



DOI: [10.71167/uaceg.2025.58S101](https://doi.org/10.71167/uaceg.2025.58S101)

Получена: 22.07.2025 г.

Приета: 06.08.2025 г.

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ДЕФОРМАЦИИТЕ НА ЗЕМНАТА КОРА В РАЙОНА НА ЧЕЛОПЕЧ ЧРЕЗ SAR ДАННИ

Св. Филипова¹, М. Атанасова-Златарева²

Ключови думи: Sentinel 1-A, подземни минни дейности, SNAP, DinSAR

РЕЗЮМЕ

В настоящото изследване се търси връзката между подземните минни дейности и настъпилите деформации на земната повърхност в района на Челопеч. За постигане на поставената задача са използвани сателитни изображения от мисията Sentinel 1-A. Районът представлява интерес за такъв вид изследване, защото активната минна дейност е довела до отделни големи потъвания на повърхността, които на практика се следят веднъж годишно чрез класически геодезически измервания. В тази работа се разглеждат не само регистрираните локални слягания, а и цялата площ над мината, защото SAR данните (или данните от радар със синтезирана апертура) са подходящи за такъв тип изследвания, доказали се през последните години в световната практика. Въпреки планинския характер на терена, гористата местност и факта, че сателитните данни са с ниска разделителна точност, се стига до извода, че има потъвания на земната кора в целия район. За тази цел са използвани 32 изображения, от които 21 принадлежат на възходящата сателитна орбита, а останалите 11 – на низходящата сателитна орбита, за периода от септември 2024 до декември 2024. Изображенията са обработени със софтуера със свободен достъп SNAP за получаване на интерферограми и карти на преместванията. Използван е DinSAR (диференциална интерферометрия за обработка на SAR данни) методът, като основно са създадени времеви серии от интерферограми за периода от три месеца, и е приложен MT-InSAR (Multi-Temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar) подход. Резултатите от този тип изследване са сравнени с данни от европейската услуга за наземни движения (EGMS), при които също са регистрирани

¹ Светла Филипова, инж., деп. „Геодезия“, НИГГГ-БАН, ул. „Г. Бончев“, бл. 3,
e-mail: filipova_s@mail.bg

² Мила Атанасова-Златарева, проф., дн инж., деп. „Геодезия“, НИГГГ-БАН, ул. „Г. Бончев“, бл. 3,
e-mail: mila_at_zl@abv.bg

потъвания на земната кора в изследвания район. Данните от европейската услуга за наземни движения също са базирани на интерферометрични сателитни радарни изображения от мисията Sentinel 1-A, но за сравнително по-дълъг период – от януари 2019 до декември 2023.

1. Въведение

Активната подземна минна дейност в района на Челопеч е довела до локални деформации на земната кора. Тези локални деформации се наблюдават веднъж годишно чрез класически геодезически наземни техники. Класическите геодезически начини за измерване на терена предоставят висока точност на наблюдаваните потъвания, но от друга страна отнемат много време и са зависими от метеорологичните условия. Затова, с навлизането на дистанционните методи в практиката, все повече изследвания се обработват на базата на данни, получени от радар със синтезирана апертура. Изображенията, регистрирани по този метод, имат широк обхват и не зависят от метеорологичните условия, но за сметка на това точността не е висока. InSAR методът, базиран на Sentinel-1A, е евтин метод за широко обхватно наблюдение на земната повърхност, който осигурява наблюдения, независими от облачната покривка. В настоящото изследване точността на крайните резултати е удовлетворяваща.

Подобни проучвания на земната повърхност са извършвани в Сърбия в района на откритата мина „Костолац“ [1]. Основна цел в научната разработка е да се анализират и пресметнат сляганята, причинени от рудник „Костолац“, които са в съседство с откритата мина. В Китай също е проведено изследване на деформациите на земната повърхност в минни участъци чрез InSAR технология [2]. Извършено е проучване на връзката между подземните минни дейности и промените в запаса на подпочвените води по време и след експлоатацията на мината. В Полша е реализиран проект [3], чиято основна задача е да създаде методология за наблюдение, моделиране и прогнозиране на деформациите на терена, свързани с обширните подземни минни дейности, извършващи се в района на Горносилезийския въглищен басейн.

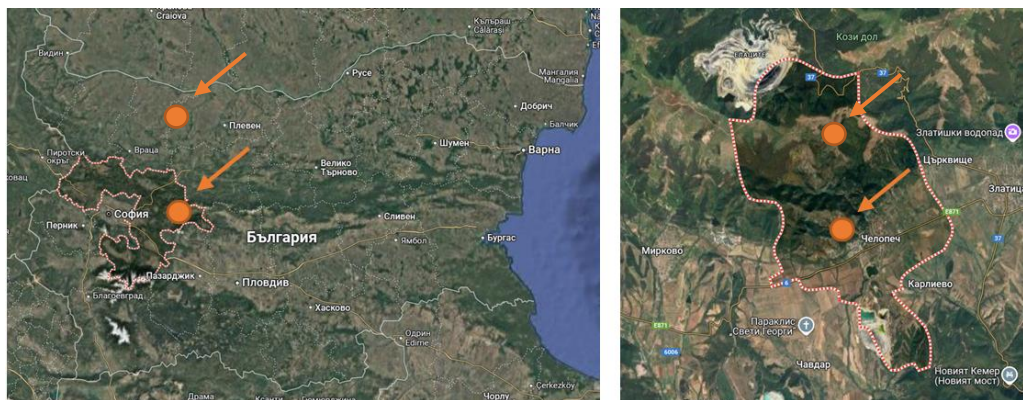
Основна цел в текущото изследване е да се определят не само локалните сляганя, причинени от подземната минна дейност, а да се изследва цялата площ над мината. Получените резултати, които са карти на преместванията, ще бъдат съпоставени с резултати от EGMS и по този начин ще бъде извършена и проверка за верността на данните.

2. Географски характеристики на изследвания район

2.1. Местоположение

Община Челопеч се намира в Западна България и е разположена в южните склонове на Стара планина (Златишко-Пирдопската котловина) на обща площ от 44 390 km². Общината се намира в източната част на Софийска област (изображението вляво на фиг. 1). Община Челопеч е не само най-малката община в Софийска област, но и най-малката община по площ в България. Тя е и една от 9-те български общини и се състои само от едно населено място. В съседство са общините Златица, Чавдар, Мирково и Етрополе [4].

Изследваната зона на интерес попада в централната част на община Челопеч, северозападно от населеното място (дясното изображение на фиг. 1).



Фиг. 1. Местоположение на Община Челопеч (вляво) и местоположение на изследваната зона (вдясно). Източник: Google Maps

2.2. Релеф

Релефът на общината е равнинен и средно планински, като територията ѝ попада в пределите на Западна Стара планина и Златишко-Пирдопската котловина. Около 2/3 от територията на община Челопеч се заема от южните склонове на Етрополска планина (съставна планина на Западна Стара планина). В нея, на границата с община Етрополе се издига най-високата точка на община Челопеч – връх Челопешка Баба с височина от 1721,6 m. На границата с община Чавдар, в коритото на река Тополница, се намира най-ниската точка на общината, която е на 534 m надморска височина [5].

