



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
im. Stanisława Staszica
w Krakowie**

Przedmiot: Zarządzanie informacją o zagrożeniach naturalnych

Temat: "Satelitarna interferometria różnicowa (InSAR) w monitoringu przemieszczeń powierzchni terenu"

Autor: Tymoteusz Maj

Numery albumu: 401370

Kierunek: Geoinformacja, semestr 7



Wydział Geodezji Górnictwa i Inżynierii Środowiska

Kraków, 30.11.2023 r.

Spis Treści:

Wstęp	2
Interferometria	2
Produkty Sentinel-1 interferometric wide swath	2
ESA SNAP	3
Wybrana niecka	4
Pozyskanie danych	4
Instalacja SNAPHU	5
Eksploracja zobrazowań SAR	5
Współrejestracja (ang. corregistration)	6
<i>Podział TOPS (ang. tops split)</i>	6
<i>Zaimplementowanie informacji o orbitach (ang. applying orbit information)</i>	7
<i>Współrejestracja wsteczna i poprawa różnorodności spektralnej (ang. back geocoding and enhanced spectral diversity)</i>	8
<i>Generowanie interferogramu i estymacji koherencji (ang. interferogram formation and coherence estimation)</i>	10
<i>Lączenie pasm tops (ang. tops deburst)</i>	11
<i>Filtracja fazy Goldsteina (ang. Goldstein phase filtering)</i>	12
<i>Przycięcie (ang. subset)</i>	12
<i>Rozwijanie fazy interferometrycznej (ang. phase unwrapping)</i>	13
<i>Konwersja fazy do wartości metrycznych (ang. phase to displacement)</i>	17
<i>Korekcja terenowa (ang. terrain correction)</i>	18
Eksport do KMZ	20
Obróbka danych descending	20
Przemieszczenie powierzchni terenu “LOS” (ang. Line of sight displacement)	22
Analiza QGIS	24
Wnioski	27

Wstęp

W ramach tego projektu, skoncentrujemy się na przetwarzaniu danych z satelitów Sentinel, aby ocenić przemieszczenia powierzchni terenu. Działania te pozwolą nam nie tylko zobaczyć zmiany, które zaszły między dwoma zobrazowaniami, ale także przyczynią się do zrozumienia wpływu topografii i atmosfery na uzyskane wyniki.

Dodatkowo, warto zaznaczyć, że realizacja tego projektu została możliwa dzięki wykorzystaniu zaawansowanego oprogramowania dostarczanego przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA) o nazwie SNAP (Sentinel Application Platform).

Interferometria

Interferometryczny radar syntetycznej apertury (InSAR) stanowi zaawansowaną technologię obserwacji powierzchni ziemi, wykorzystującą różnice fazowe między dwoma zobrazowaniami radarowymi wykonanymi z nieznacznie różnych pozycji sensorów w przestrzeni trójwymiarowej. Ten zaawansowany sposób analizy danych radarowych pozwala uzyskać precyzyjne informacje o przemieszczeniach powierzchni terenu, co znajduje zastosowanie w różnych dziedzinach, takich jak monitorowanie deformacji terenu, detekcja osunięć czy analiza zmian geologicznych.

Sygnal SAR (Synthetic Aperture Radar) zawiera zarówno informacje amplitudowe, odzwierciedlające siłę odpowiedzi radarowej, jak i informacje fazowe, związane z odległością między sensorem a obiektami na ziemi. Kluczową techniką wykorzystywaną w InSAR jest porównanie faz tych zobrazowań po ich współrejestracji, co umożliwia generowanie interferogramów. Faza interferogramu jest silnie skorelowana z topografią terenu, co pozwala na dokładne mapowanie przemieszczeń powierzchni.

W kontekście satelitarnej interferometrii różnicowej (DInSAR), topograficzny wpływ fazy jest eliminowany poprzez uwzględnienie numerycznego modelu terenu (NMT). Pozostałe zmiany w interferogramie są następnie interpretowane jako przemieszczenia powierzchni, uwzględniając również potencjalne zakłócenia atmosferyczne.

Produkty Sentinel-1 interferometric wide swath

Tryb IW stanowi główny sposób akwizycji danych z satelitów Sentinel-1 nad lądem. Ten tryb, bazujący na technice Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR), umożliwia zbieranie danych z szerokiego pasa o szerokości 250 km przy rozdzielcości przestrzennej 5 m na 20 m. Produkty IW SLC składają się z trzech podpasm na kanał polaryzacji, oferując łącznie trzy (pojedyncze polaryzacje VV lub HH) lub sześć (podwójna polaryzacja VV, HH, VV+HH) obrazów w jednym produkcie IW.

ESA SNAP

ESA SNAP (Sentinel Application Platform) to oprogramowanie stworzone przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA), które jest dedykowane przetwarzaniu, analizie i interpretacji danych uzyskiwanych z satelitów Sentinel oraz innych misji satelitarnych. SNAP jest narzędziem otwartoźródłowym, co oznacza, że jego kod jest dostępny publicznie, umożliwiając użytkownikom dostosowywanie go do swoich potrzeb oraz współpracę w ramach społeczności naukowej.

Poniżej znajdują się kluczowe cechy ESA SNAP:

1. Wszechstronne Przetwarzanie Danych:

- SNAP oferuje bogate możliwości przetwarzania danych z różnych źródeł, w tym danych radarowych, optycznych i atmosferycznych. Obsługuje zarówno dane z serii Sentinel, jak i innych misji satelitarnych.

2. Interferometria Radarowa:

- W kontekście projektów InSAR, SNAP dostarcza narzędzi do interferometrii radarowej, umożliwiając analizę przemieszczeń powierzchni terenu na podstawie danych radarowych.

3. Integracja z Numerycznymi Modelami Terenu:

- Oprogramowanie to integruje dane z numerycznymi modelami terenu (NMT), co jest istotne w eliminacji wpływu topografii na interferogramy.

4. Wizualizacja i Analiza Wyników:

- SNAP oferuje zaawansowane narzędzia do wizualizacji wyników, co ułatwia zrozumienie i interpretację danych. Użytkownicy mogą analizować interferogramy, generować profile terenu, a także przeprowadzać różnorodne analizy statystyczne.

5. Obsługa Formatów Danych:

- Program obsługuje różnorodne formaty danych, co umożliwia korzystanie z danych pochodzących z różnych źródeł i misji satelitarnych.

6. Moduły Dodatkowe:

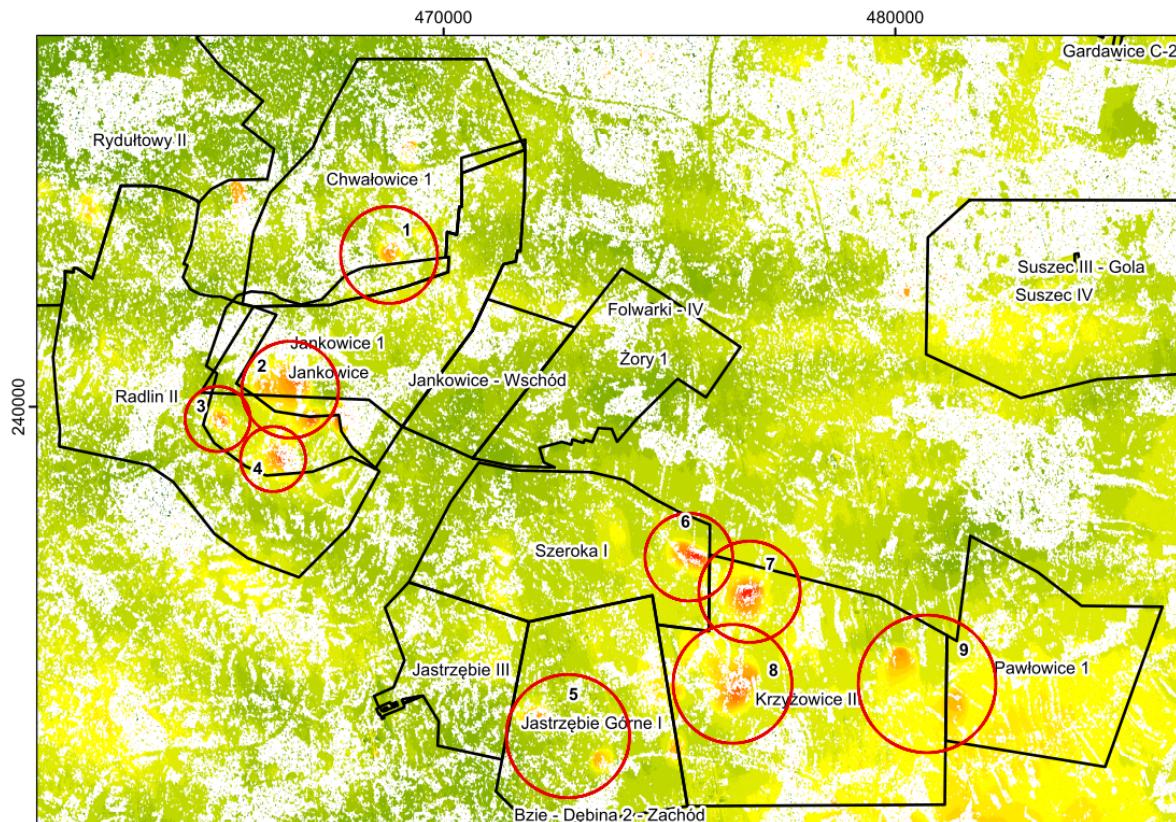
- SNAP posiada moduły dodatkowe, które można instalować w zależności od potrzeb użytkownika. Dostępne są narzędzia do przetwarzania danych optycznych, analizy atmosferycznej i wielu innych.

7. Łatwość Użycia:

- Mimo zaawansowanych możliwości, SNAP stawia na intuicyjny interfejs użytkownika, dzięki czemu nawet osoby niebędące ekspertami w dziedzinie przetwarzania danych satelitarnych mogą skorzystać z jego funkcji.

