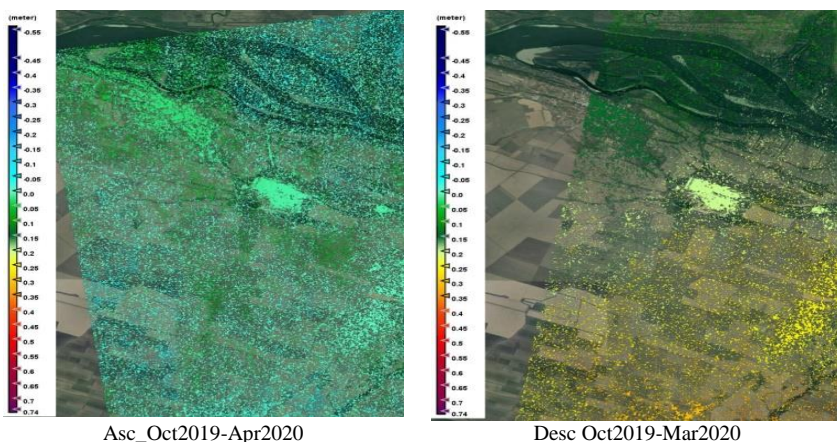
Както е посочено в (Valev et al., 2016), за да се повиши точността на резултатите относно мониторинга на земните движения, от съществено значение са по-дългите времеви серии от данни. Един обещаващ източник на информация са времеви серии от сателитни SAR данни, обработени по метода DInSAR. Доказано е, че този метод предоставя надеждна информация в подсантиметров мащаб, напр. (Massonnet et al., 1993). Този факт в комбинация с напредъка в радарната технология по отношение на пространствената и времевата разделителна способност позволява да се вземат предвид резултатите от обработката на SAR данните като допълнителен надежден източник на информация относно земните движения в зоната на АЕЦ и по този начин до допринесат за по-добра защита на намиращите се там сгради и други съоръжения. Допълнителни предимства на използвания подход са възможността за генериране на данни за районието около АЕЦ и по-малкия размер на човешки усилия и финансови инвестиции за квадратен километър.

В (Nikolov & Atanasova-Zlatareva, 2022) се предлага подход за следене на повърхностните деформации в района на атомната електроцентрала (АЕЦ) Козлодуй, т.е. да се анализира стабилността с помощта на времевата поредица от данни от радари със синтезирана апертура от мисията Sentinel-1 на ESA. Това е единственият начин да се получи надеждна информация за движенията при редовни интервали, тъй като зоната е с ограничен достъп, а площта е в големи мащаби (регионално или национално ниво).

Таблица 8.2.1.1. Списък на двойките данни, използвани за разработване на интерферограма (Nikolov & Atanasova-Zlatareva, 2022)

	Низходяща орбита 7			Възходяща орбита 102		
	10.10.2019 07.04.2020	04.10.2020 14.04.2021	05.10.2021 09.04.2022	04.10.2019 20.03.2020	04.10.2020 27.03.2021	05.10.2021 22.03.2022
Вперп [m]	8.21	23.1	-19.15	24.37	-4.85	-36.97
Btemp [days]	168	174	168	180	192	186
Modell.coh.	0.84	0.82	0.83	0.82	0.82	0.8
Max.coh.	0.989	0.984	0.988	0.988	0.991	0.985

Описаната в раздел 4 методология - процедура за обработка е повторена за всички двойки изображения, предоставени във втория ред на таблица 8.2.1.1. Следващите три реда в същата таблица представят някои важни параметри, свързани с подбора на данни преди започване на създаването на интерферометричния продукт. Преместване, получени от интерферометричните изображения за изследваните периоди, са дадени на фигура 8.2.1.1(пример: октомври 2019 - април 2020). На всяка от тях е лесно да се разграничи зоната на сградите на АЕЦ и обслужващите съоръжения, тъй като те изглеждат като големи светли зони, тъй като има голям брой кохерентни пиксели. След създаването на крайните геокодирани интерферометрични продукти са формирани два стека изображения от възходящи и низходящи орбити, чрез тяхната прецизна геометрична съвместна регистрация, избирайки началния продукт да бъде основен за всеки „стек“. Тъй като повърхността на района, където се намира АЕЦ, е предимно равнинна (пласка), стековият продукт от двете орбити не е имал геометрични изкривявания, като сянка, ракурсе или преместване, присъщи на геометрията на събирането на SAR данни и това е причината изборът на първичната орбита да не е проблем. Във всички произведени интерферометрични „стекове“ са взети под внимание само онези пиксели от интерферометричното изображение, които имат стойности на кохерентното изображение над 0,3, а останалите са настроени на стойност „не-число“ и поради тази причина на фигура 8.2.1.1 в някои се виждат области с основния растер.



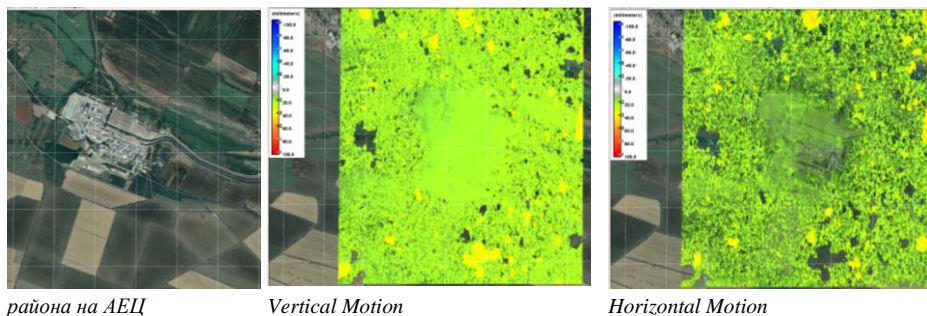
Фигура 8.2.1.1. Премествания в LOS, получени на база SAR данни от двата типа орбити за зоната на АЕЦ за периода октомври 2019 - април 2020, (Nikolov & Atanasova-Zlatareva, 2022).

Създадената нова „лента“ (слой) на изображението в трите включени стека са само тези пиксели на изображението, които имат стойности от двете орбити, различни от стойността „не-число“. Като последна стъпка преди анализа са осреднени LOS стойностите от орбитите, като по този начин се създава още една „лента“(слой) на изображението в стековия (сборния) продукт. Фокусът на това изследване е да се докаже възможността за получаване на надеждна информация от сателитни за движенията наземната повърхност в района на АЕЦ Козлодуй за три шестмесечни периода и по този начин да се осигури основа за нейния дългосрочен, ефективен мониторинг, базиран на DInSAR обработка. Тази информация, отразяваща земните промени, се произвежда по споменатия (DInSAR) метод с ненадеждни пиксели със стойности на кохерентност по-голяма от 0,3. Забелязва се, че формите на зоните с валидни пиксели не са постоянни за всички периоди, което може да се отнася до промяната на позицията на повърхностните отражатели, тъй като частта от изследваната зона в и извън АЕЦ е заета предимно от растителност. От друга страна

сградите на АЕЦ и някои от обслужващите го съоръжения като водопроводи, помпени станции, електропроводи и др. остават с висока кохерентност.

Получените стойности, макар и минимални са в LOS и от тях не е възможно директно да се извлекат реалните 3D премествания на един пиксел (Di Traglia et al., 2021) без да се правят някои допускания от предишни проучвания, проведени в същия регион по отношение на преместванията на повърхността (за предпочитане по други геодезически данни). Както вече се спомена в (Valev et al., 2016) за района на АЕЦ „хоризонталните премествания са много по-големи от вертикалните“. Този факт, съчетан с ниската чувствителност на S-1 към движенията на повърхността N-S (напр. в Haghshenas & Motagh, 2017) показва, че получените стойности за преместванията от SAR данните отразяват движения в посока W-E (виж фиг 8.2.1.2) Още един аргумент, потвърждаващ факта, че получените стойности за повърхностни деформации в зоната на АЕЦ са представителни е, че както е посочено в (Kenyeres et al., 2019) най-близката перманентна GNSS станция отчита стойности за 3D скорости (E, N, H) от около 1.5 mm/y, което от една страна съпада с констатациите в (Valev et al., 2016), а от друга елиминира необходимостта от референтна точка, тъй като за изследваните шестмесечни периоди приносят на тектоничната активност може да бъде пренебрегнат.

Бързото развитие на InSAR технологията и усъвършенстването на софтуерните продукти през последната година, даде възможност да бъдат получавани като краен резултат вертикалната компонента и хоризонталната компонента в направлението W-E на вектора на преместване. Това наложи за периода декември 2021 - декември 2022 да се извърши нова обработка на SAR данни, като са използвани данни от низходяща орбита 7 и възходяща орбита 29 (в предишното изследване е използвана възходяща орбита 102). Повторена е обработката по методологията представена в т 4, като са създадени интерферограми от двата типа орбити за близки интервали от време. Извършено е съвместяване на ИФИ от двата типа орбити и са получени вертикалните и хоризонталните (в направлението W-E) премествания (виж фиг. 8.2.1.2).



района на АЕЦ Vertical Motion Horizontal Motion  
 Фигура 8.2.1.2. Премествания (вертикални и хоризонтални в посока E-W), получени на база SAR данни от двата типа орбити за зоната на АЕЦ.

На фигура 8.2.1.2 са представени регистрираните премествания (вертикални и хоризонтални в посока E-W), получени на база от SAR данни от низходяща орбити 7 (период 14 юни 2022 - 08 юли 2022) и от възходяща орбита 29 (период 27 юни 2022 - 09 юли 2022) за зоната на АЕЦ. В таблица 8.2.1.2 е показана извадка на съвместените ИФИ от двата типа орбити.

Таблица 8.2.1.2 Обработени SAR данни за съвместяване на ИФИ от двата типа орбити използвани за определяне на вертикални премествания и хоризонтални в посока E-W за района

	Низходяща орбита 7	Възходяща орбита 29
1	16 декември 2021 21 януари 2022	29 декември 2021 22 януари 2022
2	21 януари 2022 14 февруари 2022	22 януари 2022 15 февруари 2022
3	27 април 2022 02 юни 2022	28 април 2022 22 май 2022
4	14 юни 2022 08 юли 2022	27 юни 2022 09 юли 2022
5	29 ноември 2022 11 декември 2022	30 ноември 2022 12 декември 2022

За да се провери последователността на резултатите, получени от автора, са използвани две оперативни услуги, които произвеждат данни за движенията на повърхността за една и съща зона на АЕЦ въз основа на данни от S-1 – Европейската служба за движение на земята (EGMS) и

отворената платформа за информация за наземно наблюдение (Terrasigna PSTool - An Open Platform for Ground Monitoring Information.: <http://pstool.terrasigna.com/>). На фигура 8.2.1.2 са показани точките, които са регистрирани от EGMS – а) представляващи премествания в посока И-З и б) вертикалните.



Фигура 8.2.1.2. Премествания в зоната на АЕЦ, регистрирани от службата EGMS – а) изток-запад и б) вертикално, (Nikolov & Atanasova-Zlatareva, 2022).

Тъй като в момента EGMS не предоставя тези данни в таблична форма, не е възможно да се направи директно сравнение между тях и получените тук резултати, но е видно, че цялостното поведение на земните движения, регистрирани от автора, показва добро съответствие с тези от EGMS.

Другата услуга - Terrasigna PSTool - An Open Platform for Ground Monitoring Information (<http://pstool.terrasigna.com/>), позволи да се очертае зоната на АЕЦ с помощта на същия полигон, за да се получат резултатите (Nikolov & Atanasova-Zlatareva, 2022). За низходяща орбита 7 тази услуга предостави 10376 валидни точки почти два пъти по-малко от най-лошият получен резултат. Този факт може да се отдаде на много по-големия изследван период от пет години, през който е вероятно да настъпва загуба на кохерентност при някои пиксели. Резултатите от възходящата орбита показват още по-малка корелация, но това може да се дължи на факта, че са използвани различни орбити. Тази услуга потвърждава направените тук изводи, че пикселите с висока кохерентност, т.е. надеждните пиксели за зоната на АЕЦ съответстват на сгради и антропогенни обекти (виж фигура 8.2.1.3).

В това изследване DInSAR техниката и избора на двойка данни с най-малката базова линия (SBAS) е подходът, приет като основен метод за обработка. Резултатите, получени от това изследване са сравнени с новопредоставените данни (за лятото на 2023) от European Ground Motion Service и други източници, като напр. непрекъснато работещи GNSS референтни станции, разположени в близост до изследваната зона.



Фигура 8.2.1.3. Премествания в зоната на АЕЦ, регистрирани от Terrasigna по низходяща - орбита 7 (а) и възходяща - орбита 80 (б) орбити, (Nikolov & Atanasova-Zlatareva, 2022).