Релефът на зоната на интерес има планински характер, с преобладаваща иглолистна растителност. Поради тази причина използването на класически геодезически методи (напр. ГНСС) за подобни изследвания представляват трудност при извършване на полски измервания. Това налага изследването на такъв тип територии да се улесни чрез използването на сателитни данни.

2.3. Води

В най-южната част на общината, по границата с община Чавдар, на протежение от 1,5 km протича част от горното течение на река Тополница. От Етрополска планина на юг към Златишко-Пирдопската котловина се спускат малки и къси реки и дерета, най-голяма от които е река Воздол (десен приток на Тополница), която преминава и през село Челопеч [5].

Една от зоните, които се следят веднъж годишно, се намира по протежението на река Воздол.

2.4. Геология

Челопеч е едно от най-големите медно-златни находища в Европа. Включва няколко изявиени рудни тела, вместени във вулканогенно-седиментен комплекс от

андезити до дацити, който обхваща северната и североизточната страна на разлома с ориентация изток – запад. Вместващите скали на свой ред са част от вулканогенно-седиментния ансамбъл на горната креда, съхранен в гребена с посока север – североизток. Фундаментът на юг и изток от Челопеч включва докамбрийски гранитогнайси, двуслюдени шисти, кварцити и амфиболити. Челопешката руда включва следните основни рудни минерали: пирит, тенантит, енаргит, лузонит, халкопирит, злато и борнит. От нерудните минерали преобладават: кварц, барит, серицит и каолинит. Второстепенни от рудните минерали са: фаматинит, сфалерит, галенит, а от нерудните – хлорит, анкерит и гипс. Челопешкото находище се характеризира с изключително сложен геоложки строеж, като досега са идентифицирани около 71 минерални вида [5].

Поради богатата геоложка характеристика на района е разработен подземен рудник, който достига до 30 m надморска височина в най-ниската си точка. Това от своя страна оказва влияние на земната повърхност над рудника. Вследствие на активната минна дейност са установени големи слягания на земната кора, което налага и провеждането на текущото изследване.

3. Метод и данни

3.1. Общи сведения за Sentinel-1A

Данните, използвани в изследването, са регистрирани от мисията Sentinel 1-A. Конкретно този радарно измервателен комплекс (РИК) е радар със синтезирана апертура, който формира изображения и използва дължина на вълната в С-обхват (5,405 GHz). С-обхватът е основна лента за РСА и намира широко приложение във фотограметрията и картографията като се използва предимно при глобалното картографиране, в морската геодезия, при откриване на промени (свлачища и деформации на земната повърхност). Sentinel 1-A позволява работа в четири режима на поляризация – HH (хоризонтална поляризация при предаване и приемане на електромагнитния сигнал), VV (вертикално предаване и приемане на EM сигнала), HV (хоризонтално предаване и вертикално приемане на сигнала) и VH (вертикално предаване и хоризонтално приемане), което води до подбор на SAR данни, ориентирани към решаване на конкретни задачи от практиката.

Получаването на данни от РСА на Sentinel 1-A се извършва в четири режима на работа:

- 1) режим на лентова регистрация (Stripmap – SM);
- 2) интерферометричен режим в широка полоса (Interferometric Wide – IW);
- 3) режим с много широка полоса (Extra Wide – EW);
- 4) вълнов или „скачащ“ режим (Wave – WV).

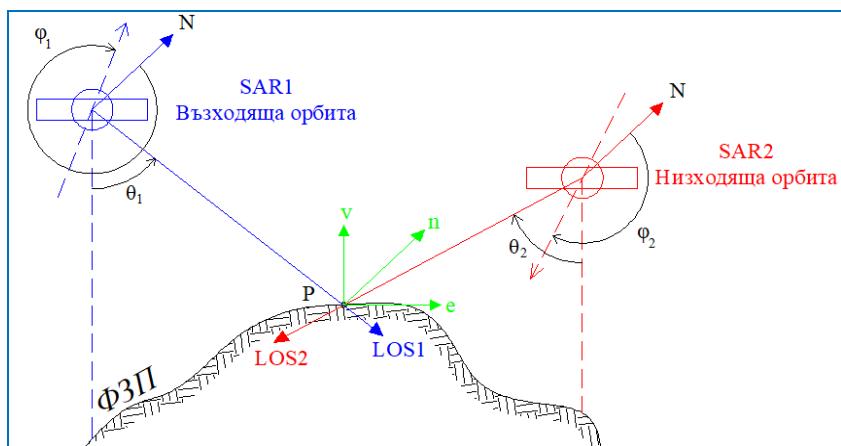
В случая е избран вторият режим, а именно интерферометричен режим в широка полоса; той е и основен режим на работа на S-1. Параметрите на IW-режима са:

- а) ширина на полосата – 250 km;
- б) ъгъл на падане – 29° – 46°;
- в) пространствена разделителна способност по азимут/обхват – 5×20 m;
- г) поляризации – HH+HV, VV+VH, HH, VV, като в настоящето изследване е избран режим на поляризация – VV.

Интерферометричният режим в широка полоса IW удовлетворява текущите изисквания за получаване на данни от РСА за оперативните мониторингови услуги по

програма „Коперник“ (напр. EGMS-European Ground Motion Service) [6], с които ще бъдат сравнени получените резултати от проведеното изследване.

Регистрацията на SAR данните от радарен измервателен комплекс S-1 се извършва при два вида орбити на сателита – възходяща с посока юг-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 φ по земния терен между посока север N и проекцията на орбитата върху терена (означена с пунктирна линия на фигура 2), независимо от вида на орбитата. Както се вижда от същата фигура, този ъгъл е близо до 360° за възходящите орбити и до 180° за низходящите, което води до невъзможност да се регистрират движения по земната повърхност в посока юг-север [7]. Фактът, че орбитите са слънчево синхронни, осигурява преминаването над едни и същи площи от земната повърхност приблизително по едно и също време на денонощието.