Dzięki tym funkcjom, SNAP stanowi istotne narzędzie dla badaczy, naukowców i inżynierów, którzy zajmują się analizą danych satelitarnych w kontekście różnorodnych zastosowań, takich jak monitorowanie zmian na powierzchni ziemi, badania klimatyczne czy analiza zagrożeń naturalnych.

Wybrana niecka



Dane używane w tym projekcie obejmują obszar metropolitalny wokół Katowic, który jest częścią Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Obszar ten charakteryzuje się licznymi nieckami obniżeń i wypiętrzeń terenu, będącymi wynikiem eksploatacji złóż węgla kamiennego.

Bazując na przedmiotowej mapie prezentującej niecki, przeprowadziłem analizę i wybranej konkretnej niecki. Wybranym obszarem do analizy jest niecka numer 8, znana jako Krzyżowice III.

Pozyskanie danych

Pierwszym etapem w realizacji projektu było pozyskanie danych. Zdecydowano się na pobranie danych ascending z platformy Copernicus Data Space Ecosystem, zgodnie z zaleceniami zawartymi w dostępnym tutorialu. Niestety, w przypadku danych descending napotkano problemy z metadanymi na stronie Copernicus. W związku z tym, dane descending zostały pobrane z serwisu Alaska Satellite Facility, który zapewnił kompletny zestaw danych bez zakłóceń metadanych. Ten krok był istotny dla zapewnienia spójności i integralności danych, umożliwiając precyzyjną analizę przemieszczeń powierzchni terenu przy wykorzystaniu interferometrii radarowej.

Dane ascending:

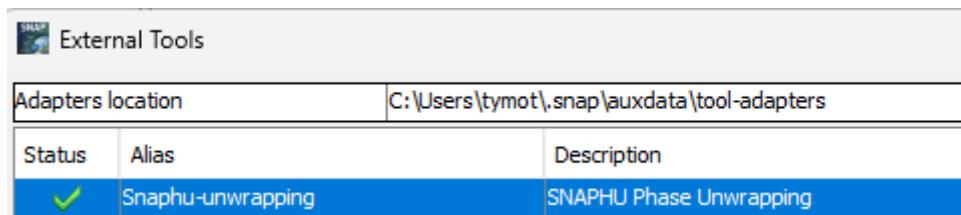
Nazwa	Data modyfikacji	Typ	Rozmiar
S1B_IW_SLC_1SDV_20191208T163422_20191208T163449_019276_024651_E2F6.zip	29.10.2023 21:15	Archiwum WinRA...	4 629 074 KB
S1B_IW_SLC_1SDV_20191220T163421_20191220T163448_019451_024BE6_79C7.zip	29.10.2023 21:14	Archiwum WinRA...	4 630 434 KB

Dane descending:

Nazwa	Data modyfikacji	Typ	Rozmiar
S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20191206T045326_030223_03746C_2662.zip	20.11.2023 10:02	Archiwum WinRA...	4 614 184 KB
S1A_IW_SLC_1SDV_20191218T045258_20191218T045326_030398_037A79_0C28.zip	20.11.2023 10:09	Archiwum WinRA...	4 825 278 KB

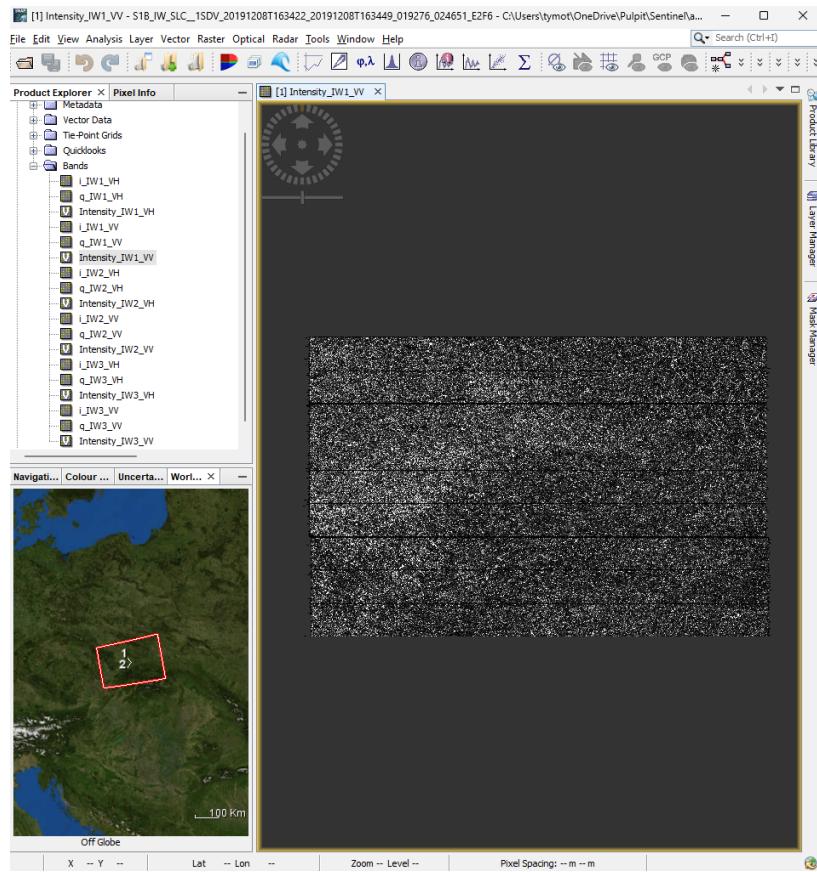
Instalacja SNAPHU

W pierwszym etapie pracy z programem ESA SNAP, zainstalowano istotny plugin SNAPHU. Ten krok został przeprowadzony zgodnie z dostępnym tutorialem, który został dostarczony jako materiał zajęciowy. Zastosowanie pluginu SNAPHU jest kluczowe w kontekście analizy interferogramów, umożliwiając skuteczne rozwiązanie problemów związanych z niejednoznacznością fazową, co przyczynia się do uzyskania precyzyjnych danych dotyczących przemieszczeń powierzchni terenu. Poprzez korzystanie z tutorialu, zapewniono prawidłową konfigurację narzędzi i pluginów, co stanowiło fundament dla późniejszej analizy danych interferometrycznych.



Eksploracja zobrazowań SAR

Rozpoczynając analizę, skupimy się na danych ascending. Procedurę tę wykonamy zgodnie z krokami opisanyimi w tutorialu, co zapewni spójność i powtarzalność procesu. W trakcie analizy będziemy dokumentować kolejne etapy, tworząc zrzuty ekranowe, które posłużą jako pełen zapis procesu. To podejście pozwoli nam szczegółowo udokumentować każdy krok, ułatwiając analizę oraz ewentualne korekty w przypadku napotkanych wyzwań. Analiza na danych ascending stanowi pierwszy etap projektu i jest kluczowa dla uzyskania solidnych podstaw do dalszych badań przemieszczeń powierzchni terenu przy wykorzystaniu interferometrii radarowej.

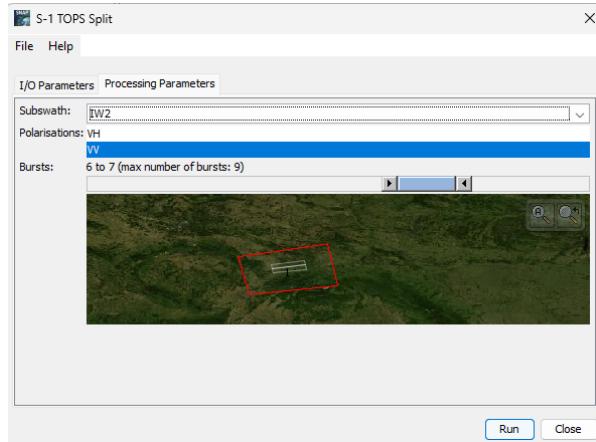


Współrejestracja (ang. corregistration)

Aby określić różnicę faz pomiędzy dwoma zobrazowaniami SAR, należy najpierw utworzyć stos, zawierający oba produkty. Współrejestracja, umożliwiająca dopasowanie zobrazowań z dokładnością subpikselową, jest niezbędna do tego celu. W przypadku konwencjonalnych produktów radarowych Stripmap, rejestracja odbywa się w jednym kroku. Jednak produkty Sentinel-1 TOPSAR wymagają serii kroków ze względu na ich specjalną formę rejestracji. Mimo że SNAP oferuje operator S-1 TOPS Coregistration with ESD, w tym tutorialu zastosowano podejście indywidualne, wykonując poszczególne kroki współrejestracji jeden po drugim, ze względu na efektywność i ograniczenia zużycia pamięci RAM.

Podział TOPS (ang. tops split)

Aby ograniczyć zobrazowania SAR do obszaru zainteresowania, skorzystano z operatora S-1 TOPS Split (znajdującego się w menu Radar -> Sentinel-1 TOPS). Wybrano podpasmo IW2 oraz polaryzację VV, a następnie zredukowano liczbę impulsów do 6-7, przeciągając szare trójkąty w kierunku środka. Poprzez podgląd zweryfikowano lokalizację wybranego obszaru. Operację potwierdzono, klikając Uruchom (Run), i analogiczny krok powtórzono dla drugiego zobrazowania Sentinel-1. Działa to umożliwiło skoncentrowaną analizę przemieszczeń powierzchni terenu w obszarze zainteresowania.