Те доказват, че SAR може да се използва за наблюдение на повърхностните премествания около и вътре в зоната на АЕЦ и обслужващите я съоръжения (водни канали, сгради, тръбопроводи и др.) и по този начин може да се използва за предотвратяване на непосредствена нестабилност на споменатите съоръжения.

Трябва да се подчертае, че получените резултати са от свободно разпространявани данни за SAR и поради тази причина пространствената разделителна способност се счита за средна, но се очаква, че в случай, че данните за SAR с висока пространствена разделителна способност могат да бъдат предоставени, броят на информационните точки ще нарастне. Още един начин за подобряване на качеството на информацията относно земните движения е използването на X-band SAR, който успешно се използва при наблюдение на обекти, създадени от човека, като сгради, мостове, градски зони и др. (Liao et al., 2009).

Допълнително подобрене в разкриването на текущите премествания в зоната около и на АЕЦ се вижда в използването на целенасочено разположени ъглови рефлектори вътре в споменатия район, за предпочитане в точки от вече изградена геодезическа мрежа, както е предложено в (Spreckels, 2022).

Освен споменатите опции за подобрене, трябва да се посочи, че информацията, получена по време на това проучване, е надеждна и предоставя добра основа за бъдещо наблюдение, използвайки времеви серии от данни S-1, както и за исторически анализ, който трябва да се направи с помощта на данни за SAR в С-обхват от други мисии напр. ERS 1/2 и Envisat. Това твърдение се потвърждава от валидирането на резултатите, получени в това проучване с две външни оперативни услуги.

Получените интерферометрични карти като краен резултат разкриват цялостната стабилност на терена на изследвания регион. Тези карти могат да обслужват нуждите на компетентните местни власти, както и на други оператори с цел повишаване безопасността на населението, живеещо в района.

### 8.2.2. Наземни постоянни отразатели

За първи път на територията на България са конструирани и поставени наземни постоянни отразатели за S-1. Изграждането на наземни постоянни отразатели е в изпълнение на работен проект, с предмет „Разработване на проект за мониторинг на деформации на района на площадка на Национално хранилище за радиоактивни отпадъци (НХРАО), чрез съвместно използване на данни от сателитно базирани радарни със синтезирана апертура (РСА) и данни от геодезически измервания в специализирана локална геодезическа мрежа“, приет през 2023г. Възложител е Държавното предприятие “Радиоактивни отпадъци“.

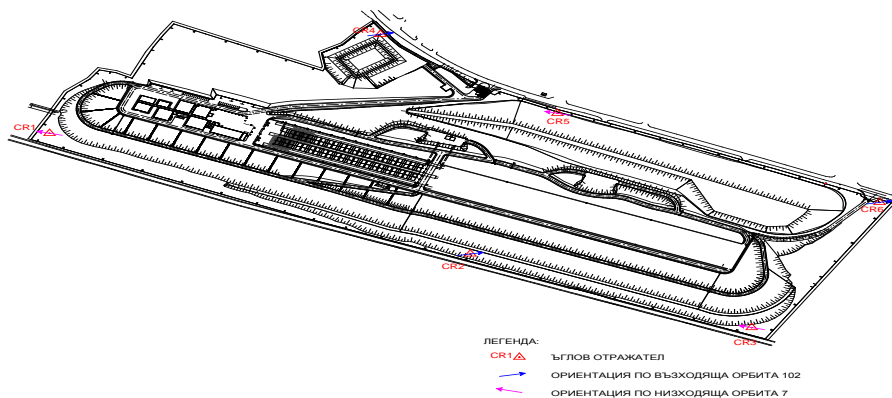
Таблица 8.2.2.1. Данни за типа на орбитите, ъгъла на отражение, ъгъл на отклонение от север на пътя на орбитата.

Тип орбита	Номер	Под-сцена	Ъгъл на отражение - начален	Ъгъл на отражение - краен	Отклонение от север	Номер на ъглов отразител
			[градуси]	[градуси]		
Възходяща	102	3	41.35	46.01	348 / 386.667	CR1, CR3, CR5
Низходяща	7	2	36.05	41.96	192 / 213.33	CR2, CR4, CR6

Наземните постоянни ъглови отразители са изработени съгласно изискванията в техническото задание. Отражателите са създадени и изработени в Института по космически изследвания и технологии към Българска академия на науките.

Проектното местоположение на ъгловите отразители е трасирано на място чрез геодезически GNSS приемник с точност 0.010mm в хоризонтално положение. При трасирането са прецизирани подходящи площадки за изграждане на основите за монтажа на отразителите. Окончателното разположение на ъгловите отразители е представено на фигура 8.2.2.1.

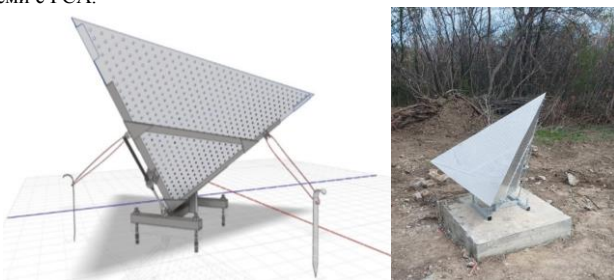
При оглед на място с проектантския екип се установява, че местоположенията на отразителите са в обработен терен при оформяне на строителната площадка, но основно с мека земна основа. Поради това за осигуряване на по-надеждно закрепване на отразителите е взето решение вместо предвидените плочи с размери 1000 x 1000 x 150 mm, върху които по проект се предвижда монтажа на отразителите, да се изпълнят фундаменти с проектните планови размери, но с по-голяма дълбочина от 500mm, които са изляети чрез кофраж с изкопи с дълбочина 250mm. Така половината от фундамента е под нивото на околния терен, а останалата част е над терена, както е показано на фигура 8.2.2.2.



Фигура 8.2.2.1. План-схема на разположение на ъгловите отражатели на площадката НХРАО

Ъгловите отражатели са монтирани посредством стойка за наземно монтиране към предварително изработени стоманобетонни фундаменти, които са трасирани под дадения ъгъл на преминаване на орбитата.

При извършване на монтажа е изпълнено прецизно ориентиране на всеки ъглов отражател, спазвайки следните основни принципи за разположение на орбитите на съответните сателитни системи с РСА.



Фигура 8.2.2.2. 3D чертеж на пасивен отражател за SAR данни и монтиран на терен отражател

С цел постигане на максимално използване на отражателите за целите на мониторинга на площадката на Национално хранилище за радиоактивни отпадъци (НХРАО) Радиана, шестте отражателя са ориентирани така, че три от тях да се използват от сателити по възходяща орбита 102, а останалите три по низходяща орбита 7, както е посочено в таблица 8.2.2.1. Непосредствено след монтажа на ъгловите отражатели се извършва прецизно координиране на центровете им – върха на пирамидата, образувана от трите стени на отражателя.

Таблица 8.2.2.2. Координати на центровете на отражателите в координатни системи WGS84 и елипсоидни височини, Кадастрална координатна система 2005 и височинна система EVRS2007 с данни за техните средни квадратни грешки по положение и височина.

Point Name	Lat. Long.	Altitude	Anten. Height	North East	Elev.	Solut. Status	Track. Satel	PDOP	HRMS	VRMS
CR3		134.315	2.073		89.363	FIXED	35	0.941	0.012	0.007
CR2		133.447	2.073		88.507	FIXED	35	0.930	0.011	0.006
CR1		125.058	2.073		80.133	FIXED	36	0.860	0.011	0.014
CR6		79.104	2.073		34.161	FIXED	38	0.800	0.010	0.016
CR5		82.033	2.073		37.103	FIXED	35	0.930	0.010	0.017
CR4		78.604	2.073		33.683	FIXED	39	0.820	0.009	0.015

Координатите на центровете на отражателите в координатни системи WGS84 и елипсоидни височини, Кадастрална координатна система 2005 и височинна система EVRS2007 с данни за технични средни квадратни грешки по положение и височина са представени в таблица 8.2.2.2, но поради конфиденциалност не са дадени числените стойности на координатите.

С монитрането на тристенните пасивни отражатели/рефлектори се цели да се направи нововъведение при използване на InSAR технологията и да се изследват и оценят получаваните резултати от SAR данните, което е иноваторско за научната общност в България. За целта е направено задълбочено проучване на съществуващите в световен мащаб приложения през последното десетилетие (Nikolov et al., 2024c). Те ще послужат за верифициране и полеви контрол на площадката на Национално хранилище за радиоактивни отпадъци (HXPAO) Радяна, и ще повишат надеждността на създадените карти на земните премествания за разглеждани геоложки структури. Една от целите е да се приложи методът DInSAR за евентуално проследяване на ниско-скоростни деформации в района.

## **9. Мониторинг на ледници въз основа на продукти на Sentinel-1 - формат Ground Range Detected (GRD)**

През последните години дистанционното наблюдение заема все по-голямо място за картографиране и това даде увереността да се представи тази нова възможност за наблюдение на развитието на динамиката на ледници и картографиране на скоростите на леда на ледниците около Българската база „Св. Климент Охридски“. Дистанционното наблюдение става все по-важен инструмент в изследването на изменението на климата, като радарът със синтезирана апертура (SAR) е една от технологиите, която претърпя бърз растеж, предлагайки предимството да предоставя данни независимо от метеорологичните условия. Данните за SAR се използват в различни техники за оценка на движенията на повърхността, включително радарна интерферометрия (InSAR) и методи за офсетно проследяване. Прилагането на метода InSAR в региони, където се случват динамични движения на земната повърхност, може да доведе до загуба на кохерентност. Поради това методът на офсетно проследяване се използва главно в покрити с лед зони, където скоростите са значителни и се появяват големи премествания в хоризонталната равнина. Тази техника се използва широко за получаване на скоростта на повърхността на ледници (Łukosz et al., 2022).

Научните резултати в този раздел са част от работата на автора като ръководител на работен пакет “Сателитни данни” в проект „Комплексно геофизично изследване на ледниците в района на Южния залив на остров Ливингстън 80-25-70 / 03.08.2021 г., СУ “Кл. Охридски“.

Авторът има претенции, че са извършени за първи път изследвания на ледниците около Българската база на остров Ливингстън на базата на SAR изображения от Sentinel-1A.

Остров Ливингстън е антарктически остров в Южния океан, част от архипелага Южни Шетландски острови. Българската база "Св. Климент Охридски" се намира на полуостров Хърд на около 130 м от бреговете на вътрешния залив Емона. Анализирани са резултатите от динамиката и промените на няколко ледника на остров Ливинг

стън, а именно Камчия, Пимпирев, Перуника, Хънтрес, Мейси, Преспа, Хурон и Калиакра, настъпили през лятото на 2021 г. Скоростите, изчислени от данните на Sentinel-1 и техниката за проследяване на отместване, са сравнени с архивирани GNSS скорости на ледника Перуника.

За да се проучи в детайли динамиката на движението на ледника Перуника, през 2015 г. Васил Гурев (СУ "Св. Климент Охридски") започна системно наблюдение на положението на точки на повърхността му, чрез GNSS измервания. Измерванията на GNSS са извършени в пет точки на ледника и по-късно е изчислена скоростта в cm/d. В (Georgieva et al., 2019) са представени първоначалните резултати от изследване на сеизмичността на генерирани от динамичните процеси в ледника Перуника, записани от българската широколентова сеизмична станция LIVV и тяхната връзка с измерените GNSS премествания на повърхността на ледника.

Публикацията (Atanasova-Zlatareva & Nikolov, 2022b) е първата демонстрация за България на capacитетата на оперативните радарни сателити за картографиране измененията на скоростите на ледниците. По този начин се осигурява често и навременно наблюдение на потока на ледената покривка, както и възможността да се проследи динамиката и еволюция на ледниците около българската база „Св. Климент Охридски“.

### **9.1. Район на изследване**

Изследвано е движението на ледниците в близост до българската база „Св. Климент Охридски“. Картографирана е скоростта на леда на ледниците Камчия, Пимпирев, Перуника, Хънтрес, Мейси, Преспа, Хурон и Калиакра (виж фиг. 9.1.1), които са най-големите ледници на остров Ливингстън. Използвани са създадени от български екипи карти на остров Ливингстън,

за да се създадат полигони (дефиниране на точки с координати), описващи границите на ледниците, така че да могат да бъдат идентифицирани на SAR изображенията, тъй като в момента няма измервания на място и в някои случаи е трудно получаване на такива. Българската антарктическа картография започва през 1996 г. с топографски план на българската базова територия в мащаб 1:1000, изработен от (Ivanov, 1996). Той е и основен автор на първата българска карта на островите Ливингстън и Гринуич в мащаб 1:100 000, публикувана през 2005 г. През 1999 г. геодезистите Б. Александров и Д. Димитров изработват топографски план на Българската базова територия в мащаб 1: 2000 г. Агенцията по геодезия, картография и кадастръ на България публикува топографски план в мащаб 1:2000 на целия български бряг през 2016 г.