Фиг. 2. Геометрия при регистрация на РСА данни от РИК S-1 (адаптирано изображение от <https://www.mdpi.com/2072-4292/7/8/9542>)

3.2. Данни от Sentinel-1A

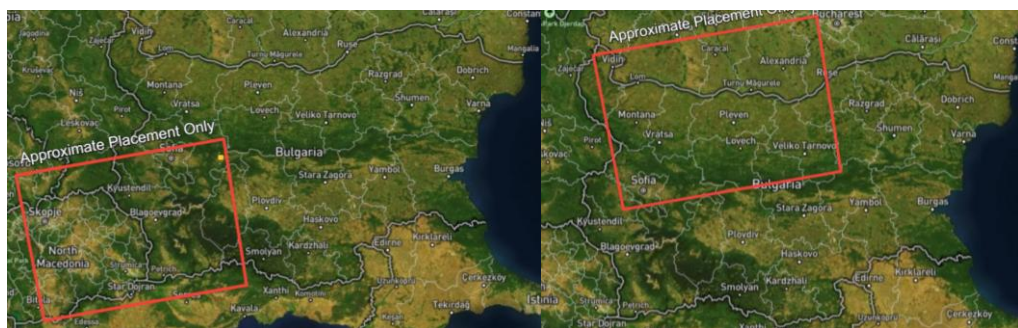
За целта на разработката са използвани 32 изображения, от които 21 принадлежат на две възходящи сателитни орбити, а останалите 11 – на една низходяща сателитна орбита, за периода от септември 2024 до декември 2024. Изображенията са заснемани с повторемост през 12 дни и са изтеглени от хранилището на NASA за сателитни изображения (<https://search.asf.alaska.edu/>). Регистрираните данни са от ниво L-1 SLC (Single Look Complex), което означава, че се запазва информацията за фазата и се обработва при разстояние между пикселите от изображението, равно на това при регистрацията. 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 регистрация на деформации по земната повърхност от типа на слягания на терена или премествания в хоризонталната равнина [6].

Изображенията от възходящата сателитна орбита (11 бр.) са от траектория 102 и номер на изображение 133 и с траектория 29 и номер на изображение 138 за останалите 10 изображения. Използваните данни от низходяща сателитна орбита са с траектория 7 и номер на изображение 448.

В табл. 1 са представени използваните входни изображения. На фиг. 2а) и 2б) са показани зоните на покритие съответно на възходящите и низходящата сателитна орбита.

Таблица 1. Набор от данни от Sentinel 1-A

Орбита	Първо/последно изображение	Path (траектория)	Frame (рамка)	Подсцена/ивица	Брой изображения
Възходяща	01.09.2024 – 30.12.2024	102	133	IW3-9	11
Възходяща	08.09.2024 – 25.12.2024	29	138	IW1-1	10
Низходяща	07.09.2024 – 05.01.2025	7	448	IW2-9	11



Фиг. 2а). Изображения, принадлежащи на възходящата сателитна орбита.

Източник: <https://search.asf.alaska.edu/>



Фиг. 2б). Изображения, принадлежащи на низходящата сателитна орбита.

Източник: <https://search.asf.alaska.edu/>

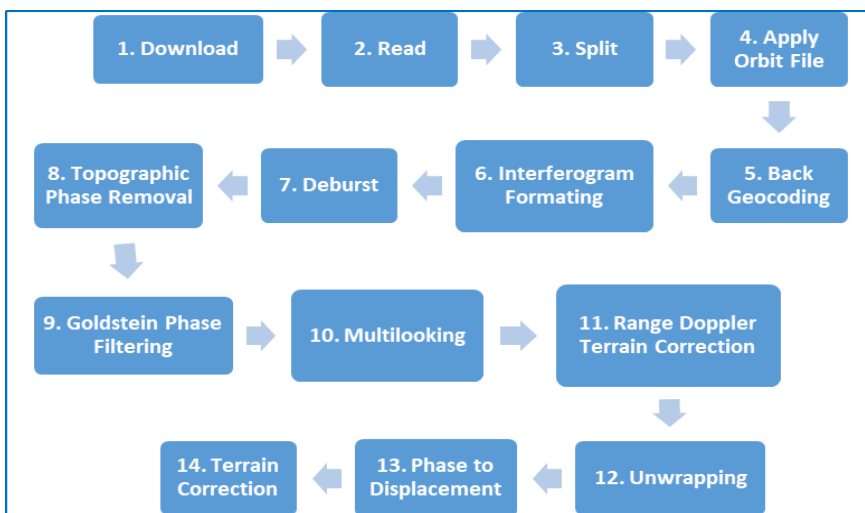
3.3. Обработка по метода DinSAR

Входните данни са обработени, след като е приложен методът на диференциалната радарна интерферометрия. В случай на диференциална интерферометрия (DInSAR) се отчита влиянието на релефа във фазовия сигнал, което се елиминира с помощта на външен цифров модел на релефа (ЦМР). Използваният цифров

модел на релефа е по данни от мисията за радарна топография (Shuttle Radar Topography Mission) с резолюция една дъгова секунда. След тази стъпка останалите промени в интерферограмата могат да се отдадат на настъпили промени по земната повърхност, които са отчетени между двете дати на регистриране на изображенията [6]. На фиг. 3 е представена блок-схема на процеса на обработка на интерферометрични изображения по метода DInSAR конкретно за разглежданото изследване. Обработени са 20 двойки изображения от възходящата сателитна орбита и 10 двойки изображения от низходящата сателитна орбита, след като са извършени следните стъпки:

- 1) изтегляне на изображенията;
- 2) зареждане на изображенията в SNAP;
- 3) избор на слотове и ивици;
- 4) прилагане на прецизни орбитални файлове;
- 5) корегистрация на двата продукта посредством цифров модел на релефа;
- 6) генериране на интерферограма с оценка на кохерентността;
- 7) премахване на границите между отделните ивици;
- 8) премахване на топографската фаза;
- 9) интерферометрично фазово филтриране;
- 10) допълнителна филтрация за намаляване на шума и формиране на квадратен пиксел;
- 11) разгъване на фазата;
- 12) преобразуване на разгънатите фази в премествания по визирната линия на радара;
- 13) теренно геокодиране на SAR данни към избрана картна проекция.

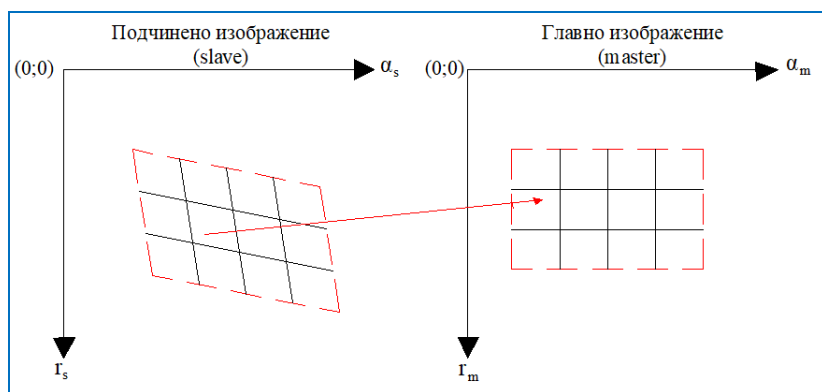
Методологията, която е приложена в текущата разработка, е сателитната мултitemпорална интерферометрия (MT-InSAR). Тя е усъвършенствана мултitemпорална сателитна радарна интерферометрична техника, която се използва за наблюдение на деформациите по земната повърхност. Този подход може да наблюдава данните на един пиксел от интерферометричното изображение за дълъг период от време. В случая данните се наблюдават в период от три месеца през 12 дни. По този начин може да се открият разлики в информацията, която носи един и същ пиксел, и да се стигне до извода, че има хоризонтални и/или вертикални премествания в изследвания район.