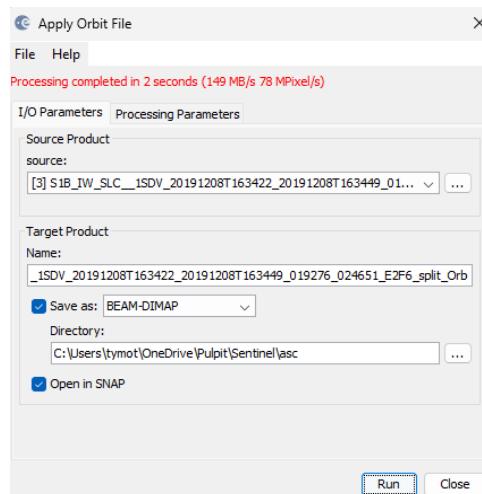


Zaimplementowanie informacji o orbitach (ang. applying orbit information)

W procesie analizy danych Sentinel-1, pliki pomocnicze orbit pełnią kluczową rolę, dostarczając informacje o pozycji satelity w przestrzeni trójwymiarowej podczas pozyskiwania zobrazowań SAR. W narzędziu SNAP, dla produktów Sentinel-1, te pliki są automatycznie pobierane i dodawane do metadanych za pomocą operatora Apply Orbit File (znajdującego się w menu Radar).

Usługa Precise Orbit Determination (POD) dla Sentinel-1 dostarcza dwóch rodzajów plików orbit: Restituted Orbit Ephemerides (ROE) oraz Precise Orbit Ephemerides (POE). Pliki efemeryd POE obejmują około 28 godzin i zawierają wektory stanu orbity w odstępach co 10 sekund. Generowane są one po jednym na dzień i dostarczane w ciągu 20 dni po wykonaniu zobrazowania SAR.

W przypadku braku dostępności precyzyjnych orbity dla konkretnego zobrazowania SAR, można wykorzystać orbity rezydualne. Choć mogą być mniej dokładne niż precyzyjne orbity, stanowią lepszą alternatywę niż przewidywane orbity dostępne w metadanych danego zobrazowania. Ten elastyczny wybór umożliwia przeprowadzenie analizy nawet w przypadku niedostępności najbardziej precyzyjnych danych orbitowych.

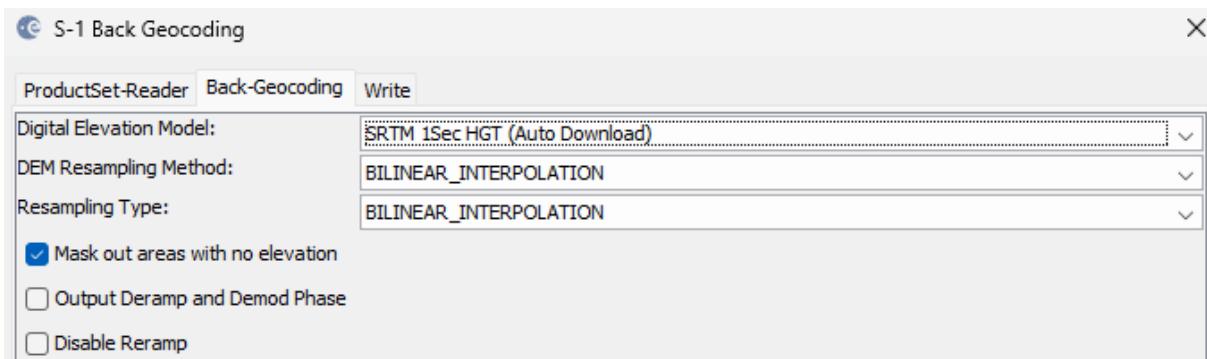


Współrejestracja wsteczna i poprawa różnorodności spektralnej (ang. back geocoding and enhanced spectral diversity)

W kolejnym etapie analizy, zastosowano operator S-1 Back Geocoding (znajdujący się w menu Radar -> Współrejestracja -> Współrejestracja Sentinel-1 TOPS) w celu współrejestracji dwóch zobrazowań SAR. Proces ten oparty jest na informacjach o orbitach, które zostały dodane w poprzednim kroku, oraz na numerycznym modelu terenu (NMT), pobieranym automatycznie przez SNAP.

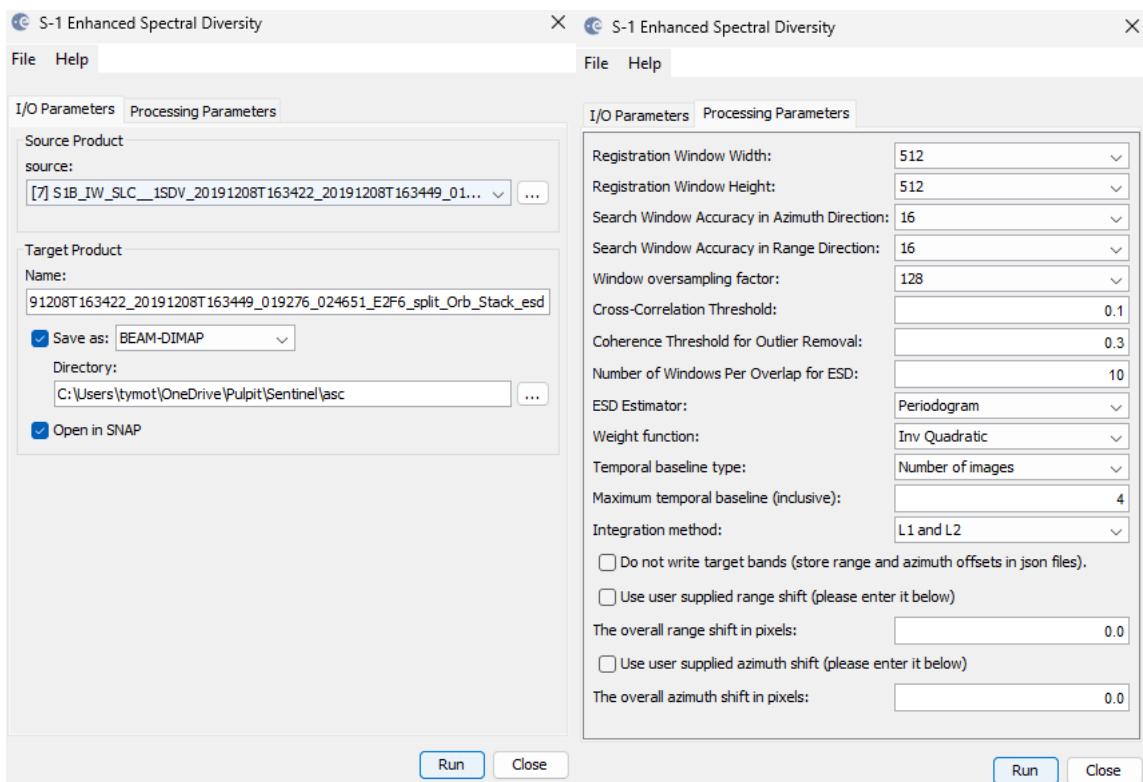
File Name	Type	Acquisition	Track	Orbit
S1B_IW_SLC_1SDV_20191208T163422_20191208T163449_019276_0...	SLC	08Dec2019	175	19276
S1B_IW_SLC_1SDV_20191220T163421_20191220T163448_019451_0...	SLC	20Dec2019	175	19451

Następnie, dodano produkty z dwóch różnych dat (zakończone na „_split_Orb”) do listy plików w karcie ProductSet-Reader. W ramach ustawień Back-Geocoding, wybrano SRTM 1Sec HGT (AutoDownload). Warto zaznaczyć, że jako pierwsze wskazano zobrazowanie SAR pozyskane wcześniej (08.12.2019) jako tzw. zdjęcie główne (Master), a jako drugie wybrano zobrazowanie pozyskane później (20.12.2019) – zdjęcie podrzędne (Slave).

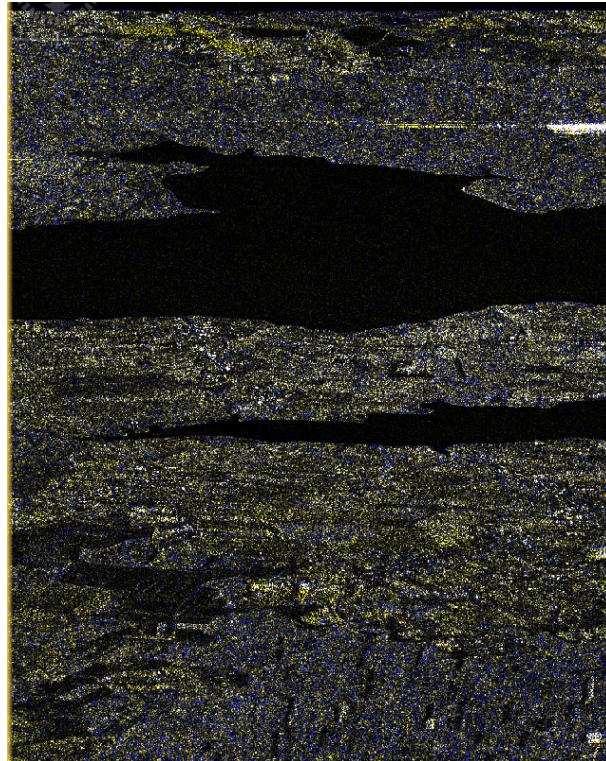


Należy pamiętać, że SRTM jest dostępny tylko między 60°N a 54°S. W przypadku obszarów poza tym zakresem, istnieje opcja użycia innego NMT z opcją AutoDownload lub skorzystania z zewnętrznego NMT.

W celu zwiększenia jakości współrejestracji, zastosowano operator S-1 Enhanced Spectral Diversity (ESD, znajdujący się w menu Radar -> Współrejestracja -> Współrejestracja Sentinel-1 TOPS) na stosie wygenerowanym przez operator Back Geocoding. ESD wprowadza poprawki przesunięcia zakresu i azymutu do obrazu podrzędnego, co przyczynia się do zwiększenia precyzji całego procesu współrejestracji.