Районът на Шетландските острови е специфичен, тъй като се намира в преходната зона между две тектонични плочи – Плочата на Дрейк (Феникс) на север и Антарктическата плоча на юг. Развитие на района преминава през 3 основни етапи – преди отдръпването на плочите, по време на отдръпването и в периода на удължаване (Dimitrova et al., 2017). Предложеното изследване обхваща ледника Перуника, на който се наблюдава и увеличаване на вътрешната температура на леда поради множество пукнатини (Dimitrova et al., 2017).

## 9.2. Метод и данни

Изследването се базира на използването на подход за дистанционно наблюдение за генериране на карти на скоростта на ледника от продукти на **Sentinel-1 Level-1 във формат Ground Range Detected (GRD)**. Няколко двойки продукти Sentinel-1 IW GRD са формирани, като оригиналните данни са изтеглени от центъра на ESA или Vertex/Alaska. Входните продукти за създаване на карта на скоростта са два GRD продукта, регистриращи области върху една и съща площ, получени по различно време. Времевият интервал трябва да бъде възможно най-кратък и за да се пручи този период са използвани няколко GRD продукта, придобити с интервал от 12 дни в периода 04 ноември – 10 декември 2021 г.

Скоростите на ледника са изчислени чрез техниката за проследяване на отместване, като се използва Sentinel-1 SAR данни и софтуер с отворен код SNAP. Използвани са данни за SAR с HH поляризация.

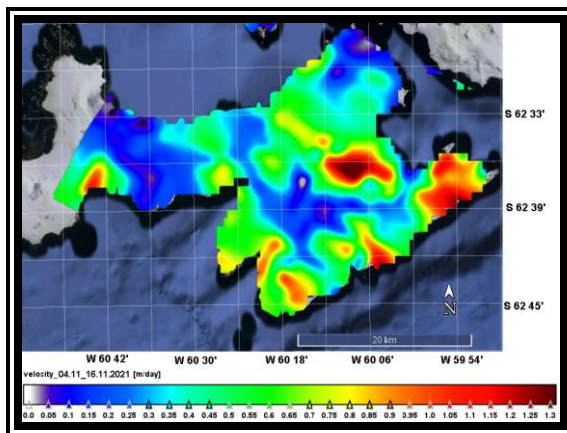
Съвместната регистрация на двойките изображения е извършена с помощта на орбитална информация. Информацията за орбитата, (когато е налична), предоставена в сателитните метаданни Sentinel-1, е актуализирана с точни ефемериди на орбитата, предоставени от наземния сегмент с данни за полезен товар Sentinel-1 (PDGS). Скорости на леда се представя във формат GeoTiff от по-малка извлечена област през централния ствол на всеки леден поток, с мрежа във вид 100 метра на 100 метра разстояние му точките от мрежата. Проследяването на отместване „Offset Tracking“ е техника, която измерва преместването между две изображения, като използва корелационна оптимизация на интензитета на пиксела. Тази методология се използва широко при оценка на движението на ледниците. Една от основните процедури при обработката на GRD продукти е „Съвместно регистриране на изображенията в стек с помощта на DEM“. В този случай се появи един проблем, тъй като DEM по подразбиране използва е SRTM, който покрива по-голямата част от земната повърхност между -60° и +60° географска ширина. оради това е използван GETASSE30 DEM, при който може да се направи избор (Vertex, 2021).

Тъй като изображението обхваща голяма площ от архипелага Южни Шетландски острови, а областта на интерес е само от района на остров Ливингстън, се създаде подмножество от съвместно регистрирани стек, който съдържа само областта на ледниците.

## 9.3. Резултати

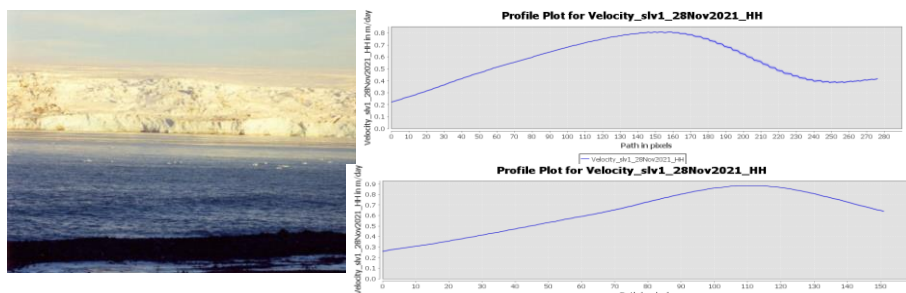
Получените първи резултати се базират на шест SAR изображения за изчисляване на скоростта. Данните са събрани за летните периоди на 2021 г. Изчисленията са извършени на интервали с 12-дневната базова линия за всеки период. За прилагане на метода за проследяване на отместване са използвани продуктите за открит обхват на земята (GRD) с разстояние между пикселите 10 × 10 m и разделителна способност 20 × 22 m (ESA). Продуктите GRD са предварително обработени SAR данни, които са били многократно разглеждани и проектирани към обхвата на Земята с помощта на земен елипсоиден модел (Łukosz et al., 2022).

Резултатите са под формата на карти (фигура 9.1.2) на скоростта на ледниците, получени чрез офсетно проследяване за периода 04 ноември – 10 декември 2021 г. и различни комбинации между датите. Създадени са карти за този едномесечен период, съдържащи скоростите, изчислени за три кратки и един дълъг интервал от време. Получените резултати се различават по големината на изчислената скорост, но и по пространственото положение в което се локализира движението на ледника. За всички горепосочени ледници е направен анализ въз основа на създадените карти на скоростта на леда за всеки 12 дни от формирания времеви ред.



Фигура 9.1.2. Карта на скоростта на ледниците на остров Ливингстън.

Скоростите на леда се извличат по две линии на потока, образуващи надлъжни и напречни профили. Подобни профили са анализирани за скорости, съставени за различни периоди от време. Създадени са надлъжни профили, показващи промяната в скоростта, в посоката на ледниковия поток. Стойността на скоростта на движение на ледника е различна в различните части. По същия начин и видимо от напречния профил на фигура 9.1.3, скоростта на леда в средата на ледника е с по-висока стойност.



Фигура 9.1.3. Снимка на ледника Пимпирев. Скорост на леда по надлъжен и напречен профил на ледника Пимпирев.

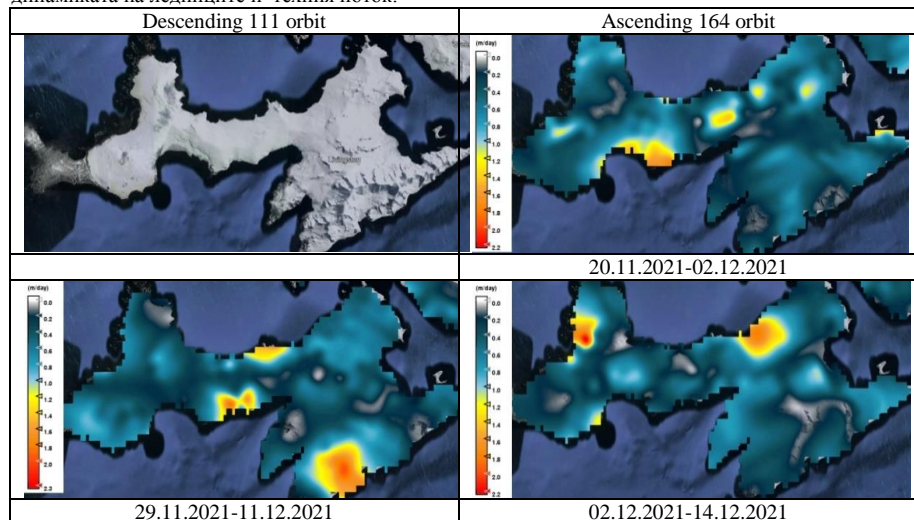
Скоростите на ледниците и промените в техните изходни площи за два начални месеца на лятото - ноември и декември 2021 г. са изследвани с използване на SAR данни (Atanasova-Zlatareva & Nikolov 2022b). Тези проучвания са разширени като са създадени времеви серии от радарни изображения за последните два летни периода, включително декември 2021 г. до края на март 2022 г. и аналогично декември 2022 г. до края на март 2023 г., чрез които се наблюдават промените в ледниците (Атанасова 2023а). Определена е скоростта на ледниците за интервал от 12 дни. По време на това допълващо изследване са използвани отново данни във формат GRD от режим на Sentinel-1 Extra Wide (EW) и HH поляризация, за да се определи скоростта на ледниците. Тематичната обработка на SAR данните е извършена изцяло посредством създадения и предоставян за свободно ползване програмен продукт SNAP.

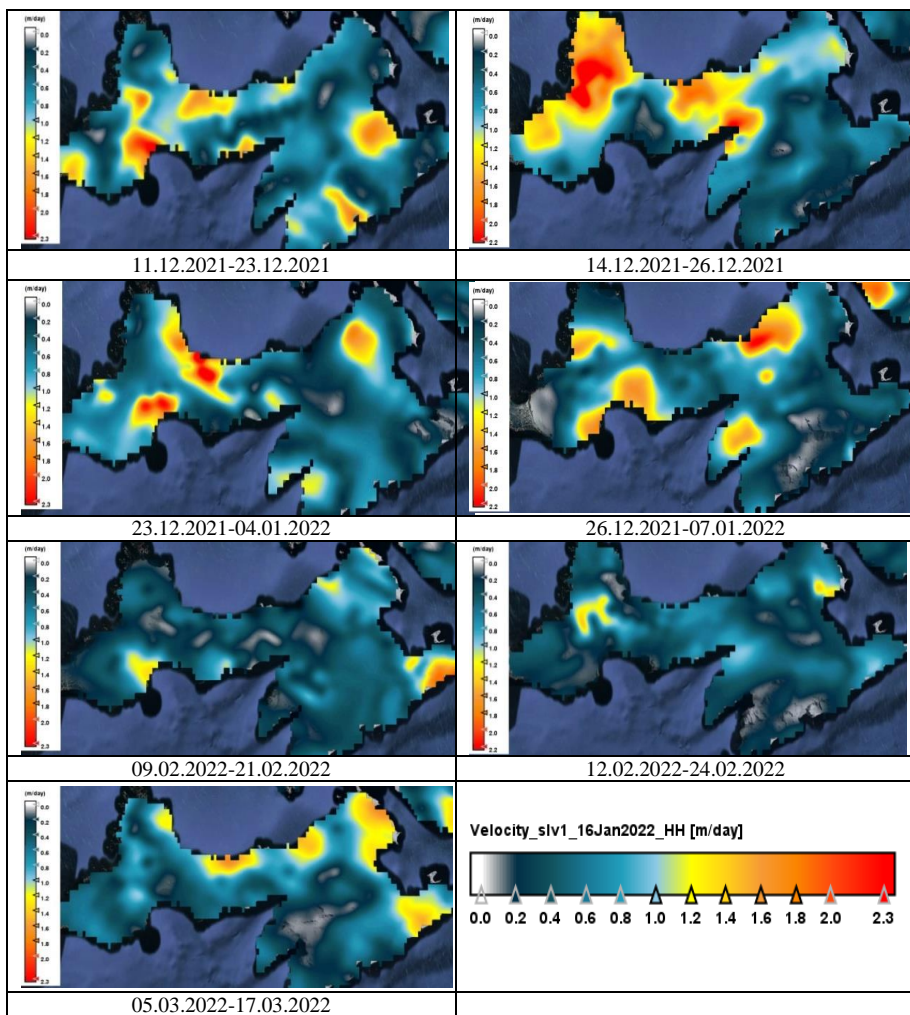
Получените резултати са анализирани заедно с наземните GNSS архивни данни за преместванията на точки от повърхността на ледника Перуника и след приключването на 31-та Антарктическа експедиция и обработката на събраните данни и отчетени резултати с приключването на проекта „Комплексно геофизично изследване на ледниците в района на Южния залив на остров Ливингстън 80-25-70 / 03.08.2021 г. СУ "Кл. Охридски" (Georgieva et al., 2017; Georgieva et al., 2018; Georgieva et al., 2021).