Фиг. 3. Блок-схема на процеса на обработка на изображенията по метода DInSAR

3.4. Съвместна обработка на SLC данни по DinSAR

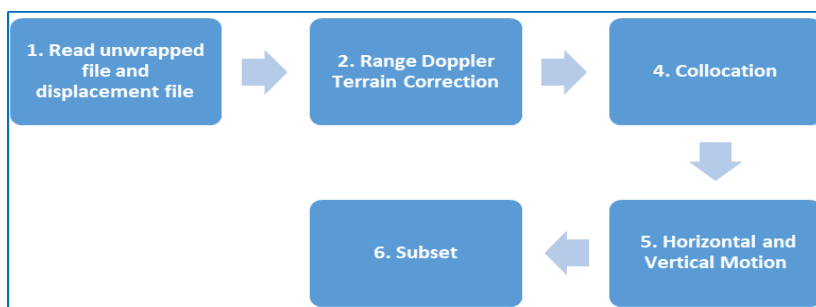
Настоящото изследване има за цел да определи вертикалните деформации в зоната на интерес. За тази цел е направена съвместна обработка на изображенията от РСА. Стъпката на съвместна регистрация е фундаментална при генерирането на интерферограма, тъй като гарантира, че всяка наземна цел допринася за един и същ пиксел по обхват и азимут както в главното, така и в подчиненото изображение (фиг. 4). На фиг. 4 с α е отбелязан азимутът, а с r – обхватът. Реализирани са две 1-D изкривявания. Разтягането на обхвата и завъртането по азимут са много малки по стойност – няколко пиксела върху целия кадър [8].



Фиг. 4. Модел на деформация за регистриране на подчинено изображение върху референтната система на главното изображение. Адаптирано изображение от https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptB.pdf

За да се изчислят хоризонталните и вертикалните премествания, в изследваната зона е направена съвместна обработка между две двойки изображения от две сателитни орбити (фиг. 5). Извършени са следните стъпки:

- 1) разчитане на разгънатите фази и преобразуваните разгънати фази в премествания по визирната линия на радара;
- 2) геокодиране-теренна корекция на двата входни файла;
- 3) колокация на главното и подчиненото изображение;
- 4) изчисляване на хоризонталните и вертикалните премествания;
- 5) създаване на карта на вертикалните премествания за изследваната зона.



Фиг. 5. Блок-схема за съвместна обработка на изображенията от двете сателитни орбити и изчисляване на хоризонталните и вертикалните премествания в изследваната зона

Тъй като при набирането на данните за обработката са установени две възходящи орбити и една низходяща, чиито изображения покриват зоната на интерес, е направена съвместна обработка на изображенията в три варианта. В първия случай са обработени заедно разгънатите фази на двойка изображения от възходяща орбита с траектория 102 и номер на изображението 133 с разгънатите фази на двойка изображения от низходяща орбита с траектория 7 и номер на изображението 448. За главно изображение (master) се избира изображението с по-ранна дата на заснемане, или в първия случай това са изображенията от възходящата сателитна орбита. Във втория случай на съвместна обработка за главни изображения са избрани разгънатите фази на двойка изображения от възходящата орбита с траектория 29 и номер на изображението 138, а подчинените изображения са на базата на разгънатите фази от същата низходяща орбита като в първия вариант (траектория 7 и номер на изображението 448). При третия вариант на изчисление са използвани орбитите от първия вариант, само че за главно изображение е избрано изображението от низходящата орбита, а за подчинено – изображението от възходящата орбита. Датите на обработените изображения са описани подробно в таблици № 2а), 2б) и 2в). След обработката на трите варианта е направена съпоставка на получените крайни резултати на вертикалните деформации в изследваната зона.

Таблица № 2а). Данни за главните и подчинените изображения в първия случай на съвместна обработка

Номер на картата на преместванията	Главно изображение	Подчинено изображение
	Възходяща орбита (Path 102 и frame 133)	Низходяща орбита (Path 7 и frame 448)
1	01.09 – 13.09.24	07.09 – 19.09.24
2	13.09 – 25.09.24	19.09 – 01.10.24
3	25.09 – 07.10.24	01.10 – 13.10.24
4	07.10 – 19.10.24	13.10 – 25.10.24
5	19.10 – 31.10.24	25.10 – 06.11.24
6	31.10 – 12.11.24	06.11 – 18.11.24
7	12.11 – 24.11.24	18.11 – 30.11.24
8	24.11 – 06.12.24	30.11 – 12.12.24
9	06.12 – 18.12.24	12.12 – 24.12.24
10	18.12 – 30.12.24	24.12.24 – 05.01.25

Таблица № 2б). Данни за главните и подчинените изображения във втория случай на съвместна обработка

Номер на картата на преместванията	Главно изображение	Подчинено изображение
	Възходяща орбита (Path 102 и frame 133)	Низходяща орбита (Path 7 и frame 448)
11	07.09 – 19.09.24	08.09 – 20.09.24
12	19.09 – 01.10.24	20.09 – 02.10.24
13	01.10 – 13.10.24	02.10 – 14.10.24
14	13.10 – 25.10.24	14.10 – 26.10.24
15	25.10 – 06.11.24	26.10 – 07.11.24
16	06.11 – 18.11.24	07.11 – 19.11.24
17	18.11 – 30.11.24	19.11 – 01.12.24
18	30.11 – 12.12.24	01.12 – 13.12.24
19	12.12 – 24.12.24	13.12 – 25.12.24
20	24.12.24 – 05.01.25	25.12.24 – 06.01.25

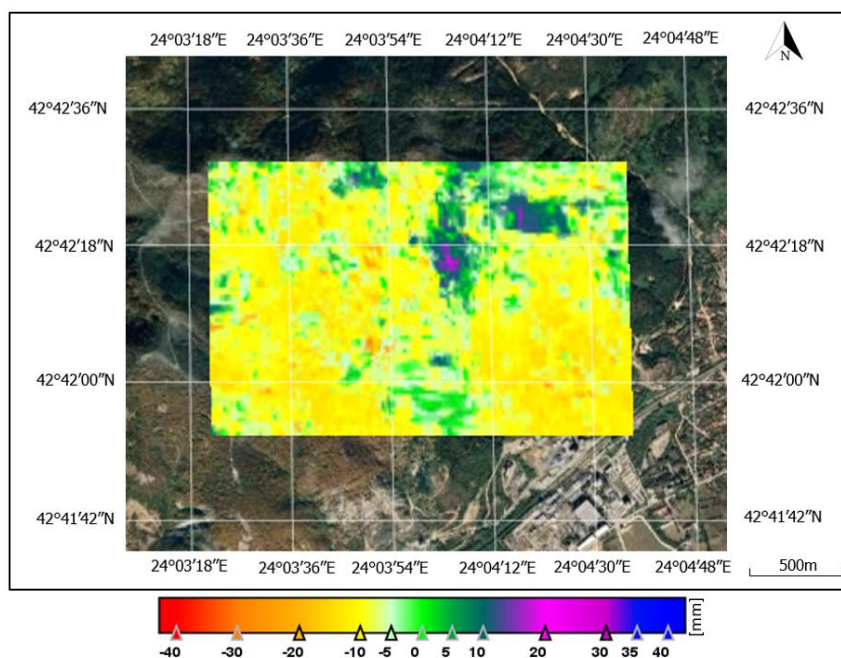
**Таблица № 2в). Данни за главните и подчинените изображения
в третия случай на съвместна обработка**