Podgląd RGB:



Generowanie interferogramu i estymacji koherencji (ang. interferogram formation and coherence estimation)

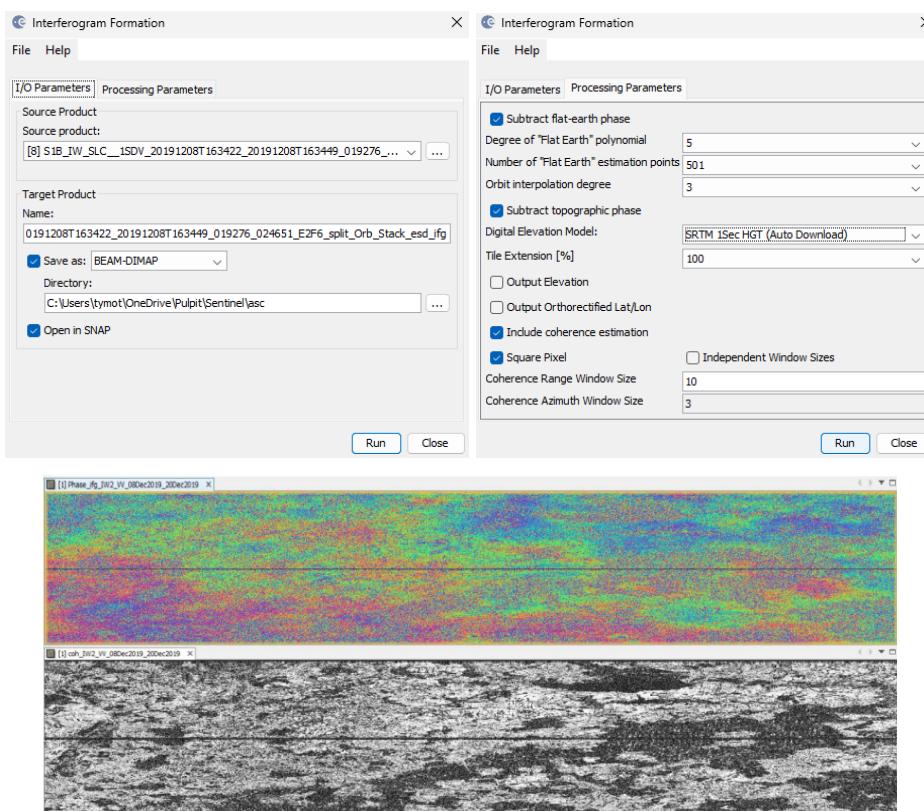
W ramach projektu, przeprowadzono generowanie interferogramu i estymację koherencji, kluczowe dla dalszej analizy deformacji terenu. Proces tworzenia interferogramu obejmuje pomnożenie obrazu wzorcowego (Master) przez sprzężoną liczbę zespoloną obrazu niewzorcowego (Slave), gdzie amplitudy obu zobrazowań SAR są mnożone, a faza interferogramu reprezentuje różnicę fazową między nimi.

W warunkach rzeczywistych, faza interferometryczna każdego piksela zobrazowania SAR zależy od różnych czynników, takich jak wpływ krzywizny ziemi (ϕ_{flat}), faza topograficzna (ϕ_{DEM}), warunki atmosferyczne (ϕ_{atm}), inne szумy (ϕ_{noise}) i ewentualne deformacje powierzchni terenu (ϕ_{disp}) między dwoma datami akwizycji.

Satelitarna interferometria różnicowa stara się oszacować wkład czynników związanych z powierzchnią ziemi (ϕ_{flat} i ϕ_{DEM}) i usunąć je z interferogramu. Metoda ta działa najlepiej w warunkach minimalnego wpływu atmosferycznego i innych zakłóceń.

Koherencja, będąca wskaźnikiem jakości informacji fazowej między zobrazowaniami, jest istotna dla oceny podobieństwa obrazów. Jej utrata może wynikać z dekorrelacji czasowej, geometrycznej lub objętościowej. W analizie zobrazowań SAR, obszary o niskiej koherencji, takie jak obszary leśne, mogą generować błędne wyniki.

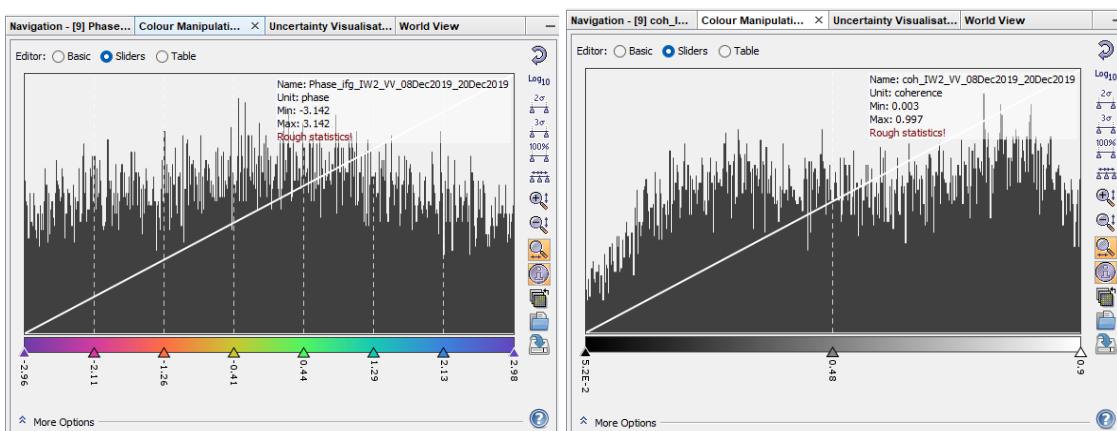
Następnie przeprowadzono proces generowania interferogramu i estymacji koherencji, w tym odejmowanie faz związanych z powierzchnią terenu oraz topografią. Produkty wynikowe obejmują interferogram i mapę koherencji, które są istotnymi elementami dalszej analizy przemieszczeń powierzchni terenu.



Po usunięciu faz topograficznych, interferogram staje się reprezentacją jedynie zmian spowodowanych przemieszczeniem powierzchni terenu, wpływem atmosferycznym oraz szumem. W skali kolorów od $-\pi$ do $+\pi$, na interferogramie pojawiają się wzorce zwane "prążkami," które reprezentują pełny cykl 2π . Każdy taki cykl manifestuje się jako cykle dowolnych kolorów, przy czym każdy z nich reprezentuje połowę długości fali elektromagnetycznej danego pasa SAR (w tym przypadku pasmo C satelity Sentinel-1).

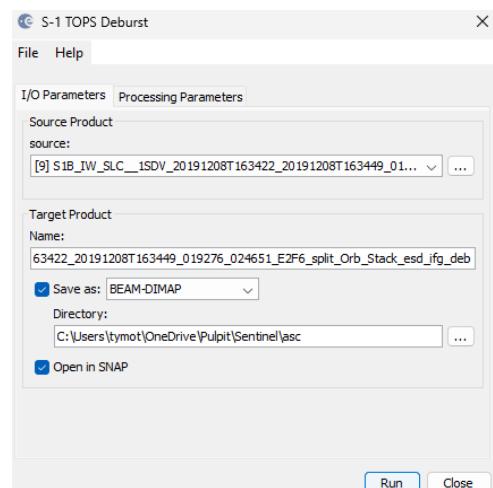
Względne przemieszczenia powierzchni terenu między dwoma zobrazowaniami SAR są następnie wyznaczane przez zliczanie prążków i pomnożenie ich przez połowę długości fali elektromagnetycznej. Im bliżej siebie są prążki, tym większe są wartości przemieszczeń powierzchni terenu w analizowanym okresie.

Koherencja, ukazuje obszary, gdzie informacja fazowa jest spójna. Obszary o wysokiej koherencji, takie jak obszary miejskie i grunty rolne (koherencja powyżej 0,6), są wyświetlane na biało, podczas gdy lasy, charakteryzujące się niską koherencją (poniżej 0,3), są ciemne. Informacja fazowa nad obszarami o niskiej koherencji, zwłaszcza nad lasami, może być mniej wiarygodna. Dominacja obszarów o niskiej koherencji na interferogramie może prowadzić do błędów w późniejszym procesie zliczania prążków i rozwijania fazy interferometrycznej (ang. phase unwrapping), co skutkuje niepoprawnymi wynikami obliczeń.



Łączenie pasm tops (ang. tops deburst)

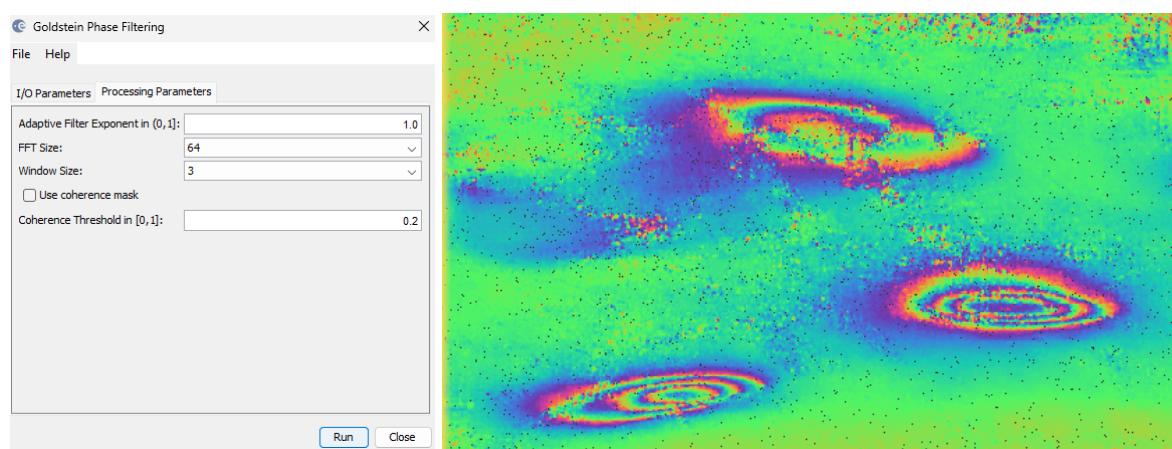
W etapie eliminacji linii oddzielających poszczególne pasma stosowany jest operator S-1 TOPS Deburst, dostępny w menu Radar -> Sentinel-1 TOPS. Ten operator jest zastosowany w kontekście wygenerowanego interferogramu i nie wymaga od użytkownika definiowania żadnych dodatkowych danych wejściowych.