Таблица 9.1.1. Времева поредица от SAR изображения, използвани за определяне на скоростта на ледниците от двата типа орбити за последните два летни сезона;

2021-2022			2022-2023		
Низходяща 111 орбита			Низходяща 111 орбита		
период	мин м/д	мах м/д	период	мин м/д	мах м/д
29.11.2021-11.12.2021	0.090	1.456	24.11.2022-06.12.2022	0.081	1.274
11.12.2021-23.12.2021	0.108	1.588	06.12.2022-18.12.2022	0.072	1.271
23.12.2021-04.01.2022	0.111	1.603	18.12.2022-30.12.2022	0.102	1.569
04.01.2022-16.01.2022	0.093	1.140	30.12.2022-11.01.2023	0.088	1.793
16.01.2022-28.01.2022	0.049	1.749	11.01.2023-23.01.2023	0.105	1.634
28.01.2022-09.02.2022	0.081	1.516	23.01.2023-04.02.2023	0.113	1.695
09.02.2022-21.02.2022	0.085	1.155	04.02.2023-16.02.2023	0.125	1.254
21.02.2022-05.03.2022	0.121	1.343	16.02.2023-28.02.2023	0.131	1.594
05.03.2022-17.03.2022	0.128	1.326	28.02.2023-12.03.2023	0.168	1.697
Възходяща 164 орбита			Възходяща 164 орбита		
период	мин м/д	мах м/д	период	мин м/д	мах м/д
20.11.2021-02.12.2021	0.115	1.173	27.11.2022-09.12.2022	0.127	2.225
02.12.2021-14.12.2021	0.081	1.351	09.12.2022-21.12.2022	0.116	1.646
14.12.2021-26.12.2021	0.120	1.980	21.12.2022-14.01.2023	0.051	0.882
26.12.2021-07.01.2022	0.066	1.656	14.01.2023-26.01.2023	0.114	1.534
07.01.2022-19.01.2022	0.161	1.632	26.01.2023-07.02.2023	0.084	1.346
19.01.2022-31.01.2022	0.152	1.496	07.02.2023-19.02.2023	0.092	1.413
31.01.2022-12.02.2022	0.086	1.530	19.02.2023-03.03.2023	0.062	2.087
12.02.2022-24.02.2022	0.073	1.004	Скорост мин м/д		
24.02.2022-08.03.2022	0.070	1.830	Скорост мах м/д		

На фигура 9.1.4 е представена времева поредица от създадени карто-схеми на скоростта на ледниците на остров Ливингстън от SAR изображения от Sentinel-1A за летния сезон 2021-2022 от двата типа орбити. Скоростите на леда се извлича по двете линии на потока. Създадени са надлъжни профили, показващи промяната в скоростта по посоката на ледниковия поток. Стойността на скоростта на движение на ледника е различна в различните части, например скоростта на леда при напречния профил в средата на ледника е с по-висока стойност. Получените резултати показват два различни режима, а именно високо честота и големи амплитудни вариации по време на сезона на топене (януари-февруари) и малки колебания в изменението на ледената покривката през останалата част от годината. Данните от сателитите с радари със синтезирана апертура дават възможността да се осигури често и навременно наблюдение на развитието и динамиката на ледниците и техния поток.





Фигура 9.1.4. Карто-схеми на скоростите на ледниците на остров Ливингстън, определени от времеве поредица от SAR изображения за летен сезон ноември 2021- март 2022 г. от двата типа орбити.

Систематичното наблюдение на ледниците е от основно значение за разбирането на динамиката и развитието на техния поток и приноса им за покачване на морското равнище. Това изследване предоставя първи резултати от обработката на времевите редове от SAR изображения за определяне скоростта на ледниците през последните две лета (2021-2022; 2022-2023) на остров Ливингстън (Атанасова 2023а).

Демонстрираните резултати са представителна извадка от последните две лета, но изследването може да се основава на по-дълъг период и да се сравняват резултатите от обработката на летните и зимните данни. Предлаганата методология за мониторинг и техника за картиране е финансово достъпна и независима от труднодостъпните райони на мястото на изследване. Дистанционното наблюдение предоставя възможност за наблюдение на скоростта на ледниците чрез продукти със сравнително кратко времево разстояние. Прилагането на класически геодезически методи в ледникови райони често е трудна задача. SAR технологията позволява проследяването на промените да се извършва бързо и в относително реално време. Бъдещи експерименти за подобряване на процеса за обработка и за повишаване на точността на изходните продукти ще се извърши в последващи изследвания.

## 10. Обобщение и заключение

Радарът със синтезирана апертура (SAR) е техника за откриване на преместванията на земната повърхност и има потенциала да е ефективен и икономичен метод за наблюдение на геопроцеси и земни премествания причинени от земетресения, вулкани, свлачище, срутища, потъвания, наводнения, пожари, движения на ледници и др. и тяхното поведение в обширни райони. Голямото предимство на DInSAR е, че може да се наблюдават огромни площи, без да се използват сензори на земната повърхност.

Земетресенията са природно бедствие, причиняващо щети, които се измерват с човешки животи и разрушения на природни и инфраструктурни обекти. 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 програмата „Коперник“ на ЕС. Един от нейните компоненти е съставената от два сателита мисия Sentinel-1, които осигуряват данни от радар със синтезирана апертура (PCA), предоставяни за свободно ползване. Благодарение на тях е възможно определянето на деформации на земната кора, настъпили вследствие на земетресение. В представения труд са изследвани 7 отделни събития, които ясно показват предимствата на избрания подход – възможност за оценка на настъпилите в резултат на земетресения земни премествания на големи площи (повече от 500 km<sup>2</sup>), регистриране на сравнително малки премествания (~1 cm) и получаване на данни, независимо от метеорологичните условия и в кратки интервали на повторно преминаване на сателита над един и същи район от Земната повърхност.

Основна задача е да се установи размера на засегнатата територия и величината на деформациите на земната повърхност и да се изготвят карти на преместванията. Въз основа на данни от EMSC за всяко конкретно събитие е създаван кратък каталог на земетресенията с магнитуд по-голям от Mw 4 за период от две седмици преди и след всяко едно от събитията. Конкретните дати за тези каталози са подбрани в зависимост от наличието на използваните изходни данни от PCA. Данните от PCA са използвани за регистриране на настъпилите земни премествания посредством създаването на интерферометрични изображения, от които е извлечена информация за причинените от земетресението премествания, пропадания или издигания.

При изучаване на този тип събития в много редки случаи е възможно да се разграничат деформациите на земната кора, настъпили вследствие само на основния труд от последвалите афтершокове. Обикновено, използвайки приложението метод, се регистрират сумарните изменения на земната кора за периода между две преминавания на сателитите, който за мисията Сентинел е минимум 6 дена (а след 2022 е 12 дена).

Чрез използване на DInSAR се постигна представяне на типичното поведение на някои свлачища по Северното Черноморско крайбрежие. Резултатите съответстват добре с действителното поведение, описано от Гражданска защита Варна - официалният представител, отговарящ за свлачищата в МРРБ. Това изследване доказва, че DInSAR е полезен инструмент за дългосрочен непрекъснат мониторинг на свлачища по Северното Черноморие. Реализираният на един такъв проект има значителен принос не само за мониторинга на геопроцесите, анализа на резултатите и оценката на опасността, но и за своевременното информиране на обществеността.

Създадената гео-база данни структурира събраната информация за опасни геопроцеси в изследваните райони и ги въвежда в геоинформационна система (ГИС). Целта е да улесни анализа на наличните данни от множество източници за тези свлачища и да ги интегрира с резултатите от регулярен мониторинг. В базите са включени интерферометрични изображения, данни от постоянни GNSS станции и от локални GNSS мрежи, сеизмични и геофизични данни, актуализирани геоложки карти и карти на риска от свлачищни процеси. Така създадените гео базиданни са първа стъпка към разработване на регионален хиперкуб с данни. Реализираният подход за създаване на такава локална геобаза данни в ГИС среда осигурява възможност за интегриране и на нови геопространствени данни.

Изследвана е възможността за мониторинг на протичащите геодинамични процеси за район на град София, чрез допълващо използване на SAR и GNSS данни. GNSS данни от постоянни геодезически мрежи са използвани за валидиране на информацията, получена от SAR данните за района на изследване. Получени са надеждни резултати за текущи рискови геопроцеси за район на Югозападна България.

Преобладаващите земни движения в региона на Софийската котловина се преписват като резултат от активността по Витошката разломна зона (VFZ - Vitoshka Fault Zone) и Негушевската разломна зона (NFZ). За да се оцени големината на преместванията, записани от InSAR по протежение на двата разлома, са създадени два полигона с ширина 10 km и центрирани около тях като векторни файлове. Тези полигони са използвани за избор само на валидни точки от



растерните интерферограми и приложение на интерферометрията с постоянни отражатели, известна като PSI или PS-InSAR.

Установяването на повърхностни премествания, настъпили по инфраструктурни обекти, градска среда, промишлени предприятия или архитектурни обекти също се осъществява с помощта на времеви серии DInSAR. Определени са земни деформации чрез мулти-темпорална обработка на DInSAR в близост до археологически обект „Солницата-Провадия и участъка от железопътната линия София-Варна минаваща през гр. Провадия и промишлена зона, тъй като в този район често възникват повърхностни деформации, причинени от природни и антропогенни дейности. Цел на това изследване е да се проучат деформациите на земната кора, които биха довели до нарушаване целостта на археологически обект „Солницата-Провадия“, намиращ се в района на Мировското солно находище край град Провадия. Паметникът е датиран от VI-V хил. пр. н. е. и включва останки от античен град край Провадия. Регистрираните деформации в района се дължат на природни и антропогенни фактори. Посочените фактори оказват безспорно негативно влияние върху опазването на този исторически обект и обосновават необходимостта от редовно наблюдение на протичащите геодинамични процеси. Създаден е набор от интерферометрични изображения за няколко периода с времеви интервал от четири месеца. Резултатите са сравними с тенденциите на земните движения, регистрирани въз основа на повтарящите се многогодишни ГНСС наблюдения и геодзически измервания, проведени на геодинамична мрежа Мирово.

SAR може да се използва за наблюдение на повърхностните премествания на промишлени предприятия – пример, зоната (около и вътре) на АЕЦ Козлодуй и обслужващите я съоръжения (водни канали, сгради, тръбопроводи и др.) и по този начин може да се използва за предотвратяване на непосредствена нестабилност на споменатите съоръжения. Получените резултати са от свободно разпространявани SAR данни и поради тази причина пространствената разделителна способност се счита за средна. Още един начин за подобряване на качеството на информацията относно земните движения е използването на X-band SAR, който успешно се използва при наблюдение на обекти, създадени от човека, сгради, мостове и градски зони. Допълнително подобрене за разкриването на текущите премествания в зоната около АЕЦ се въвежда с използването на пасивни ълови рефлектори. С монтирането на трисенните пасивни отражатели/рефлектори се цели да се направи нововъведение при използване на InSAR технологията и да се изследват и оценят получаваните резултати от SAR данните, което е иноваторско за научната общност в България. Те ще послужат за верифициране и полеви контрол на площадката на НХРАО Радиана, и ще повишат надеждността на създадените карти на земните премествания. Една от целите е да се приложи методът DInSAR за проследяване на ниско-скоростни деформации в района. Получените интерферометрични карти като краен резултат разкриват цялостната стабилност на терена на изследвания регион около АЕЦ. Тези карти могат да обслужват нуждите на компетентните местни власти, както и на други оператори с цел повишаване безопасността на населението, живеещо в района.

През последните години дистанционните наблюдения на Земята имат все по-важна роля при картографиране на земната повърхност и е важен инструмент при изучаването изменението на климата. PCA предоставят данни независимо от метеорологичните условия и са един все по-често използван източник на данни. За създаване на карти на скоростите за няколко ключови ледника на остров Ливингстън са използвани данни от Sentinel-1 на ЕКА. Приложен е валидиран модел за получаване на скоростта на ледниците от SAR двойки изображения, обработени с помощта на софтуера SNAP. Получени са първите резултати за скоростите на ледниците на остров Ливингстън от времеви серии за два летни периода. Скоростта на ледниците е определена в две направления: по линията на потока/надлъжен и напречен профили. Резултатите показват възможностите на радарните сателити за регулярно картографиране и по този начин осигуряване на чести и навременни наблюдения на потока на ледената покривка, както и за наблюдение на динамичното развитие на ледниците около българската база „Св. Климент Охридски“

Мониторингът на действителното поведение на движенията на земната кора е от съществено значение за оценката и прогнозирането на риска от бедствия. Въпреки това, тъй като целевата област обикновено е огромна, мониторингът не се провежда често поради технически причини трудности и проблем с разходите. Изследването и прогнозирането на съвременните геодинамични движения на земната кора, базирано на SAR данни представляват значителен интерес за Геонауките.

## ПРИНОСИ

В съответствие с получените резултати и извършените анализи, претенциите за основни приноси на дисертационния труд могат да се обобщят, както следва:

1. Разработена е методика за съвместно използване на сателитни РСА и наземни ГНСС данни и тяхното съвместно интерпретиране с информация от допълнителни източници при обследване на свлачища.