Номер на картата на преместванията	Главно изображение	Подчинено изображение
	Възходяща орбита (Path 102 и frame 133)	Низходяща орбита (Path 7 и frame 448)
21	07.09 – 19.09.24	13.09 – 25.09.24
22	19.09 – 01.10.24	25.09 – 07.10.24
23	01.10 – 13.10.24	07.10 – 19.10.24
24	13.10 – 25.10.24	19.10 – 31.10.24
25	25.10 – 06.11.24	31.10 – 12.11.24
26	06.11 – 18.11.24	12.11 – 24.11.24
27	18.11 – 30.11.24	24.11 – 06.12.24
28	30.11 – 12.12.24	06.12 – 18.12.24
29	12.12 – 24.12.24	18.12 – 30.12.24
30	24.12.24 – 05.01.25	25.12.24 – 06.01.25

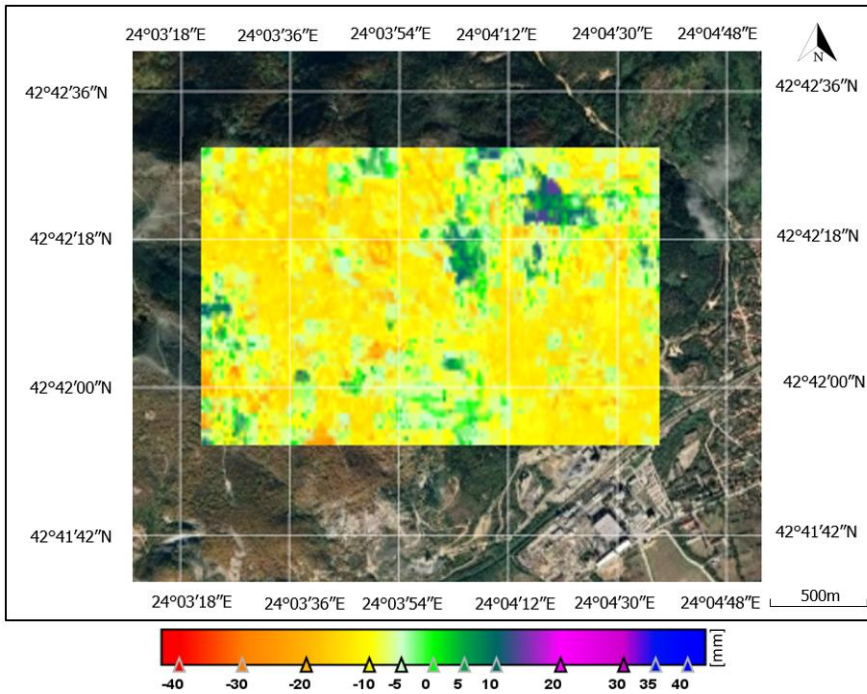
4. Резултати

4.1. Резултати, получени от обработка в SNAP

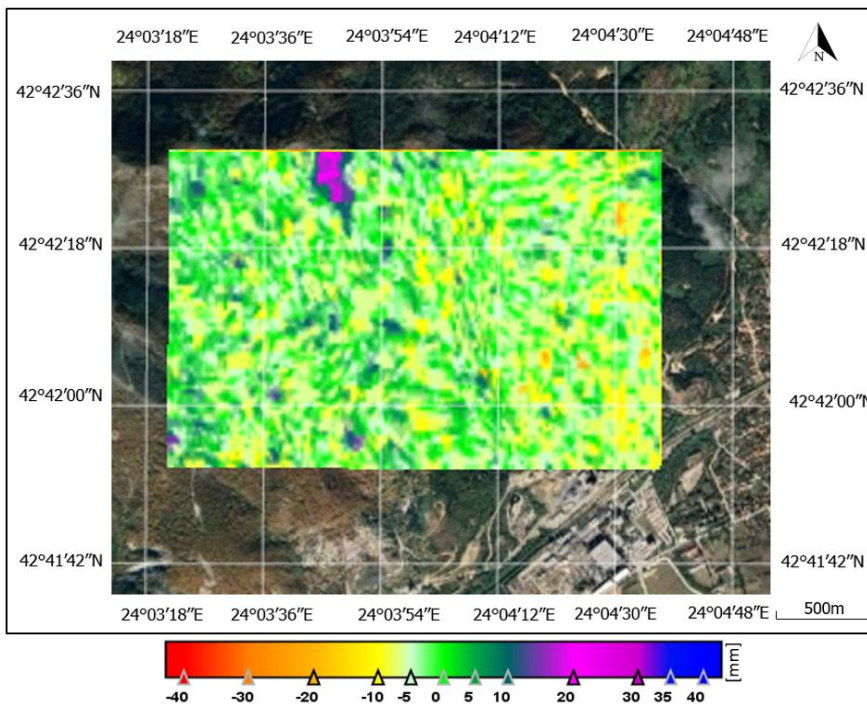
Данните, описани в т. 3.2, са обработени по блок-схемите, представени на фиг. 3 и фиг. 5. Крайните резултати са 30 карти, отразяващи вертикалните премествания в изследваната зона. В настоящата статия ще бъдат разгледани три карти: по една карта от всеки изчислен вариант. На следващите фигури са представени карти: № 6 от първия вариант (фиг. 6а), № 16 от втория вариант (фиг. 6б) и № 28 от третия вариант (фиг. 6в).



Фиг. 6а). Карта № 6 на вертикалните премествания за периода от 31.10.24 г. до 18.11.24 г.



Фиг. 6б). Карта № 16 на вертикалните премествания за периода от 06.11.24 г. до 19.11.24 г.