Filtracja fazy Goldsteina (ang. Goldstein phase filtering)

W celu poprawy jakości prążków występujących na interferogramie oraz zminimalizowania zniekształceń związanych z dekorelacją czasową, geometryczną, rozproszeniem objętościowym oraz innymi błędami przetwarzania zobrazowań SAR, zastosowano specjalizowany filtr fazowy, a mianowicie filtr Goldsteina. Ten zaawansowany filtr wykorzystuje Szybką Transformację Fouriera (FFT) w celu usprawnienia stosunku sygnału do szumu na obrazie, co jest kluczowe dla poprawnego rozwinięcia fazy interferometrycznej w kolejnym etapie analizy. Parametry oraz szczegółowy opis filtra Goldsteina można znaleźć w publikacji Goldsteina & Werner (1998).

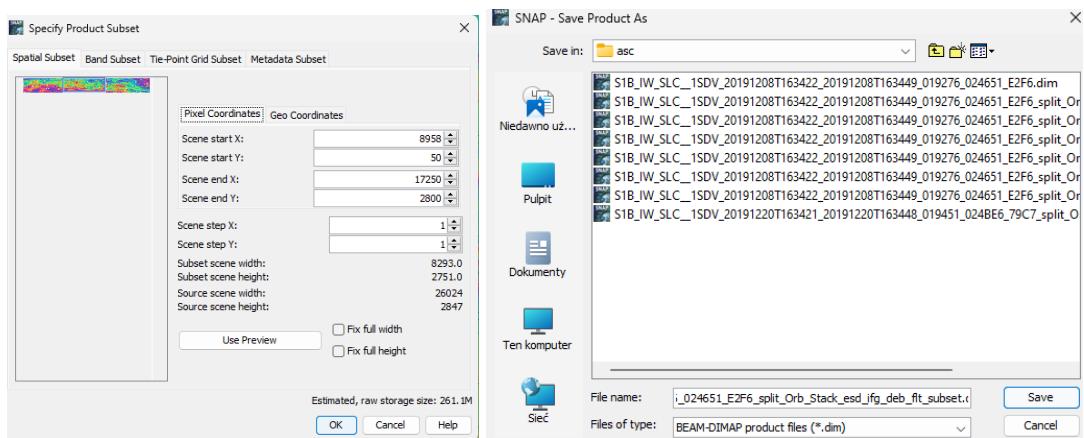
W praktyce, Filtrację Fazy Goldsteina zastosowano do produktu uzyskanego po wykonaniu kroku Łączenie Pasm TOPS, zlokalizowanego w menu Radar -> Interferometryczne -> Filtracja. Wynikiem tego procesu jest przefiltrowany, wzmacniony i bardziej wyraźny obraz fazy interferometrycznej. Ten krok ma na celu eliminację szumów i uwydacnienie istotnych informacji, co znaczco poprawia jakość danych używanych do dalszych analiz przemieszczeń powierzchni terenu.



Przycięcie (ang. subset)

Podczas etapu Podziału TOPS, wcześniej wyselekcjonowane podpasma z zobrazowań SAR obejmują obszar o znacznej powierzchni, wynoszącej kilkaset km². Tak duża przestrzeń stwarza wyzwanie dla dokładnych analiz ze względu na intensywne obciążenie obliczeniowe oraz dużą liczbę szczegółów terenowych widocznych na interferogramie. Dlatego istnieje konieczność przycięcia wygenerowanego interferogramu, aby skoncentrować się na mniejszym obszarze, zdefiniowanym przez użytkownika. Warto zauważyć, że przycięcie można zastosować tylko do produktu po Łączeniu TOPS. Z technicznego punktu widzenia, przycięcie mogłoby być wykonane przed Filtracją Fazy Goldsteina, ale w praktyce prążki interferometryczne i obszary deformacji terenu stają się widoczne dopiero po zastosowaniu tej filtracji.

Dodatkowo, przycięcie interferogramu pozwala usunąć zielone obszary na krawędziach obrazu, które zostały dodane w trakcie procesu obliczeniowego. W celu przycięcia interferogramu, wykorzystuje się funkcję Subset dostępną w Product Explorer. Wprowadza się konkretne współrzędne pikseli, takie jak Scene start X, Scene start Y, Scene end X, i Scene end Y, które precyzyjnie definiują obszar docelowy. Nowy produkt, oznaczony jako subset_0_of_, jest wyświetlany w Product Explorer jako tymczasowy. Aby zachować go na stałe, można kliknąć prawym przyciskiem myszy na produkcie, wybrać opcję "Zapisz produkt jako..." i zapisać go w formacie BEAM DIMAP pod nazwą "20191208_20191220_split_Orb_Stack_esd_ifg_deb_ft_subset.dim", dodając sufiks "subset" na końcu nazwy produktu dla zachowania spójności.

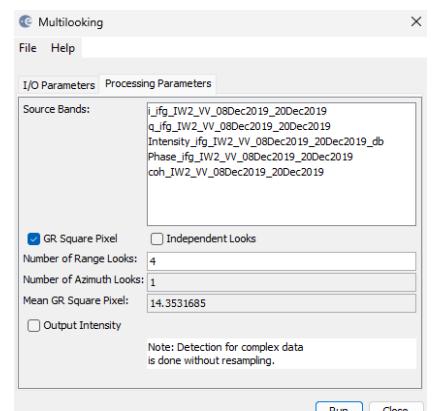


Rozwijanie fazy interferometrycznej (ang. phase unwrapping)

Faza interferometryczna na wygenerowanym interferogramie jest nieoznaczona i zdefiniowana jedynie w skali $+-2\pi$. Aby powiązać wartość fazy interferometrycznej z wysokością powierzchni terenu, konieczne jest przeprowadzenie procesu rozwijania fazy. Nieoznaczoność fazy interferometrycznej występuje w przypadku różnicy wysokości generującej zmianę fazy o 2π po rozwinięciu interferogramu.

Proces rozwijania fazy pozwala rozwiązać problem nieoznaczonej poprzez zintegrowanie różnicy faz między sąsiednimi pikselami. Usunięcie liczby całkowitej reprezentującej nieoznaczoność (2π) umożliwia interpretację wyników rozwinięcia fazy jako względnej wysokości/przesunięcia między pikselami dwóch zobrazowań SAR w określonym okresie pomiarowym.

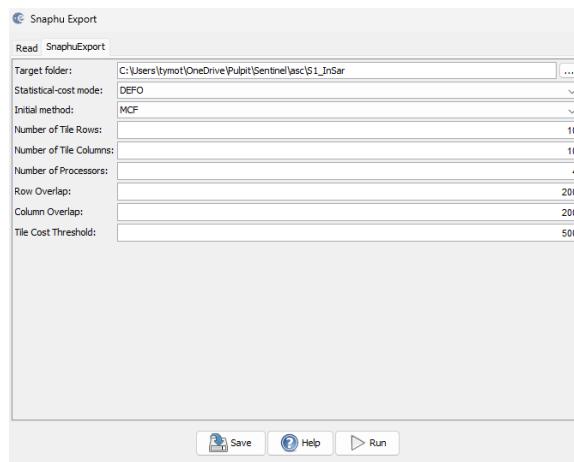
Dla uzyskania optymalnych wyników rozwijania fazy zaleca się wcześniejsze zastosowanie filtracji interferogramu, jak w poprzednim kroku, oraz ewentualne skorzystanie z wielokrotnego spojrzenia (Multilooking). Wielokrotne spojrzenie pozwala na dodatkowe wyostrzenie obrazu fazy interferometrycznej, chociaż związane jest to z utratą rozdzielczości przestrzennej interferogramu.



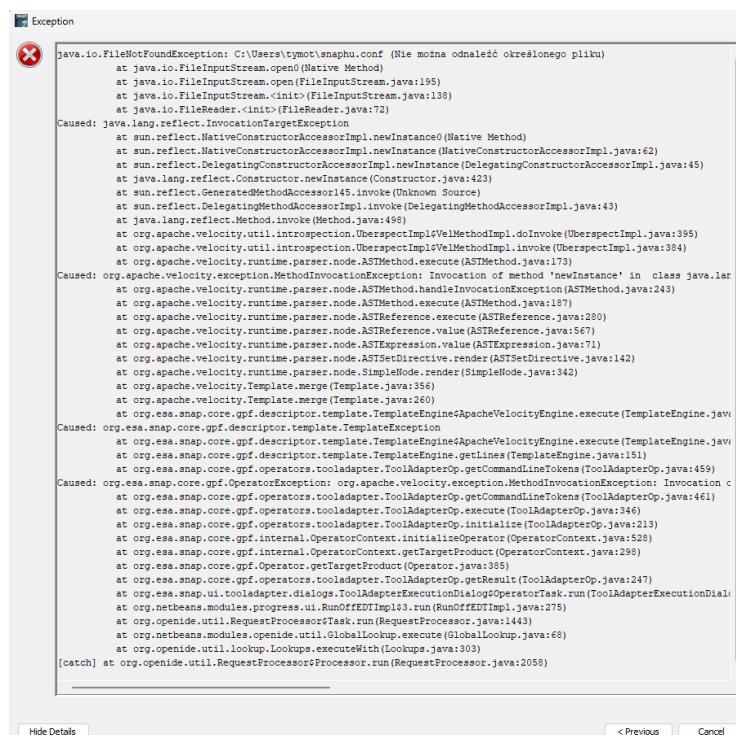
Jakość i wiarygodność wyników rozwijania fazy silnie zależą od koherencji interferogramu. Wiarygodne wyniki można uzyskać jedynie w obszarach o wysokiej koherencji sygnału radarowego, sugerując minimalną koherencję na poziomie 0,3–0,4.

Proces rozwijania fazy interferometrycznej w SNAP obejmuje trzy kroki: eksport fazy zwiniętej (i definicja parametrów), rozwijanie fazy (wykonywane poza SNAP przez oprogramowanie Snaphu) oraz import rozwiniętej fazy z powrotem do SNAP. Snaphu, jako niezależne oprogramowanie, jest wykorzystywane poza SNAP, ale wtyczka umożliwia bezpośrednie wywołanie tego procesu z poziomu SNAP.