2. Разработен е алгоритъм за определяне на премествания на земната кора от SLC изображение и е предложена методология за обработка на GRD данни за моделиране движенията на ледниците и определяне на тяхната скорост.

3. Определени са косеизмичните деформации на земната кора в района на Балканския полуостров, настъпили след земетресения с магнитуд над 6.0 Mw след 2015г.

4. Създадени са карти на преместванията на свлачища от Северното Черноморие на България, базирани на времевите серии от SAR данни за периода 2015–2022 г.

5. Определени са линейни деформации за периода 2019-2021 (разширения и компресия) и главните оси на относителните деформации въз основа на ГНСС измервания за свлачищен циркус “Дългия яр“ в Северното Черноморие на България.

6. Създадена е локална геобазаданни в ГИС среда за свлачищата по Северното Черноморие на България за синергична интерпретация на данните и мониторинг на риска при свлачищни процеси.

7. Определяни са движенията на земната кора за района на град София и промишлени зони Провадия и АЕЦ Козлодуй на базата на DinSAR сателитни данни.

8. Определяни са за първи път скоростите на ледниците на остров Ливингстън - Антракдида, по данни от Sentinel-1

## Списък на научните публикации свързани с десертацията

1. **Atanasova-Zlatareva Mila**, Nikolov Hristo, Ivanov Anton (2022) Monitoring of coastal landslides using Sentinel-1 imagery. Proc. SPIE 12267, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXVIII, 122670C (2022), 12267, SPIE Remote Sensing, 2022, Berlin, Germany, 2022, DOI:10.1117/12.2636221, 1-10 **SJR (Scopus):0.166 SJR**, непопадащ в Q категория (Scopus) <https://doi.org/10.1117/12.2636221>

2. Hristo Nikolov, **Mila Atanasova-Zlatareva (2022)** Determination of surface deformations in the zone of nuclear power plant Kozloduy. Proc. SPIE 12267, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXVIII, 122670T (2022), SPIE Remote Sensing, 2022, Berlin, Germany, 2022, DOI:10.1117/12.2636265, **SJR (Scopus):0.166 SJR**, непопадащ в Q категория (Scopus) <https://doi.org/10.1117/12.2636265>

3. Dimitrov N, **Atanasova M. (2022)** Geodetic database for monitoring of geodynamic processes in the region of Sofia and Southwestern Bulgaria. Proceedings of 22th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2022, 22, 2.1, International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 2022, ISBN:978-619-7603-40-8, ISSN:1314-2704, DOI:10.5593/sgem2022/2.1/s09.28, **SJR (Scopus):0.144 SJR**, непопадащ в Q категория (Scopus)

4. **Atanasova Mila**, Nikolov Hristo (2023) APPLICATION OF SAR DATA TIME SERIES FOR MONITORING OF GEODINAMIC PROSESSES IN THE SOFIA REGION. Proceedings of 23th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2023, 23, 2.1, STEF92 Technology, 2023, ISBN:978-619-7603-57-6, ISSN:1314-2704, DOI:10.5593/sgem2023/2.1/s10.36, 283-290. **SJR (Scopus):0.144 SJR**, непопадащ в Q категория (Scopus)

5. **Atanasova Mila**, Plamena Raykova, Hristo Nikolov (2023a) 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. **SJR (Scopus):0.18, JCR-IF (Web of Science):0.329 Q3 (Scopus)**, <https://doi.org/10.7546/CRABS.2023.04.07>, 554-562

6. **Atanasova Mila**, Nikolov Hristo, Georgiev I, Ivanov A. (2023b) Deformation analysis in landslides NE Bulgaria using GNSS data complemented by InSAR for better interpretation results. Proceedings of 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring, JISDM202 Spain, 20-22 June 2022, 5th, Publisher Editorial Universitat Politècnica de València, 2023 [www.lalibreria.upv.es/](http://www.lalibreria.upv.es/) / Ref.: 6661\_01\_01\_01, 2023, ISBN:978-84-9048-979-6, DOI:DOI: <http://doi.org/10.4995/JISDM2022.2022.13837>, 279-284 **Международно академично издателство**

7. **Atanasova-Zlatareva M.**, Vassileva K, Nikolov H. Ivanov A, (2023c) Study of landslide processes on the Northern Black Sea coast of Bulgaria using GNSS technology. Proceedings 8th International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of GNSS 14 - 16.09.2022, Sofia, 8th, ESA Conference European Space Research and Technology Centre (ESTEC), 2023, 1-5 **Международно неакадемично издателство**

8. Nikolov Hristo, **Atanasova Mila (2023a)** MONITORING COASTAL LANDSLIDES ALONG THE NORTHEAST BLACK SEA OF BULGARIA USING SAR DATA. Aerospace Research in Bulgaria, 35, Bulgarian Academy of Sciences. Space Research and Technology Institute, 2023, ISSN: p-ISSN 1313-0927; e-ISSN 2367-9522, DOI:10.3897/arb.v35.e07, 63-79. **JCR-IF (Web of Science):0.3** Без JCR или SJR – индексирани в WoS или Scopus (Web of Science)

9. Nikolov Hristo, **Atanasova Mila. (2023b)** Registering the ground deformations at the area of the archaeological site "Solnitsata". PROCEEDINGS 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring JISDM 2022 20 - 22 June 2022 Polytechnic City of Innovation Valencia (Spain), 5th, Editorial Universitat Politècnica de València, 2023 [www.lalibreria.upv.es/](http://www.lalibreria.upv.es/) / Ref.: 6661\_01\_01\_01, 2023, ISBN:978-84-9048-979-6, DOI:<http://doi.org/10.4995/JISDM2022.2022.13847>, 305-310 **Международно академично издателство**

10. Vassileva K, **Atanasova-Zlatareva Mila**, Valev G. (2023) Review of the works on the Earth crust movement in Bulgaria and Southern Balkans from GNSS for the period 2006-2016. Proceedings 8th International Colloquium on Scientific and Fundamental Aspects of GNSS 14 - 16.09.2022, Sofia, 8th, ESA Conference European Space Research and Technology Centre (ESTEC), 2023, 1-8 **Международно неакадемично издателство**

11. **Атанасова Мила**, Николов Христо (2023) Регистриране на ко-сеизмични премествания на Балканите от сателитни данни. Списание "Геодезия Картография и Земеоустройство", 3-4, 2023, ISSN:0324-1610, 16-22 **Национално неакадемично издателство**

12. **Атанасова Мила (2023a)**. Мониторинг на скоростта на леда на ледниците на остров Ливингстън чрез времеви серии от SAR данни. XI National Geophysical Conference, 9th June 2023., XI, НИГГТ-БАН CD, 2023, DOI:<https://doi.org/10.48368/BGS-2023.1.N14> **Национално**

**академично издателство**

13. **Атанасова Мила. (2023b).** Определяне на косеизмични деформации в района на Балканския полуостров по данни на SAR. XI National Geophysical Conference, 9th June 2023. Proceedings of the XI National Geophysical Conference, 9th June 2023., XI, НИГГГ-БАН, CD, 2023, DOI:https://doi.org/10.48368/BGS-2023.1.N12 **Национално академично издателство**

14. **Николов Христо, Атанасова Мила. (2023).** Ко-сеизмични движения на земната повърхност вследствие на земетресенията в Турция-Сирия регистрирани по данни от SAR. XI National Geophysical Conference, 9th June 2023, XI, НИГГГ-БАН, CD, 2023, DOI:https://doi.org/10.48368/BGS-2023.1.N11 **Национално академично издателство**

15. **Атанасова-Zlatareva Mila, Hristo Nikolov. (2024a)** Sentinel-1 DInSAR for Monitoring Active Landslide “Fish-Fish” Northeast Bulgaria. Recent Research on Geotechnical Engineering, Remote Sensing, Geophysics and Earthquake Seismology. MedGU-22, 3, Advances in Science, Technology & Innovation. **Springer**, Cham., 2024, ISBN:Print ISBN: 978-3-031-48714-9, Online ISBN: 978-3-031-48715-6, DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-031-48715-6\_23, 103-106. **SJR (Scopus):0.132 Q4 (Scopus)**

16. **Атанасова-Zlatareva Mila, Hristo Nikolov (2024b),** Studying Seismic Events via Satellite Interferometry for the Territory of the Balkan Peninsula. 10th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management, Volume 1, Scitepress, 2024, DOI:10.5220/0012689900003696, 152-159 **индексиран в WoS или Scopus (Web of Science) Без JCR или SJR –**

17. **Nikolov Hristo, Mila Atanasova. (2024a)** Local Geodatabase as Tool for Monitoring the Landslide “Thracian Cliffs”. Recent Research on Geotechnical Engineering, Remote Sensing, Geophysics and Earthquake Seismology. MedGU-22, 3, Advances in Science, Technology & Innovation. **Springer**, Cham., 2024, ISBN:Print ISBN 978-3-031-48714-9 Online ISBN 978-3-031-48715-6, DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-031-48715-6\_27, 121-123. **SJR (Scopus):0.132 Q4 (Scopus)**

18. **Nikolov Hristo, Atanasova-Zlatareva M. (2024b)** Establishing the surface deformation in the Sofia valley by means of SAR data. International Workshop on Geosciences in Active Areas (WGAAL2023) PROCEEDINGS 16 – 20 October 2023 Arrecife. Lanzarote, Canary Islands, Spain, (IGEO) Books and parts of books; Editors: José Arno Sampedro, Emilio J. Vélez Herranz; Madrid, May 2024, 2024, ISBN:978-84-128033-6-5, DOI:https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/16338, 34-40 **Международно академично издателство**

19. **Атанасова-Zlatarev Mila, Nikolov Hristo, Protopopova-Kakar Valentina. (2024c)** WGAAL2023 proceedings/ International Workshop Geosciences in active areas (WGAAL2023), (IGEO) Books and parts of books; Editors: José Arno Sampedro, Emilio J. Vélez Herranz, 2024, ISBN:978-84-128033-6-5, DOI:https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/16338, 40-47 **Международно академично издателство**

20. **Атанасова-Zlatareva Mila, Hristo Nikolov, Plamena Raykova (2024a),** Creating earthquake maps for the using GIS. Proceedings 9th International Conference on Cartography and GIS, 16-21 June 2024, Nessebar, Bulgaria: , Eds: Bandrova T., Konečný M., Marinova S., Bulgarian Cartographic Association University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy Endorsed by International Cartographic Association, 2024, ISSN:1314-0604, 337-347 **ще се реферира в WoS**

21. **Атанасова-Zlatareva Mila, Hristo Nikolov, Lyuba Dimova, Reneta Raykova. (2024b),** MAPPING AND MODELLING OF 27 SEPT 2021 CRETE EARTHQUAKE DEFORMATION. Proceedings 9th International Conference on Cartography and GIS, 16-21 June 2024, Nessebar, Bulgaria: , Eds: Bandrova T., Konečný M., Marinova S., Bulgarian Cartographic Association University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy Endorsed by International Cartographic Association, 2024, ISSN:1314-0604, 781-788 **ще се реферира в WoS**

22. **Атанасова M., Nikolov H., Dimova L., Raykova R., (2024d)** Monitoring and inversion of three co-seismic events on the Balkan peninsula. Proceedings Volume 13212, Tenth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2024); 132120F (2024), 13213, SPIE DIGITAL LIBRARY, 2024, DOI:https://doi.org/10.1117/12.3035471, 1-13 **ще се реферира в WoS u Scopus**

23. **Атанасова-Zlatareva M., Nikolov H., (2024c)** Complex analysis of co-seismic deformations using SAR satellite data: application for the Balkan Peninsula, Proceedings SPIE2024 - Edinburgh 16-19 Octobre 2024, Microwave Remote Sensing: Data Processing and Applications III **ще се реферира в WoS u Scopus (in press)**

24. **Nikolov Hristo, Atanasova M. Konstantin Metodiev (2024c)** Improving the quality of information received from synthetic aperture radars implementing innovative passive reflectors. Proceedings SPIE2024 - Edinburgh 16-19 Octobre 2024, Microwave Remote Sensing: Data Processing and Applications III **ще се реферира в WoS u Scopus (in press)**

## ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- Атанасова М.(2011) Основни принципи и приложение на метода InSAR. Геомедия, 1, януари, 2011, ISSN:1313-3365, 20-22
- Атанасова М., Николов Хр. (2016) Регистриране на деформации за земната кора в района на Провадия по INSAR метод "ГКЗ", 5-6, 2016, ISSN:0324-1610, 20-24
- Димитров Д., Ботев Е. (2016). Приложение на космически технологии за изследване и мониторинг на сейсмогенни зони SES 2016, (стр. 291-296). София.
- Минчев Д. 2012 (2012) Интерферометрични методи и алгоритми за моделиране и обработка на сателитни SAR изображения, София, Дисертация запридобиване на ОНС „доктор
- Райкова П., Симеонова С., Солаков Д., Александрова И., Земетресения с магнитуд MW>5.0, реализирани в сейсмогенна зона София след 1900 г. Bulgarian Geophysical Journal, 44, Bulgarian Academy of Sciences, 2021, ISSN:1311-753X, DOI:10.34975/bgj-2021.44.6, 60-74
- Солаков Д., Райкова П., Симеонова С., Александрова И. (2021) Силни разрушителни земетресения реализирани на територията на България след 1900 г. Bulgarian Geophysical Journal, 44, Bulgarian Academy of Sciences, 2021, ISSN:1311-753X, DOI:10.34975/bgj-2021.44.3, 33-42
- Allen, C. R. (1969), Active faulting in northern Turkey, Rep. 1577, 32 pp., Div. of Geol. Sic., Calif. Inst. of Technol., Pasadena.
- Ambraseys, N. N., and J. A. Jackson (1998), Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region, Geophys. J. Int., 133, 390–406, doi:10.1046/j.1365-246X.1998.00508.x
- Atanasova-Zlatareva M. (2015) Study of Deformation and Movements on the Earth's Crust, of Technogenic Character, Based on Repeated Geodetic Measurements. Technical Programme and Proceedings /FIG2015-Sofia, Bulgaria, ISBN:978-87-92853-35-6, ISSN:2307-4086, 1-12
- Atanasova M., Nikolov H., (2016) Detection of the Earth's crust deformation in Provadia area using InSAR technique. Proceedings of XXVI International symposium on “Modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields”, 2016, pp. 1-12
- Atanasova M., Nikolov H. (2017a) Displacements Monitoring Of The Trifon Zarezan Landslide By Gns Observations And Insar Introduction. Processing: 9th Congress of the Balkan Geophysical Society, Antalya, Turkey 05-09 November 2017, EAGE, 2017, DOI:10.3997/2214-4609.201702567, 1-5. SJR (Scopus):0.11
- Atanasova-Zlatareva M., Nikolov H., (2022) Establishing Surface Displacements along a Railway Route near Mirovo Salt Deposit, NE Bulgaria. GISTAM 2022 - 8th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management, 2022, ISBN:978-989-758-571-5, ISSN:2184-500X, DOI:10.5220/0011075400003185, 155-162
- Atzori S., Monterosso F., Antonioli A., De Luca C., Sviggas N., Casu F., Manunta M., Quintiliani M., Lanari R. (2023) Automatic seismic source modeling of InSAR displacements International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Volume 123, September 2023, 103445, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103445>
- Berov, B., Ivanov, Pl., Dobrev, N., Nankin, R., Krastanov, M., “State of the Art for Landslides Along the North Bulgarian Black Sea Coast, Landslide Science and Practice, Volume 5: Complex Environment,” 97 –102 Springer, Claudio Margottini, Paolo Canuti, Kyoji Sassa (2013).
- Berov, B., N. Nikolova, P. Ivanov, N. Dobrev, M. Krastanov, R. Nankin (2020). Landslide susceptibility mapping using GIS: a case study along Bulgarian Black Sea coast, In Proc. of 8th ICC&GIS conference, (Eds.) T. Bandrova, M. Konečný, S. Marinova, Nessebar, Bulgaria, vol. 1, 287-296, ISSN: 1314-0604. [iccgis2020.cartography-gis.com](http://iccgis2020.cartography-gis.com).
- Berov B, Frantzova A, Ivanov P, Dobrev N, Krastanov M, Nankin R (2024) Risk assessment of landslides: Low probability scenario for the town of Kavarna, northern Black Sea coast of Bulgaria. Journal of the Bulgarian Geographical Society 50: 129–148. <https://doi.org/10.3897/jbgs.e116695>
- Basili R., V. Kastelic, M. B. Demircioglu, D. Garcia Moreno, E. S. Nenser et al. (2013) The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the Project SHARE, <https://doi.org/10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF>. <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>
- Berardino et al., A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 40 (2002), pp. 2375-2383 <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1166596>
- Bianchini, S. et al. Landslide activity maps generation by means of persistent scatterer interferometry. Remote Sensing, 5(12), 2013.
- Bianchini S. et al. Building deformation assessment by means of persistent scatterer interferometry analysis on a land-slide-affected area: the Volterra (Italy) case study. Remote Sens 7(4):2015, pp.

- Bjelotomi Oršuli, O. Markovinovi, D. Varga, M. Baši, T. (2021) Coseismic Ground Displacement after the Mw6.2 Earthquake in NW Croatia Determined from Sentinel-1 and GNSS CORS Data. *Geosciences* 2021,11, 170. <https://doi.org/10.3390/geosciences11040170>
- Bruchev, I., Dobrev, N., Frangov, G., Ivanov, Pl., Varbanov, R., Berov, B., Nankin, R., Krastanov, M. (2007). The landslides in Bulgaria - factors and distribution, *Geologica Balcanica*, 36, 3-4, pp. 3-12
- Burchfiel, B.C., Nakov, R., Dumurdzanov, N., Papanikolaou, D., Tzankov, T., Serafimovski, T., King, R.W., Kotzev, V., Todosov, A., Nurce, B. (2008) Evolution and dynamics of the Cenozoic tectonics of the South Balkan extensional system. *Geosphere*, 4, 919-938, doi:10.1130/GES00169.1.1.
- Burchfiel BC, King RW, Todosov A, Kotzev V, Dumurdzanov N, Serafimovski T, Nurce B (2006) GPS results for Macedonia and its importance for the tectonics of southern Balkan extensional system. *Tectonophysics* 413(3–4):239–248. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.10.046>
- Cascini L, Fornaro G, Peduto D (2009) Analysis at medium scale of low-resolution DInSAR data in slowmoving landslide-affected areas. *ISPRS J Photogram Remote Sens* 64(6):598–611
- Carla T., Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment, *Geomorphology* Volume 335, 2019, pp. 62-75, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.014>
- Cavazza, W., Roure, F.M., Spakman, W., Stampfli, G.M., and Ziegler, (2004). *The TRANSMED Atlas. The Mediterranean region from Crust to Mantle*. Elsevier, Amsterdam.
- Chen, L.; Zhao, C.; Chen, H.; Kang, Y.; Li, B.; Liu, X. The Detection and Control Factor Analysis of Active Landslides in Guizhou Province, China, Using Sentinel-1 SAR Imagery. *Remote Sens* 2023, 15, 5468. <https://doi.org/10.3390/rs15235468>
- Cheshitev G., Milanova B., Gjurgjuv N., Kujumdjieva E., 1999. Geological map of Bulgaria M 1:10000. Map pages Varna and Zlatni piasaci, *Geology and Geophysics AD, Institute of Geology – BAS, Sofia*.
- Colesanti C, Ferretti A, Prati C, Rocca F (2003) Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Eng Geol* 68(1–2):3–14
- Costantini, M. et al., European Ground Motion Service (EGMS)," 2021 1486 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Brussels, Belgium, 2021, pp. 3293-3296, doi: 1487 10.1109/IGARSS47720.2021.9553562.
- D'Agostino, N., Métois, M., Koci, R., Duni, L., Kuka, N., Ganas, A., Georgiev, I., Jouanne, F., Kaludjerovic, N., Kandic, R., (2020). Active crustal deformation and rotations in the southwestern Balkans from continuous GPS measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, Volume 539, 1, Elsevier, ISSN:0012-821X, DOI:10.1016/j.epsl.2020.116246
- Di Traglia, F., De Luca, C., Manzo, M., Nolesini, T., Casagli, N., Lanari, R., & Casu, F. (2021). Joint exploitation of space-borne and ground-based multitemporal InSAR measurements for volcano monitoring: The Stromboli volcano case study. *Remote Sensing of Environment*, 260, 112441, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112441>
- Dimitrov D., I. Georgiev, L. Dimitrova and E. Botev (2013) "Deformations and seismicity in the region of Mirowo salt deposit, Bulgaria", *Proceedings of the 7th Congress of Balkan Geophysical Society*, 7-10 October, Tirana, Albania, CD, art. N. 18627, ISBN 978-90-73834- 55-2; ISSN 2214-4609
- Dimitrov, D., G. Jeleu, E. Botev. (2016) Analysis of the Deformation Processes in the Region of the Mirowo Salt Deposit. *Journal of the BAS*, vol. 4, Ed. "Prof. M. Drinov", pp 14-18, 2016
- Dimitrova L., S. Nikolova, G. Georgieva, R. Raykova, I. Ivanova, I. Asparuhova, (2010) Processing and analysis of seismicity in Provadiya region in 3 year period, National geophysical conference, Dec., 2010, [https://bggs.eu/konferencia\\_2010/09.pdf](https://bggs.eu/konferencia_2010/09.pdf)
- Dimitrova, L., Georgieva, G., Raykova, R., Dimitrov, D., Gourev, V., Solakov, D., Georgiev, I., Raykova, P., Protopopova, V., Aleksandrova, I., Popova, M.. (2017) Exploring seismicity of Livingston Island (Antarctica) and surroundings using records of Bulgarian Broadband Seismological Station LIVV during the astral summer 2015-2016.. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des sciences*. 70. 1709-1718, 2017
- Dimitrova, L., Georgieva, G., Trifonova, P. et al. (2020) Seismic sources and Earth structure in the transition zone between Fore-Balkan unit and Moesian platform, NE Bulgaria. *Acta Geod Geophys* 55, 183–202 (2020) <https://doi.org/10.1007/s40328-020-00288-3>
- Dimova L., Raykova R., (2023) Complex analysis of earthquake deformations using SAR images: Examples from Croatia and Greece December 2023 *Journal of Physics Conference Series* 2668(1):012011 DOI: 10.1088/1742-6596/2668/1/012011
- Dimitrov N, I. Georgiev, Nakov R. (2020). Monitoring of geodynamic processes in the area around Sofia. *Proceedings of International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, Volume 2.2, p 79-86, DOI:10.5593/sgem2020/2.2/s09.010.