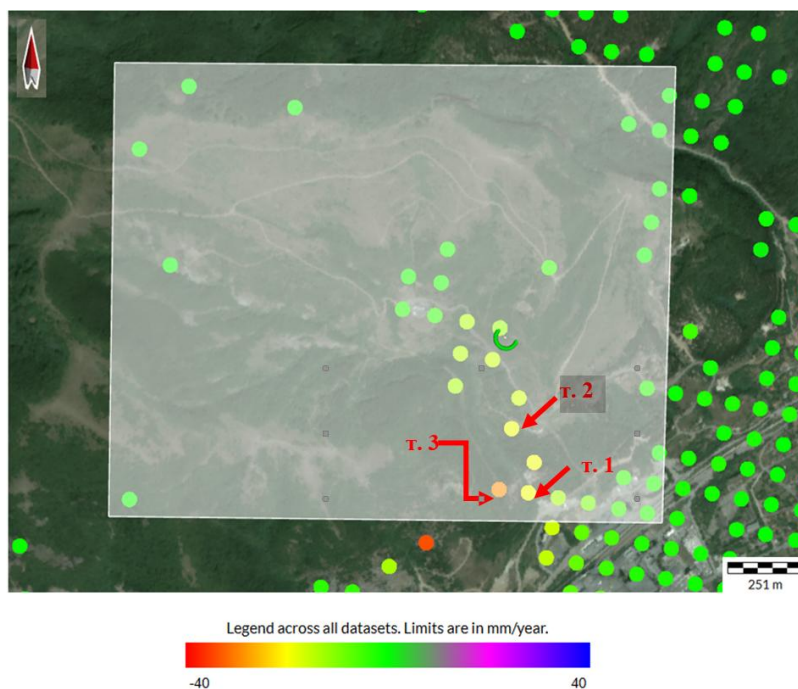
Фиг. 6в). Карта № 28 на вертикалните премествания за периода от 30.11.24 г. до 13.12.24 г.

От трите карти се вижда, че резултатите са идентични. На първата карта минималната отчетена стойност е -28 mm, а максималната е $+20$ mm. На втората карта измерените минимална и максимална стойност са съответно -29 mm и $+22$ mm. Същите стойности са определени и от третата карта и са -25 mm и $+26$ mm.

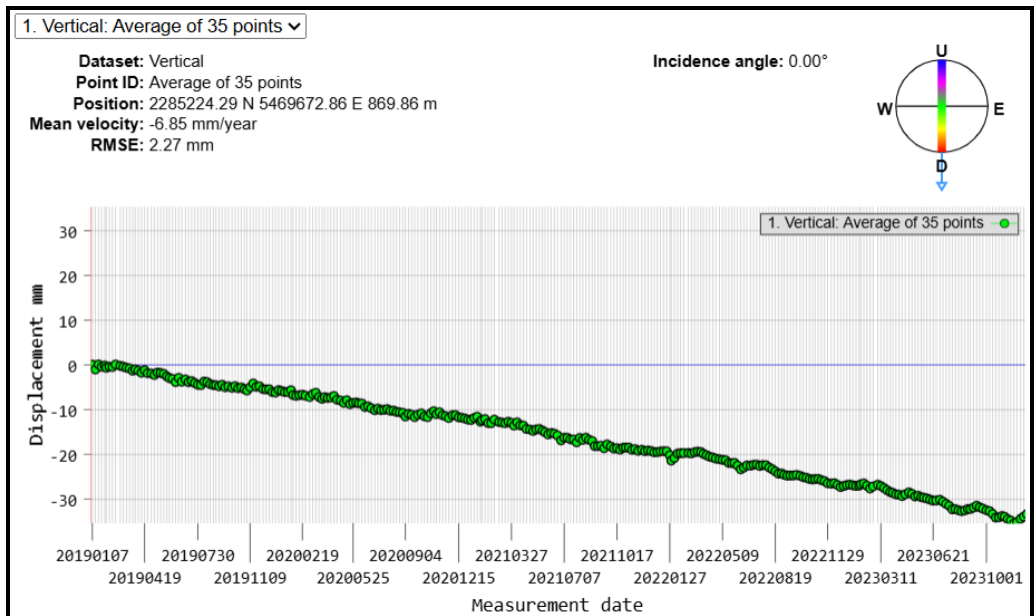
4.2. Резултати, получени от EGMS (European Ground Motion Service)

EGMS е европейска услуга за движение на земната повърхност, която е част от CLMS (The Copernicus Land Monitoring Service). CLMS предоставя геопространствена информация на земната повърхност и нейните промени, земеползването, състоянието на растителността, водния цикъл и изчерпаемите ресурси на повърхността на Земята на широк кръг потребители в Европа и по света в областта на екологичните наземни приложения. Тази услуга поддържа приложения в различни области като пространствено и градско планиране, управление на горите и водите, селско стопанство и хранителна сигурност, опазване и възстановяване на природата, развитие на селските райони, отчитане на екосистемите и смекчаване/адаптиране към изменението на климата [9].

За да имат база за сравнение, получените резултати от обработката в SNAP ще бъдат съпоставени с резултатите, получени от европейската услуга за движение на земната повърхност. На фиг. 7а) е представен полигон, покриващ зоната на интерес, съдържащ точките, в които са настъпили осезаеми вертикални деформации (според EGMS) в периода от началото на 2019 година до края на 2023 година. Визуализирани са осреднените резултати на потъванията във всички точки, които са част от начертания полигон. Ясно се вижда, че в целия район над мината има слягане на земната повърхност и изчислената скорост на потъване е 7 mm/year. Вж. фиг. 7б).

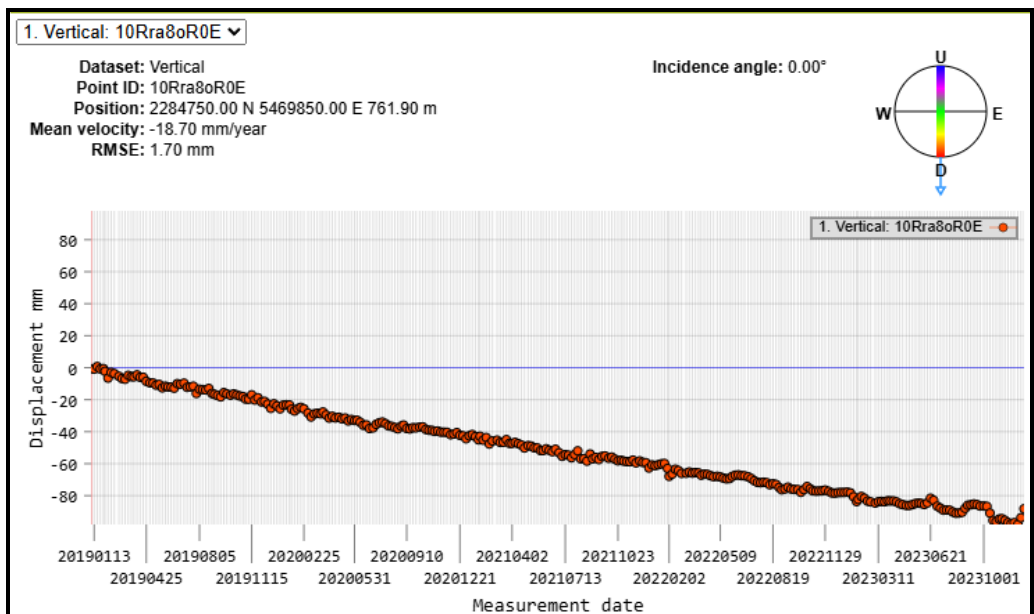


Фиг. 7а). Схема на зоната на интерес и местоположение на изследваните точки.
Източник: <https://egms.land.copernicus.eu/>