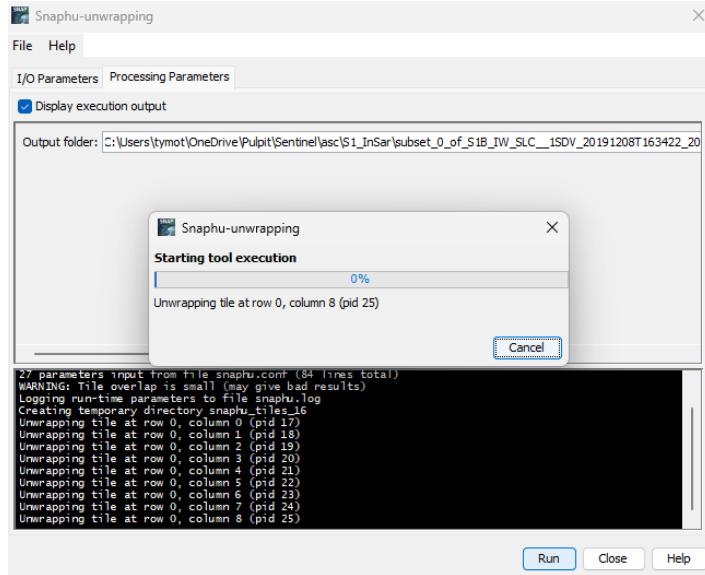
Warto zauważyć, że rozwijanie fazy może być procesem czasochłonnym, a Snaphu obsługuje wielowątkowość, co pozwala na wykorzystanie wielu rdzeni procesora. W przypadku komputerów z wieloma rdzeniami, wartości te należy zdefiniować podczas eksportu.



W trakcie realizacji zadania, korzystając z narzędzia Snaphu, napotkałem na problem techniczny.



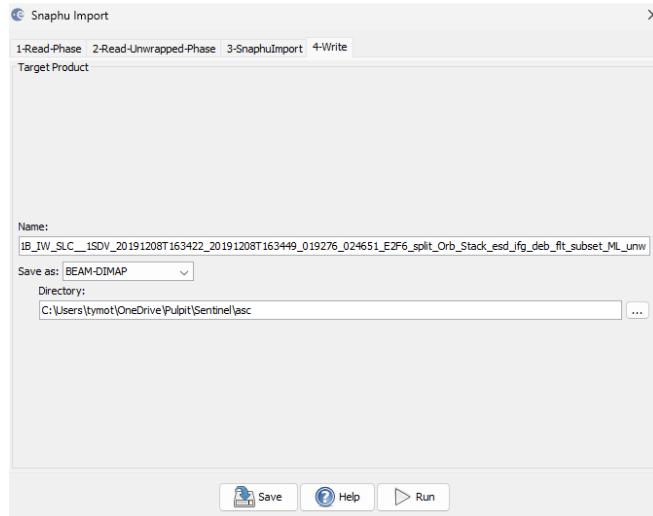
Po pewnym czasie udało mi się skutecznie naprawić problem związany z USERPROFILE, który wcześniej uniemożliwiał poprawne działanie narzędzia Snaphu. Dzięki tej korekcie, proces Snaphu został pomyślnie wznowiony i zakończony. Otrzymane wyniki uwzględniają teraz pełen zakres danych i poprawnie odzwierciedlają efekty analizy interferometrycznej.



Po uzyskaniu surowego pliku z rozwiniętą fazą interferometryczną, który nie zawierał żadnych metadanych ani geokodowania, przystąpiliśmy do procesu importu Snaphu, który konwertuje ten plik z powrotem do formatu BEAM DIMAP, dodając jednocześnie wymagane metadane z produktu reprezentującego zwiniętą fazę. Pliki te mają tę samą geometrię, co umożliwia skuteczny import.

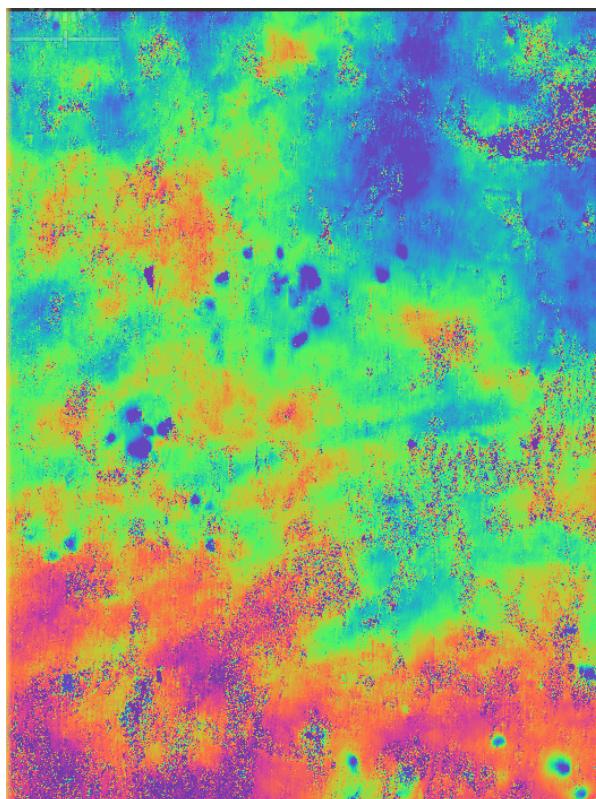
Proces importu Snaphu wymagał zdefiniowania przez użytkownika następujących zakładek:

1. **Read-Phase:** Wybranie interferogramu (przed eksportem) z menu rozwianego.
2. **Read-Unwrapped-Phase:** Wybranie ikony, aby otworzyć menu plików i przejście do katalogu eksportu. Następnie wybranie pliku *.hdr przedstawiającego rozwiniętą fazę.
SnaphuImport: Pozostawienie opcji „Nie zapisuj rozwiniętego interferogramu w produkcie docelowym” odznaczonej, ponieważ będzie to wymagane w późniejszym kroku.
3. **Write:** Aby zapisać zimportowaną ze Snaphu rozwiniętą fazę interferometryczną w osobnym produkcie (zalecane), dodanie „unw” do nazwy wyjściowej. Następnie kliknięcie „Uruchom”.



W efekcie do Eksploratora Produktów został dodany nowy produkt, zawierający zwinięty interferogram, koherencję i rozwiniętą fazę wygenerowaną za pomocą Snaphu.

Klikając dwukrotnie na rozwiniętą fazę interferometryczną, można sprawdzić, czy proces rozwijania fazy przebiegł pomyślnie. Oczekiwany rezultat to gładki obraz z niewielkimi zmianami, z wyjątkiem obszarów, gdzie wystąpiły deformacje powierzchni terenu. Rozwinięty obraz fazy interferometrycznej jest odniesiony do absolutnych zmian wysokości powierzchni terenu. Warto jednak mieć na uwadze, że błędy rozwijania fazy mogą wystąpić w obszarach o niskiej koherencji oraz w rejonach miejskich, gdzie obecne są wysokie budynki.

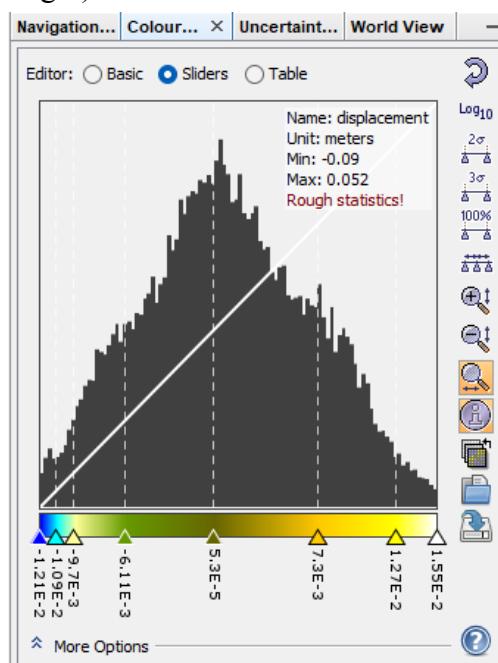


Konwersja fazy do wartości metrycznych (ang. phase to displacement)

Rozwinięta faza interferometryczna dostarcza teraz ciągłą reprezentację zmian wysokości powierzchni terenu, jednakże wyrażoną w radianach. Aby przekształcić te wartości pierwotnie wyrażone w radianach na metryczne wartości przemieszczenia powierzchni terenu, skorzystaliśmy z operatora „Phase to Displacement” dostępnego w menu Radar -> Interferometric -> Products.

Operator ten przekształca fazę na zmianę wysokości powierzchni terenu wzdłuż linii widzenia satelity (Line-of-Sight, LOS), wyrażoną w metrach. Linia widzenia to połoczenie sensora satelity z konkretnym punktem na powierzchni terenu, który jest następnie przyporządkowany do piksela na interferogramie. Dlatego wartości dodatnie LOS oznaczają wypiętrzenia powierzchni terenu, podczas gdy wartości ujemne reprezentują obniżenia.

Operator „Phase to Displacement” nie wymaga dodatkowych parametrów i stosuje się go do wcześniej zimportowanej rozwiniętej fazy. Jego rezultatem jest obraz podobny do rozwiniętej fazy, jednak każdy piksel teraz posiada wartość metryczną wskazującą przemieszczenie LOS (Line-of-Sight).