- Dimitrov N, Nakov R. (2022). GPS Results from Long Time Monitoring of Geodynamic Processes in South-Western Bulgaria. *Applied Sciences*. 2022; 12(5):2682. <https://doi.org/10.3390/app12052682>.
- Fathian A, Atzori S, Nazari H, et al. (2021) Complex co- and post-seismic faulting of the 2017-2018 seismic sequence in western Iran revealed by InSAR and seismic data. *Remote Sens Environ* 253: 112224. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112224>
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., Massonnet, D. (2007) *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation [TM-19]*, ESA Publications, Noordwijk, The Netherlands, 2007.
- Fiaschi S. et al. Estimation of land subsidence in deltaic areas through differential SAR interferometry: the Po River Delta case study (Northeast Italy), *International Journal of Remote Sensing*, 2008, doi:10.1080/01431161.2018.1490977
- Flores, A.; Herndon, K.; Thapa, R.; Cherrington, E. *The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*; SERVIR Global Science Coordination Office: Huntsville, AL, USA, 2019.
- Fruneau et al., Observation and modeling of the Saint-Etienne-de Tine'e landslide using SAR interferometry, *Tectonophysics*, 265 (3-4), 1996, pp. 181-190, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195196000479>
- Ganas, A., Valkaniotis S., Tsirovi V., Karasante I., Elias P., Kapetanidis V., Kassaras I., Papanthassiou G. and Briole, P. (2021a). The March 2021 seismic sequence in Larisa - Damasi, Thessaly (central Greece), its seismotectonic characteristics and geodynamic effects. Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4617264>
- Ge Linlin., Hsing-Chung., Lijiong Qin., Ming-han Chen Chris Rizos 2003 DIFFERENTIAL RADAR INTERFEROMETRY FOR MINE SUBSIDENCE MONITORING, *Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003.* [https://fig.net/resources/proceedings/2003/santorini\\_comm6/C-INSAR/C7.PDF](https://fig.net/resources/proceedings/2003/santorini_comm6/C-INSAR/C7.PDF)
- Georgiev, I., Dimitrov, D. and Botev, E. (2013) *Crustal Motion Monitoring in Bulgaria and Surrounding Regions by Permanent GPS Array*. *Proceedings of 7th Congress of Balkan Geophysical Society, Tirana, Albania, 7-10 October 2013*, 5
- Georgieva G., L. Dimitrova, Gourev V., 2019 Ice generated events in Perunika Glacier, recorded by LIVV station, Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers, *Proceedings, 10th Congress of the Balkan Geophysical Society, Sep 2019, Volume 2019, p.1 – 5* DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902661>
- Georgieva G., Dragomirov D., Buchakchiev V., Gourev V., Tsankov L., 2021 *ACTIVITY OF GLACIER PERUNIKA, LIVINGSTON ISLAND, ANTARCTICA AS A RESULT OF CHANGING TEMPERATURE IN THE REGION*, In *Proceedings SGEM Research areas: Air Pollution and Climate Change, SGEM Book title: 21st International Multidisciplinary Scientific*
- Grandin R, Socquet A, Binet R, Klinger Y, Jacques E, de Chaballier JB, King G, Lasserre C, Tait S, Tapponnier P et al (2009) September 2005 manda hararo-dabbahu rifting event, afar (ethiopia): constraints provided by geodetic data. *J Geophys Res Solid Earth* 114(B8)
- Gray L (2011) Using multiple radarsat insar pairs to estimate a full three-dimensional solution for glacial ice movement. *Geophys Res Lett* 38(5)
- Gudmundsson S, Sigmundsson F, Carstensen JM (2002) Three-dimensional surface motion maps estimated from combined interferometric synthetic aperture radar and GPS data. *J Geophys Res Solid Earth* 107(B10):ETG-13
- Guo, C. et al., Study on the Creep-Sliding Mechanism of the Giant Xiongba Ancient Landslide Based on the SBAS-InSAR Method, Tibetan Plateau, China. *Remote Sens*. 2021, 13, 3365. [rs13173365](https://doi.org/10.3390/rs13173365)
- Gojkovi, Z., et al., (2023) Kilibarda, M. Brajovi, L. Marjanovi, M. Milutinovi, A. Gani, A. Ground Surface Subsidence Monitoring Using Sentinel-1 in the “Kostolac” Open Pit Coal Mine. *Remote Sens*. 2023, 15, 2519. <https://doi.org/10.3390/rs15102519>
- Haghshenas Haghighi, M., Motagh, M. (2017): Sentinel-1 InSAR over Germany: Large-Scale Interferometry, Atmospheric Effects, and Ground Deformation Mapping. - *ZfV: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Land management*, 2017, 4, 245-256
- Hancılar et al. (2023) Kahramanmaraş - Gaziantep Türkiye M7.7 Earthquake, 6 February 2023, Strong Ground Motion and Building Damage Estimations, Preliminary Report, <https://eqe.boun.edu.tr/en/update-6-february-2023-kahramanmaraş-gaziantep-türkiye-m77-earthquake-report>
- Hanssen, R. 2001. *Book Radar Interferometry, Data Interpretation and Error Analysis* DOI: 10.1007/0-306-47633-9, Publisher: Kluwer Academic Publishers ISBN: 978-0-7923-6945-5
- Hilley et al. Dynamics of low-moving landslides from permanent scatterer analysis, *Science*, 304, 2004,

- pp. 1952-1955 <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1098821>
- Hogg, A., A. Shepherd, N. Gourmelen (2015) A first look at the performance of Sentinel-1 over the West Antarctic Ice Sheet, FRINGE 2015, Frascati, Italy, 23-27 March 2015.
- Hu X., Combining InSAR and GPS to Determine Transient Movement and Thickness of a Seasonally Active Low-Gradient Translational Landslide Geophysical Research Letters, Volume 45, issue 316, 2018, pp. 1453-1462 <https://doi.org/10.1002/2017GL076623>
- Ilieva M. (2011) Crustal deformations of shallow earthquakes in the Eastern Mediterranean studied by radar interferometry and seismology, dissertation for the degree of Doctor, University Pierre and Marie Curie – Paris VI, France, Doctoral School “Geosciences and Natural Resources” (ED 398) and Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,
- Ilieva, M., Briole, P., Ganas, A., Dimitrov, D., Elias, P., Mouratidis, A., Charara, R. (2016), Fault plane modelling of the 2003 August 14 Lefkada Island (Greece) earthquake based on the analysis of ENVISAT SAR interferograms, Tectonophysics, doi: 10.1016/j.tecto.2016.10.021
- Ilieva M., Borkowski A., Rohm W., Polanin P., Gruchlik P., Kamil, and Kowalski A. (2019) Mine subsidence-cycle monitoring by use of Sentinel-1 data, Geophysical Research Abstracts Vol. 21, EGU2019-14120-1, 2019 EGU General Assembly 2019
- Ilieva M., Pawluszek-Filipiak K., Teodorczyk D, Wielgocka N, Balak P, (2024) EPOS-PL+ project-infrastructure for long-term InSAR monitoring of mining induced deformations in Southern Poland EGU24
- Ivanov L., (1996) Livingston Island: Central-Eastern Region. Топографска карта в мащаб 1:25000. Sofia: Antarctic Place-names Commission of Bulgaria, 1996
- Ivanov P., Nankin R., Zaalishvili V., (2020) Assessment of Landslide Susceptibility and Hazard along the Northern Bulgarian Black Sea Coast” Proceeding of 1st International Conference on Environmental Protection and Disaster RISks, E-ISBN-13: 978-619-7065-39-8 Print-ISBN- 13: 978-619-7065-38-1, pp: 392-404, 2020.
- Kääb, A., S.H. Winsvold, B. Altena, C. Nuth, T. Nagler and J. Wuite. 2016. Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part I: Radiometric and Geometric Performance, and Application to Ice Velocity. Remote Sensing, 8(7), 598, 2016
- Kalafat, D., Zulfikar A., Akcan, S. (2021) Seismicity of Turkey and Real-Time Seismology Applications in Determining Earthquake Hazard, Academic Platform Journal of Natural Hazards and Disaster Management 2(2), 96-111, 2021 DOI: 10.52114/apjhad.1039670
- Kenyeres A et al. Regional integration of long-term national dense GNSS network solutions. GPS Solutions, (2019) 23:122, <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0902-7>
- Kotzev, V., Nakov, R., Georgiev, Tz., Burchfiel, B.C., King, R.W., (2006). Crustal motion and strain accumulation in western Bulgaria. Tectonophysics 413, 127–145. doi:10.1016/j.tecto.2005.10.040.
- Kotzev, V., King, R.W., Burchfiel, B.C., Todosov, A., Nurce, B., and Nakov, R., (2008), Crustal motion and strain accumulation in the South Balkan region inferred from GPS measurements, in Husebye, E., ed., Earthquake monitoring and seismic hazard mitigation in Balkan countries: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries, Borovetz, Bulgaria, 11–18 September 2005: NATO Science Series IV: Earth and Environmental Sciences Volume 81, p. 19–43.
- Kuang J, Ge L, Metternicht GI, Ng AHM, Wang H, Zare M, Kamranzad F (2019) Coseismic deformation and source model of the 12 November 2017 MW 7.3 Kermanshah Earthquake (Iran-Iraq border) investigated through DInSAR measurements. Int J Remote Sens 40(2):532–554
- Lanari R., et al. A Small-Baseline Approach for Investigating Deformations on Full-Resolution Differential SAR Interferograms, IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 42, no. 7, July 2004
- Larsen Y. et al., European Ground Motion Service: Service Implementation Plan and Product Specification Document, Report to CLMS, ver. 1.01 (Jan 2020)
- Lekkas, E., Carydis, P., Vassilakis, E., Mavroulis, S., Argyropoulos, I., et al (2023). The 6 February 6 2023 Turkey-Syria Earthquakes Newsletter of Environmental, Disaster and Crises Management Strategies, 29, ISSN 2653-9454, DOI: 10.13140/RG.2.2.17643.82726
- Lemos, A., Shepherd, A., McMillan, M., Hogg, A.E., Hatton, E., and Joughin, I. 2018 Ice velocity of Jakobshavn Isbrae, Petermann Glacier, Nioghalvfjærdsfjorden, and Zachariae Isstrom, 2015-2017, from Sentinel 1-a/b SAR imagery, The Cryosphere, 12, 2087-2097, <https://doi.org/10.5194/tc-12-2087-2018>.
- Li, B. et al. Monitoring and analysis of Woda landslide stability (China) combined with InSAR, GNSS and meteorological data, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-101>, 2021.
- Liao, M.; Balz, T.; Zhang, L.; Pei, Y.; Jiang, H. Analyzing TerraSAR-X and COSMO-SkyMed High-103

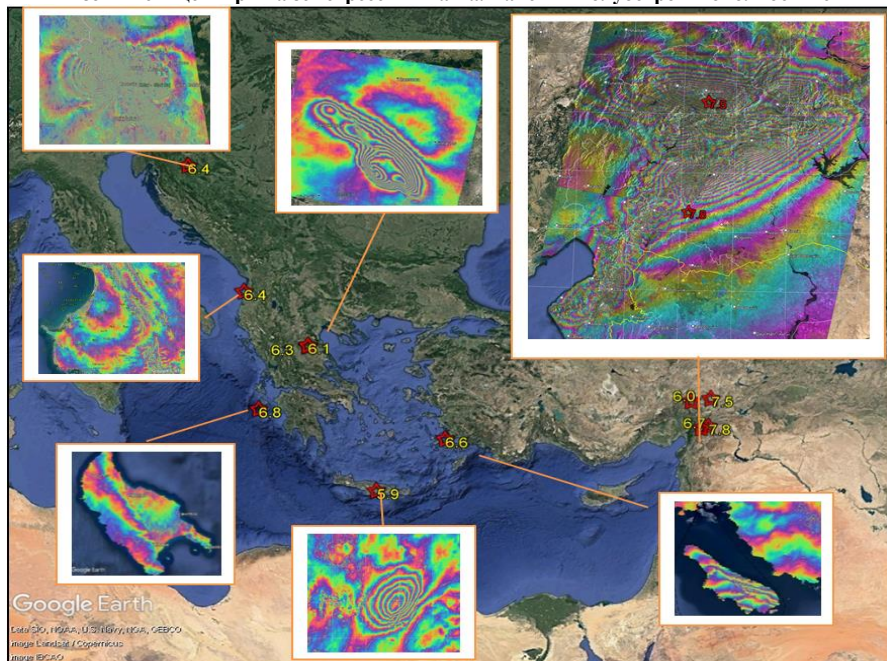


- Resolution SAR Data of Urban Areas. Proceedings of the ISPRS Workshop on HR Earth Imaging for Geospatial Information, 2009
- Loverly B., Chlieh M., Norabuena E., Villegas-Lanza J. C., Radiguet M., Cotte N., Tsapong-Tsague A., Quiroz W., Sierra Farfán C., Simons M., Nocquet J. M., Tavera H., Socquet A. (2024) Heterogeneous Locking and Earthquake Potential on the South Peru Megathrust From Dense GNSS Network Volume129, Issue2 February 2024 e2023JB02711430, January 2024 <https://doi.org/10.1029/2023JB027114>
- Lu P, Catani F, Tofani V, Casagli N (2014) Quantitative hazard and risk assessment for slow-moving landslides from Persistent Scatterer Interferometry. *Landslides* 11(4):685–696
- Lukosz M., R. Hejmanowski, W. T. Witkowski 2022 ANALYSIS OF THE VELOCITY CHANGES OF THE JAKOBHAVN GLACIER BASED ON SAR IMAGERY, 2022 <https://doi.org/10.2478/quageo-2022-0007> ISSN 2082-2103, eISSN 2081-6383
- Markušić, S., Herak, M. (1998). Seismic Zoning of Croatia. *Natural Hazards* 18, 269–285. DOI:10.1023/A:1026484815539
- Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C. et al. (1993) The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry *Nature* 364, pp. 138–142. doi: <https://doi.org/10.1038/364138a0>
- Matova M. (2006). About seismotectonic activity of Bulgaria. In: *Reports on Geodesy*.
- Matev, K. (2011) GPS constrains on current tectonics of southwest Bulgaria, northern Greece, and Albania. Thesis, Doctor of university of Grenoble, 203
- Mazzanti P, Rocca A, Bozzano F, Cossu R, Floris M (2011) Landslides forecasting analysis by displacement time series derived from satellite InSAR data: preliminary results. *Small* 5000:50
- Mihaljević, I.; Zlatović, S. Embankments Damaged in the Magnitude Mw 6.4 Petrinja Earthquake and Remediation. *Geosciences* 2023, 13, 48. <https://doi.org/10.3390/geosciences13020048>
- Milev G., G.Valev., M. Minchev, (1994) Nationale Report of Bulgaria. Report on the Symp. of the IAG Subcommission for the European Reference Frame (EUREF) held in Helsinki 3-6 May, 256-263
- Milev, G. and Dabovskii, C. (2006) Geodynamics of the Balkan Peninsula, Monograph, Reports on Geodesy. Warsaw University of Technology, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy, 647
- Minchev, D., Aleksanyan, G., Ilieva, M. (2010). Landslide Phenomena In Sevan National Park - Armenia. Proc. "ESA Living Planet Symposium 2010", 28 June - 2 July, Bergen, Norway, ISSN: 1609-042X, ISBN: 978-92-9221-250-6, CD-ROM
- Mora, O., et al. A new algorithm for monitoring localized deformation phenomena based on small baseline differential SAR interferograms, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2002, 2, pp. 1237-1239.
- Moretto, S.; Bozzano, F.; Mazzanti, P. The Role of Satellite InSAR for Landslide Forecasting: Limitations and Openings. *Remote Sens.* 2021, 13, 3735. <https://doi.org/10.3390/rs13183735>
- Muja Robert, Vasile Gabriel -Supervisor, Multidimensional Very High Resolution SAR Signal Processing for Monitoring Energetic Structures, DIPLOMA PROJECT, May 2012, DOI: 10.13140/RG.2.2.31742.18244
- Nankin, R., P. Ivanov. (2019). Current state of landslides affecting the Northern Black Sea coast of Bulgaria. *Journal of the Bulgarian Geological Society*, 80, 3, 176–178. ISSN: 0007-3938, January 2020
- Nankin R., Pl. Ivanov, M. Krastanov (2020). Thracian Cliffs landslide, Northern Bulgarian Black Sea Coast. *Review of the Bulgarian Geological Society*, vol. 81, part 3, 2020, p. 215–217
- Nalbant, S. S., J. McCloskey, S. Steacy, and A. A. Barka (2002), Stress accumulation and increased seismic risk in eastern Turkey, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 195, 291–298, doi:10.1016/S0012-821X(01)00592-1.
- Necula, N. et al. Assessing Urban Landslide Dynamics through Multi-Temporal InSAR Techniques and Slope Numerical Modeling. *Remote Sens.* 2021, 13, 3862. <https://doi.org/10.3390/rs13193862>
- Nikolov I., (2016) Determination structural elements of landslides on the base of GNSS measurements, PhD Thesis, UACG, Sofia (in Bulgarian)
- Nikolov V., (2016) The prehistoric salt-production and urban center of Provadia-Solnitsata, Northeastern Bulgaria, *Méditerranée*, 126|2016, 71-78.
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.* 75(4), pp 1135–1154. doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135>
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82 (2), pp. 1018–1040. doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018>
- Osmanoglu B., F. J. Navarro, R. Hock, M. Braun, M. I. 2014 Coarcera Surface velocity and mass balance of Livingston Island ice cap, Antarctica, *The Cryosphere*, 8, 1807–1823, 2014 [www.the-cryosphere.net/8/1807/2014/](http://www.the-cryosphere.net/8/1807/2014/)doi:10.5194/tc-8-1807-2014
- Over, S., S. Ozden, and H. Yilmaz (2004), Late Cenozoic stress evolution along the Karasu Valley, SE