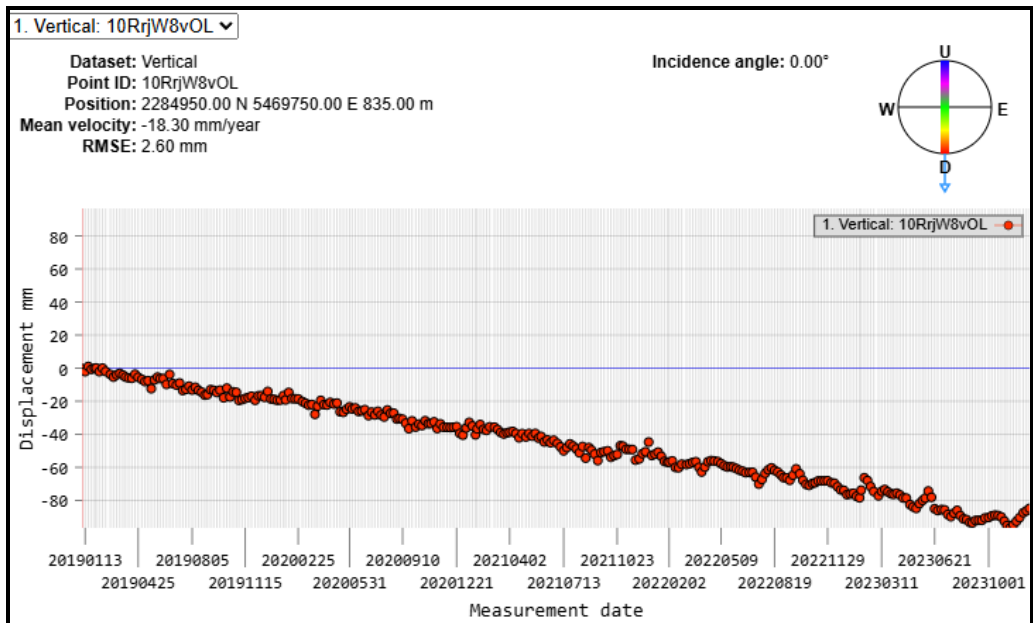


Фиг. 7б). Осреднена стойност на вертикалните премествания в точките, попадащи в зоната на интерес. Източник: <https://egms.land.copernicus.eu/>

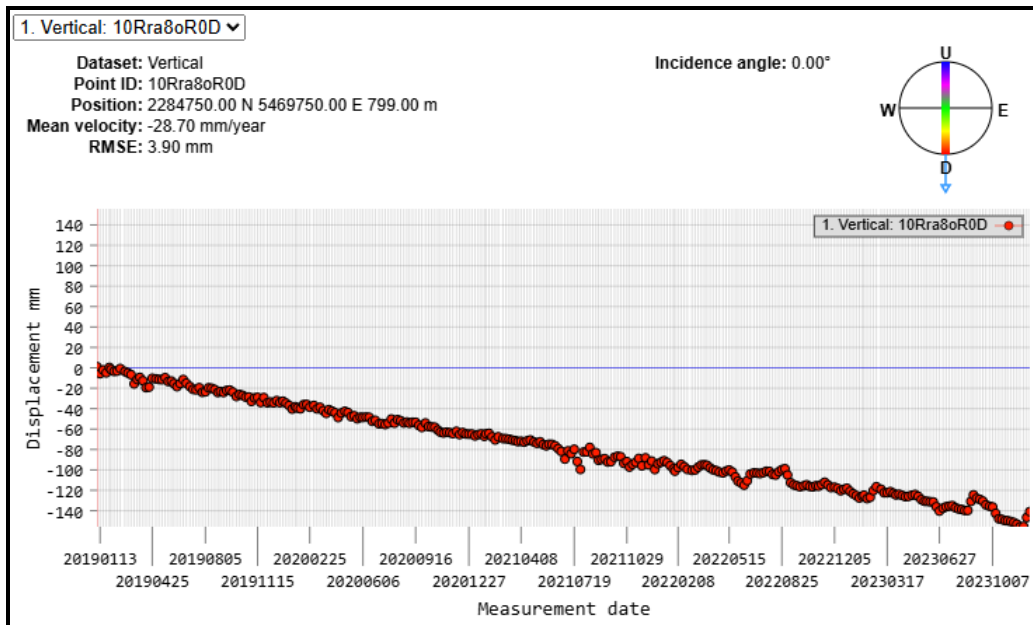
4.3. Сравнение на получените резултати



Фиг. 8а). Вертикални премествания, настъпили в т. 1 в периода от януари 2019 до декември 2023. Източник: <https://egms.land.copernicus.eu/>



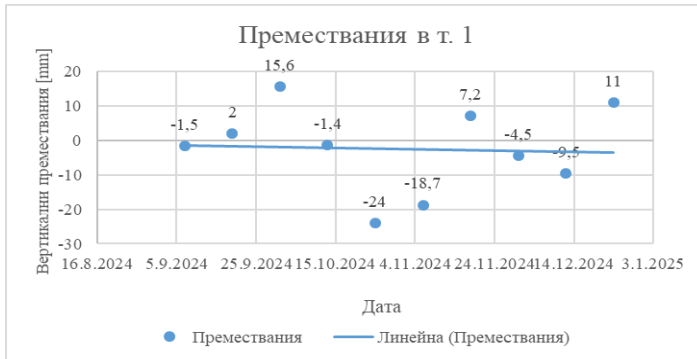
Фиг. 8б). Вертикални премествания, настъпили в т. 2 в периода от януари 2019 до декември 2023. Източник: <https://egms.land.copernicus.eu/>



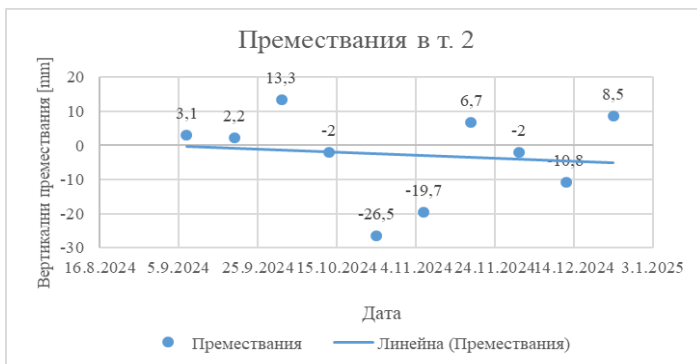
Фиг. 8в). Вертикални премествания, настъпили в т. 3 в периода от януари 2019 до декември 2023. Източник: <https://egms.land.copernicus.eu/>

Сравнението на получените резултати, представени в т. 4.1 и в т. 4.2 ще бъде извършено чрез извадка на вертикалните премествания в три точки, попадащи в зоната

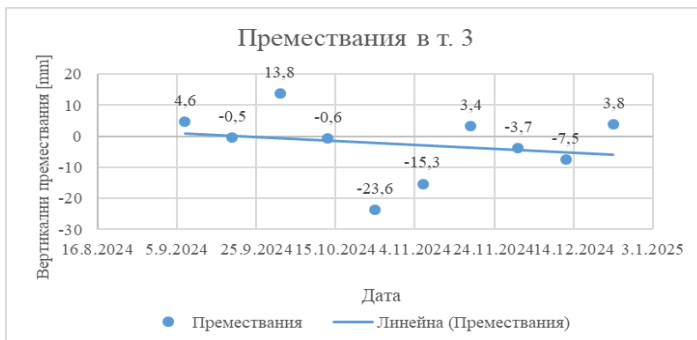
на интерес, представена на фиг. 7а). На фиг. 8а), 8б) и 8в) са изобразени съответно резултатите на трите точки, в които са настъпили най-осезаеми деформации според резултатите, получени от EGMS. На фиг. 9а), 9б) и 9в) са визуализирани графично резултатите на същите три точки, получени от обработката на третия вариант в софтуера SNAP (табл. 2в).