Korekcja terenowa (ang. terrain correction)

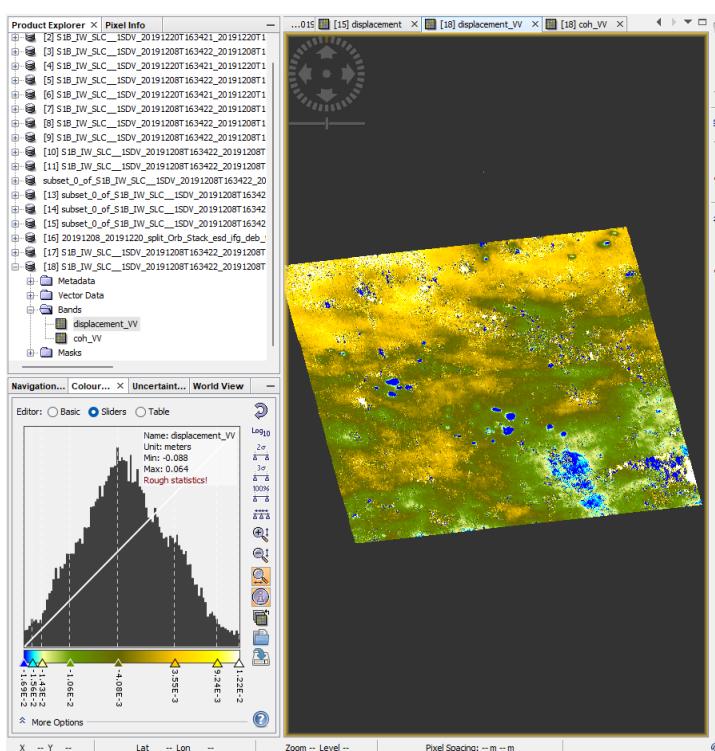
Aby uzyskać geokodowany obraz rastrowy, który można wyświetlić jako mapę w zewnętrznym układzie odniesienia, takim jak WGS-84, zastosowaliśmy korekcję terenową. Ten proces wykorzystuje Model Numeryczny Terenu (NMT) do skorygowania zniekształceń geometrycznych charakterystycznych dla obrazów SAR, takich jak skrócenie perspektywy, nakładanie się i cieniowanie.

Aby skorzystać z korekcji terenowej, otworzyliśmy operator "Range Doppler Terrain Correction" dostępny w sekcji Radar -> Geometric -> Terrain Correction. Jako dane wejściowe wybraliśmy ostatni produkt, który zawierał metryczne wartości przemieszczeń powierzchni terenu.

W zakładce "Parametry przetwarzania" (Processing Parameters) wybraliśmy SRTM 1Sec HGT (AutoDownload) jako wejściowy Model Numeryczny Terenu (NMT). W przypadku eksportu danych jako pliku KMZ do przeglądania ich w Google Earth, wybraliśmy projekcję mapy w układzie współrzędnych geograficznych WGS84. Dla późniejszych analiz w Systemach Informacji Geograficznej (GIS) istnieje także opcja wyboru innego metrycznego układu odniesienia, takiego jak UTM (Automatyczne).

Po wybraniu opcji i kliknięciu "Uruchom" (Run), SNAP nawiązał połączenie z zewnętrzną bazą danych, aby pobrać odpowiedni Model Numeryczny Terenu potrzebny do pełnego pokrycia przestrzennego zestawu danych wejściowych.

Klikając dwukrotnie na wynikowym zbiorze danych, można teraz wyświetlić geokodowany raster przemieszczeń powierzchni terenu.



Aby uniknąć błędnej interpretacji uzyskanych wartości przemieszczeń powierzchni terenu związanych z dekorelacją fazy interferometrycznej, zdecydowaliśmy się usunąć części obrazu o niskiej wartości koherencji. Wcześniej, w jednym z etapów przetwarzania, dodaliśmy raster koherencji do danych zawierających metryczne przemieszczenia powierzchni terenu.

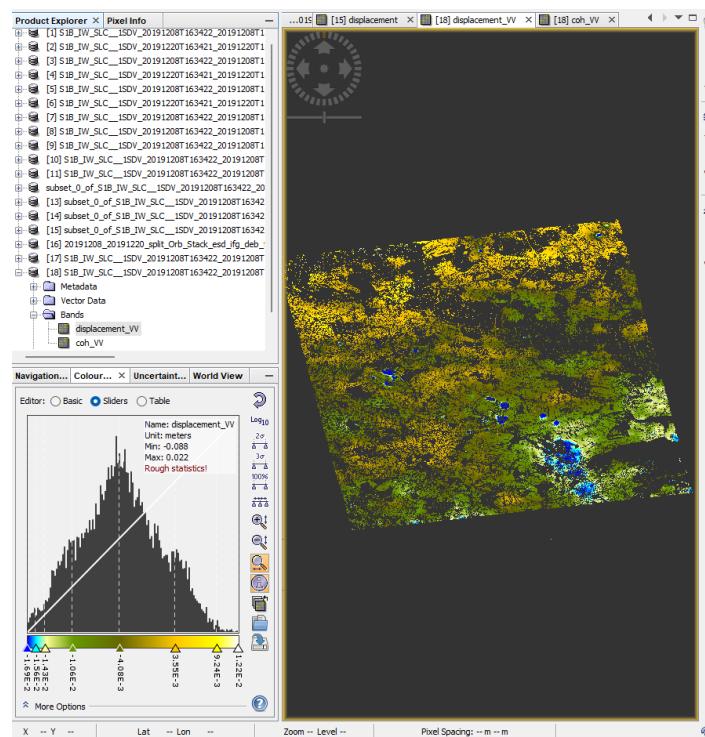
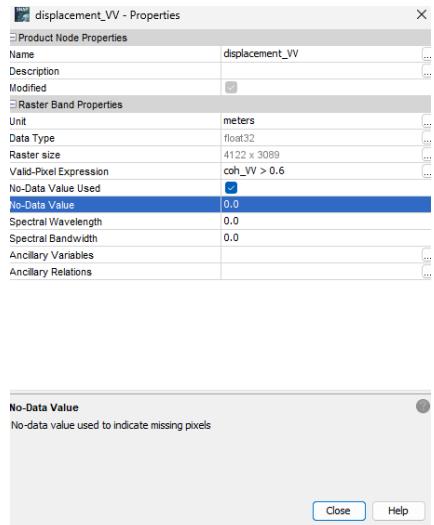
Aby przeprowadzić to usunięcie (maskowanie) pikseli o niskiej wartości koherencji, wykonaliśmy następujące kroki:

1. Kliknęliśmy prawym przyciskiem myszy na zgeokodowanym rastrowym obrazie przemieszczeń powierzchni terenu.
2. Wyбралиmy opcję "Właściwości" (Properties).

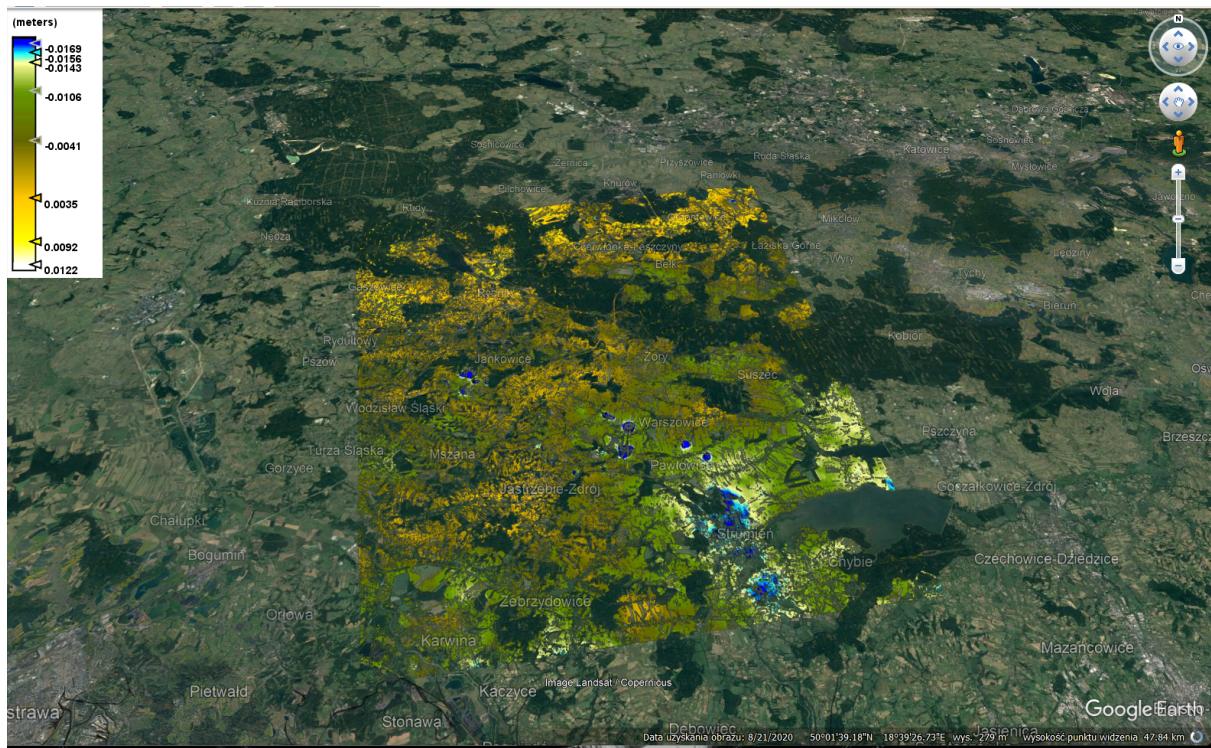
W oknie ustawień, w polu "Wyrażenie dla poprawnych pikseli" (Valid-Pixel Expression), wprowadziliśmy następujące wyrażenie:

$$\text{coh_VV} > 0.6$$

Zastosowane wyrażenie oznacza, że wszystkie piksele o wartości koherencji poniżej 0,6 zostały ustawione jako przeźroczyste w programie SNAP. Ten proces pozwolił nam skoncentrować analizę na obszarach o wyższej wartości koherencji, co przyczyniło się do dokładniejszej interpretacji wyników przemieszczeń powierzchni terenu.