- Turkey, *Tectonophysics*, 380, 43–68, doi:10.1016/j.tecto.2003.11.011.
- Paul, F., Rastner, Ph., Azzoni, R., Diolaiuti, G., Fugazza, D., Bris, R., Nemeč, J., Rabatel, A., Ramusovic, M., Schwaizer, G., Smiraglia, C. (2020). Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2. *Earth System Science Data*. 12. 1805-1821. 10.5194/essd-12-1805-2020, 2020
- Radnić, J., Grgić, N., Buzov, A., Banović, I., Smilović Zulim, M., Baloević, G., Sunara, M.: Mw 6.4 Petrinja earthquake in Croatia: Main earthquake parameters, impact on buildings and recommendation for their structural strengthening, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 11, pp. 1109-1128, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3243.2021>
- Radulov, A.; Yaneva, M.; Shanov, S.; Kostov, K.; Nikolov, V.; Nikolov, N. Coseismic geological effects related to the 22 May 2012 Pernik earthquake, Western Bulgaria. In *Proceedings of the National Conference Geosciences 2012*, Sofia, Bulgaria, 13–14 December 2012; pp. 121–122.
- Raykova Plamena, Stela Simeonova, Dimcho Solakov, Irena Aleksandrova.(2022) Destructive earthquakes occurred in Bulgaria at the beginning of the 20th century. *Proceedings of the Third European Conference on Earthquake Engineering and Seismology – 3ECEES*, editors: Cristian Arion, Alexandra Scupin, Alexandru Țigănescu. - București : Conspress, 2022, 2022, ISBN:978-973-100-533-1, 4456-4463
- Reilinger, R.E.; Royden, L.; King, R.; Burchfiel, C. Bulgaria 1997—The GAGE Facility Operated by UNAVCO, Inc., GPS/GNSS Observations Dataset. 1997. Available online: <https://doi.org/10.7283/T5JW8C5K> (accessed on 18 January 2022).
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S. et al. 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5), doi:10.1029/2005JB004051.
- Reilinger, R., McClusky, S., Paradissis, D., Ergintav, S. and Vernant, Ph. (2010) Geodetic constraints on the tectonic evolution of the Aegean region and strain accumulation along the Hellenic subduction zone. *Tectonophysics*, 488, 22-30.
- Reitman N, et al., (2023) Preliminary fault rupture mapping of the 2023 M7.8 and M7.5 Türkiye Earthquakes. DOI: <https://doi.org/10.5066/P985I7U2>
- Rott H, Nagler T (2006) The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Adv Space Res* 37(4):710–719
- Rott H, Nagler T, Rocca F, Prati C, Mazzotti A, Keusen H, Liener S, Tarchi D (2002) InSAR techniques and applications for monitoring landslides and subsidence. In: *Proceedings of the 22nd EARSeL Symposium on Geoinformation for Europeanwide integration*, Prague, pp 25–31
- Şengör, A. M. C., O. Tüysüz, C. İmren, M. Sakiç, E. Eyodoğan, et al. (2005), The North Anatolian Fault: A new look, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, 37–112, doi:10.1146/annurev.earth.32.101802.120415.
- Simeonova, S. D., Solakov, D. E., Leydecker, G., Busche, H., Schmitt, T., Kaiser, D. (2006) Probabilistic seismic hazard map for Bulgaria as a basis for a new building code. *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 6, 6, 881-887
- Solakov, D., Simeonova, S., Dimitrova, L., Slavcheva, K., Raykova, Pl., Popova, M., Georgiev, I.(2015) Local Network Deployed Around the Kozloduy NPP - a Useful Tool for Seismological Monitoring. *Geophysical Research Abstract*, 17, 2015
- Solakov D., S.Simeonova, P. Raykova, I. Aleksandrova, M. Popova, V. Protopopova. Seismological analysis of the 2012 Mw5.6 earthquake in Sofia seismic zone. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 69, 2016, 67-74
- Solari, L., Barra, A., Herrera, G., Bianchini S., Monserrat, O., Béjar-Pizarro, M., Crosetto, M., Sarroo, R., Moretti S., (2017): Fast detection of ground motions on vulnerable elements using Sentinel-1 InSAR data, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, DOI: 10.1080/19475705.2017.1413013
- Soldato M. D., Confuorto ., Bianchini S., Sbarra P., Casagli N., (2021) Review of Works Combining GNSS and InSAR in Europe, *Remote Sens.* 2021, 13(9), 1684; DOI: 10.3390/rs13091684, <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/9/1684>
- Sokerova, D., S. Simeonova, S. Nikolova, D. Solakov, E. Botev, R. Glavcheva, S. Dineva, B. Babachkova, S. Velichkova, S. Maslinkova, K. Donkova, S. Rizikova, M. Arsovski, M. Matova, I. Vaptzarov, L. Filipov (1992) Geomorphology, neotectonic, seismicity and seismotectonic of NPP Kozloduy, Final Report (Summary) on IAEA Mission: Design basis earthquake for seismic upgrading of NPP Kozloduy, Sofia, pp 200
- Spasova, T. (2019) - Monitoring of short-lived snow coverage by SAR data around Livingston Island, South. Shetland Islands in Antarctica . Conf. processing - *Adaptation Futures 2018* pp 170-173 <https://adaptationfutures2018.capetown › 2019/01PDF>

- Spata A, Guglielmino F, Nunnari G, Puglisi G (2009) Sistem: a new approach to obtain three-dimensional displacement maps by integrating gps and dinsar data. In Proceedings of the FringeWorkshop, Frascati, Italy, vol 30, Citeseer
- Spreckels V, Status of the new German DIN standards project "InSAR – radarinterferometry for the detection of ground movements", 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM) 2022
- Terrasigna PSTool—An Open Platform for Ground Monitoring Information. Available online: <http://pstool.terrasigna.com/> (last accessed July 2022)
- Trifonova, P., Miloshev, N., Dimitrova, L., Metodiev, M., Jordanova, D., & Ishlyanski, D. (2023). Earth Observation Capacity of the National Geoinformation Center of Bulgaria as Part of the Tools for Geo- and Anthropogenic-Hazard Management in EPOS. *IDRiM Journal* SSN: 2185-8322, 13(1), 150–171. <https://doi.org/10.5595/001c.91239>
- Tofani V, Segoni S, Agostini A, Catani F, Casagli N (2013) Use of remote sensing for landslide studies in Europe. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13(2):299–309
- Valev, G., and Kastreva, P., (2014). Application of the statistical methods in study of the deformation of the ground surface. *Sc Journal: Micro Macro & Mezzo Geo Information (MMM-G) Nr/No 2* pp 6 - 19
- Valev, G., Rainov, G., and Vassileva, K., (2015). Geodetic measurements and study of the Mirovo salt deposit, 7th BgGS National conference with international participation "GEOPHYSICS 2015", Valev, G., Rainov, G., Vassileva, K. (2016) Geodetic measurements in the area of Kozloduy Nuclear Power Plant. *Coordinates*, XII, 8, Thomson Press, pp. 37-40
- Vassileva, M. Becker (2006). GPS velocity field of the Balkan Peninsula, Balkan Peninsula monograph, Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, No 5(80), 2006, 549-564 ISBN: 83-85287-79-5
- Vassileva, K. and Atanasova, M. (2014) Study of transition boundaries in Bulgaria from GPS. International symposium on modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields, Sofia, 06-07 November 2014
- Wasowski J., Bovenga F., Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives, *Engineering Geology*, Volume 174, 2014, pp. 103-138, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.003>.
- Wright, T., Parsons, B., Zhong Lu (2004) Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 31, L01607, doi:10.1029/2003GL018827, 2004
- Wang H., et al. InSAR reveals coastal subsidence in the Pearl River Delta, China, *Geophys. J. Int.* (2012) 191, 1119–1128 doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05687.x
- Yamaguchi M , Yastika P E, Shimizu N, Milev N, Vrkljan I (2021) Application of SBAS-DInSAR to monitoring landslides along the northern Black Sea coast in Bulgaria Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 833, Mechanics and Rock Engineering, from Theory to Practice 20-25 September 2021, Turin, Italy IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 833 (2021) 012151 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/833/1/012151, 2021 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/833/1/012151>
- Yosifov, D.; Paskaleva, I.; Botev, E.; Rangelov, B. The Seismic Risk for Sofia; NTS MDGM: Sofia, Bulgaria, 2018; 207p. (In Bulgarian)
- Zagorchev, I. (2011) Cenozoic Block Rotations in the Balkan Peninsula. Proceedings of 3rd international Symposium of the Black Sea region, 1-10 October 2011, Bucharest, Romania, 220-222
- Годишен отчет на Геозащита ООД, Available online: [https://www.mrrb.bg/static/media/ups/articles/attachments/GO\\_%2020208f96c6989872d7c224855352c05185f4.pdf](https://www.mrrb.bg/static/media/ups/articles/attachments/GO_%2020208f96c6989872d7c224855352c05185f4.pdf), (accessed on 06.12.2021)
- InSAR product by ASF DAAC HyP3 2023, (contains modified Copernicus Sentinel data 2023, processed by ESA). <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/271/Earthquake-sequence-in-Turkey-February-6th-2023> [esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Satellites\\_support\\_impact\\_assessment\\_after\\_Tuerkiye\\_Syria\\_earthquakes](https://esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Satellites_support_impact_assessment_after_Tuerkiye_Syria_earthquakes) <https://comet.nerc.ac.uk/turkiye-syria-earthquakes-february-2023/>
- Coastal Zones [Online] 2018 Available at: <https://land.copernicus.eu/local/coastal-zones>. Slope Angle ancillary map of ELSUS v2 [Online] 2018 Available at: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/european-landslide-susceptibility-map-elsus-v2>.
- The European Database of Seismogenic Faults [Online] 2013. Available at: <http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/>
- <https://scihub.copernicus.eu/>
- <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

**Интерферометрични изображения, формиращи от възходящи орбити  
7 зони - епицентъри на земетресения на Балканския полуостров и околностите**



**Косеизмични премествания, формиращи за  
7 зони- епицентъри на земетресения на Балканския полуостров и околностите**