Фиг. 9а). Резултати, отчетени от третия вариант на обработка за т. 1, в периода от септември 2024 до декември 2024



Фиг. 9б). Резултати, отчетени от третия вариант на обработка за т. 2, в периода от септември 2024 до декември 2024



Фиг. 9в). Резултати, отчетени от третия вариант на обработка за т. 3, в периода от септември 2024 до декември 2024

Данните, получени от EGMS, показват, че в първата точка средната скорост на потъване за една година е 19 mm/year, във втората точка е също приблизително 19 mm/year, а в третата точка – 28 mm/year.

Както се вижда от горните фигури, тенденцията в представените стойности на вертикалните премествания е с посока под нулата. От графиките, визуализирани на фиг. 9, се стига до извода, че изчисляването на вертикалните премествания в период от три месеца дава достатъчна информация, за да се проследи тенденцията на деформациите в изследвания участък, която е с отрицателен знак, т.е. потъване на земната кора.

5. Заключение

SAR данните са основен източник на информация в направеното изследване. Те запазват голямото си предимство на бърз, ефективен и икономичен метод за мониторинг на земната повърхност. Благодарение на мисията Sentinel 1-A и софтуера SNAP, достъпът и обработката на тези данни е свободен. Използваният DinSAR метод за тяхната обработка е отличен подход за наблюдаване на обширни площи, без използването на изкуствени отражатели по земната повърхност.

Предмет на изследване в настоящия труд е район, под който протича активна минна дейност. Основна задача е да се установят вертикалните премествания в зоната на интерес и да се изготвят карти на преместванията. Констатира се, че подземните минни дейности имат пряка връзка с деформациите по земната повърхност, като в цялата площ над мината се наблюдават потъвания на земната кора.

В текущата разработка резултатите, които са получени от обработката на SAR данни със софтуера SNAP, дават представа за случили се премествания на земната кора за кратък период от време (3 месеца). От друга страна, EGMS предоставя резултати от дълъг период на обработка (4 години), което дава ясна оценка за движението на земната кора и по този начин се предоставя възможност за сравнение на бъдещи проучвания, свързани с промени в състоянието на земната повърхност за цяла Европа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gojković, Z., Kilibarda, M., Brajović, L., Marjanović, M., Milutinović, A., Ganić, 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>.

2. *Zheng, M., Deng, K., Fan, H., Du, S.* Monitoring and Analysis of Surface Deformation in Mining Area Based on InSAR and GRACE. *Remote Sens.* 2018, 10, 1392, <https://doi.org/10.3390/rs10091392>.

3. *Ilieva, M., Pawłuszek-Filipiak, K., Teodorczyk, D., Wielgocka, N., Balak, P., Stasch, K., Karpina, M., Bogusławski, P., Tymków, P.* EPOS-PL+ project – infrastructure for long-term InSAR monitoring of mining induced deformations in Southern Poland. European Geosciences Union General Assembly 2024 (EGU24), held 14 – 19 April, 2024 in Vienna, Austria, Online at <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2024EGUGA..2619176I/abstract.id.19176>, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-19176>.

4. *Obshtina Chelopech:* <https://chelopech.egov.bg/wps/portal/municipality-chelopech/municipality/municipality.characteristics/geographical.characteristics>, poseten през april 2025.

5. *Prirodni resursi:* <https://chelopech.egov.bg/wps/portal/municipality-chelopech/municipality/municipality.characteristics/natural.resources>, poseten през april 2025.

6. *Atanasova-Zlatareva, M.* Prilozhenie na SAR tehnologiyata za izsledvane na geodinamichni protsesi v Bulgariya i Balkanskiya poluostrov. Disertatsiya za prisazhdane na nauchnata stepen “doktor na naukite”, Sofiya, 2024.

7. *Di Traglia, F., De Luca, C., Manzo, M., Nolesini, T., Casagli, N., Lanari, R., Casu, F.* 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>, 2021.

8. *Gatelli, F., Guamieri, A. M., Parizzi, F., Pasquali, P., Prati, C., Rocca, F.* The wavenumber shift in SAR interferometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 32, no. 4, pp. 855 – 865, 1994.

9. <https://land.copernicus.eu/en>, poseten prez yuni 2025.

DETERMINATION OF EARTH DEFORMATIONS IN THE CHELOPECH AREA THROUGH SAR DATA

S. Filipova¹, M. Atanasova-Zlatareva²

Keywords: *Sentinel 1-A, underground mining activities, SNAP, DinSAR*

ABSTRACT

The present study seeks the connection between underground mining activities and the deformations of the earth's surface in the Chelopech area. Satellite images from the Sentinel 1-A mission are used to achieve the task. The region is interesting for this type of study because active mining activities has led to individual large subsidences on the surface, which are practically monitored once a year by classical geodetic measurements. In this work, not only the registered local subsidences are considered, but also the entire area above the mine, because SAR data is suitable for this type of research, which has been proven in recent years in world practice. Despite the mountainous nature of the terrain, the forested area and the fact that satellite data have a low resolution, it is concluded that there is deformation of the earth's crust throughout the region. For this purpose, a total of 32 images were processed – 21 belong to the ascending satellite orbit and 11 are from descending satellite orbit for the period from September 2024 to December 2024. The images were processed with the open-access software SNAP to obtain interferograms and displacement maps. The DinSAR was used, mainly creating time series of interferograms for the period of three months and the MT-InSAR approach was applied. The results of this research are compared with data from the European Earth Movement Service (EGMS), which also recorded crustal subsidence in the study area. The data from the European Ground Motion Service are also based on interferometric satellite radar images from the Sentinel 1-A mission, but for a longer period – from January 2019 to December 2023.

¹ Svetla Filipova, Eng., Dept. “Geodesy”, NIGGG-BAS, 3 G. Bonchev St., Sofia,
e-mail: filipova_s@mail.bg

² Mila Atanasova-Zlatareva, Prof. DSc Eng., Dept. “Geodesy”, NIGGG-BAS, 3 G. Bonchev St., Sofia,
e-mail: mila_at_zl@abv.bg