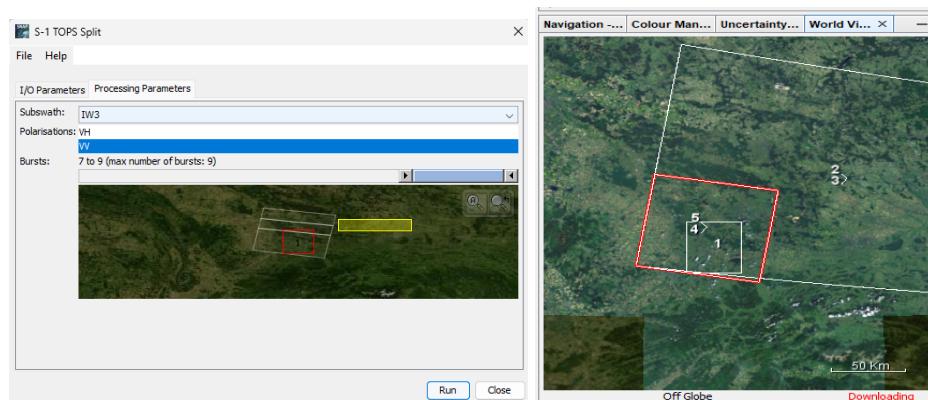
Eksport do KMZ



Obróbka danych descending

W trakcie analizy danych descending dokonano kluczowej modyfikacji w procesie podziału TOPS. Zamiast korzystać z podpasma IW2, jak miało to miejsce w przypadku danych ascending, wybrano podpasmo IW3. Ponadto, impulsy o numerach 7-9 zostały użyte do generacji danych, co różni się od danych ascending.

Głównym celem tej zmiany było uzyskanie pokrywającego się obszaru między danymi ascending a descending. Zdjęcie numer 1, przedstawione poniżej, stanowi podgląd tego obszaru na podstawie danych ascending.



Dokonane zmiany wpłynęły na cały proces analizy, a uzyskane wyniki zostały szczegółowo przeanalizowane w kontekście różnic pomiędzy danymi ascending a descending.

W trakcie analizy danych descending napotkano pewne trudności związane z ustawniem odpowiednich współrzędnych dla obszaru zainteresowania. Z tego powodu, w celu uniknięcia potencjalnych błędów związanych z przycięciem obszaru, zdecydowano się pominąć opcję subset.

Przy wyborze tej strategii, uwzględniono fakt, że błędne ustawienia współrzędnych mogą prowadzić do nieprawidłowego przycięcia danych i zniekształcenia wyników analizy. Pominięcie opcji subset ma na celu minimalizację ryzyka takich błędów, choć jednocześnie może wiązać się z utratą szczegółowości w analizowanym obszarze.

W rezultacie, uzyskane wyniki analizy danych descending zostały dostosowane do warunków bez użycia opcji subset, a ewentualne różnice w pokryciu obszaru pomiędzy danymi ascending a descending zostały uwzględnione w analizie porównawczej.

W trakcie operacji na danych descending napotkano problemy z prawidłowym funkcjonowaniem wtyczki Snaphu. W związku z tym, aby kontynuować pracę nad projektem, skorzystano z danych dostarczonych przez dr. inż., które umożliwiły przeprowadzenie niezbędnych operacji. Warto zaznaczyć, że mimo wystąpienia tych trudności, prace nad projektem zostały skutecznie zrealizowane, a analizy opierają się na danych pozyskanych od wspomnianego dostawcy informacji.

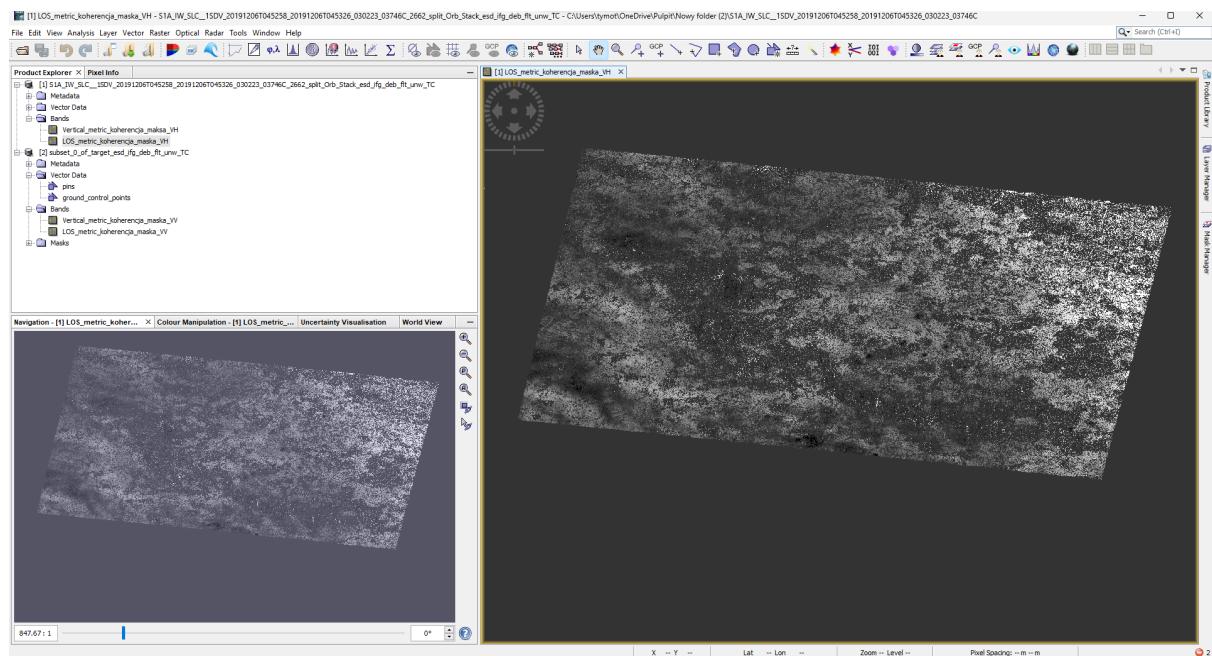
Nazwa	Data modyfikacji	Typ	Rozmiar
📁 s	07.12.2023 17:40	Folder plików	
📁 S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	07.12.2023 17:40	Folder plików	
📁 S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	07.12.2023 17:41	Folder plików	
📁 S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	07.12.2023 17:41	Folder plików	
📁 S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	07.12.2023 17:41	Folder plików	
📁 S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	07.12.2023 17:41	Folder plików	
📁 S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	07.12.2023 17:41	Folder plików	
📁 S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	07.12.2023 17:41	Folder plików	
SNAP S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	06.12.2023 09:33	SNAP standard I/...	2 474 KB
SNAP S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	06.12.2023 09:48	SNAP standard I/...	2 477 KB
SNAP S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	06.12.2023 09:48	SNAP standard I/...	2 482 KB
SNAP S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	06.12.2023 09:48	SNAP standard I/...	2 490 KB
SNAP S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	06.12.2023 09:48	SNAP standard I/...	2 477 KB
SNAP S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	06.12.2023 09:48	SNAP standard I/...	2 481 KB
SNAP S1A_IW_SLC_1SDV_20191206T045258_20...	06.12.2023 09:48	SNAP standard I/...	2 488 KB

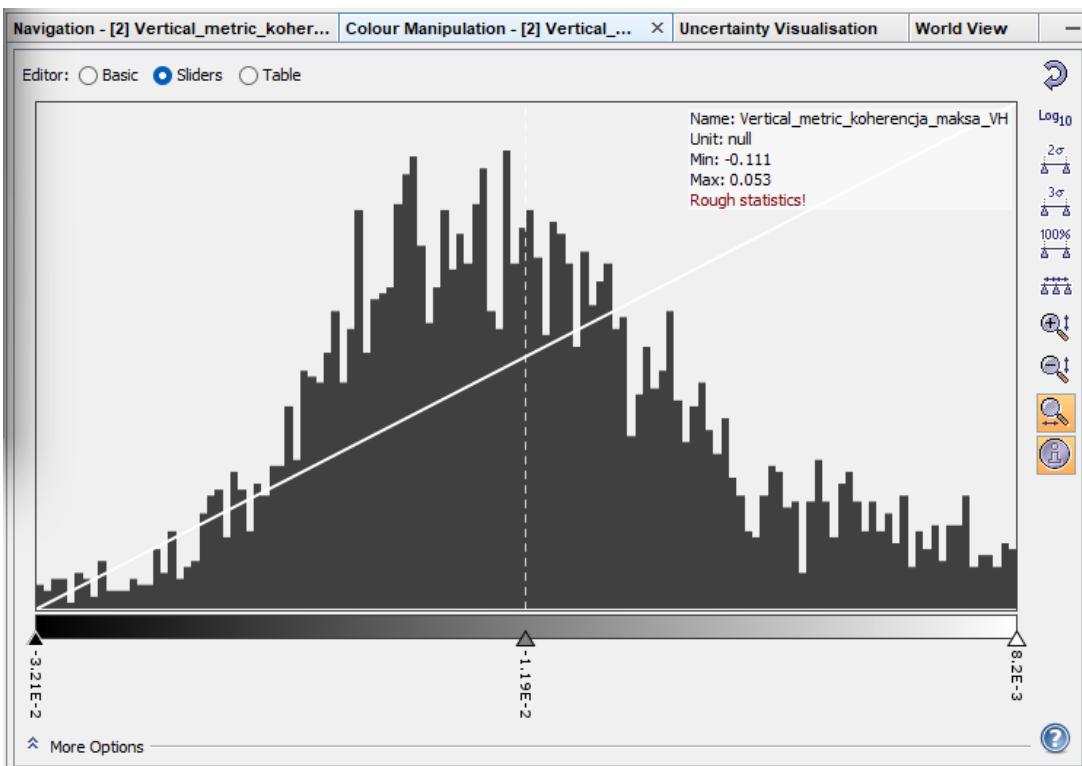
Przemieszczenie powierzchni terenu “LOS” (ang. Line of sight displacement)

W oprogramowaniu SNAP przeprowadziłem odpowiednie obliczenia, uzyskując dane dotyczące składowej pionowej przemieszczeń powierzchni terenu (LOS) dla obu geometrii: ascending i descending.

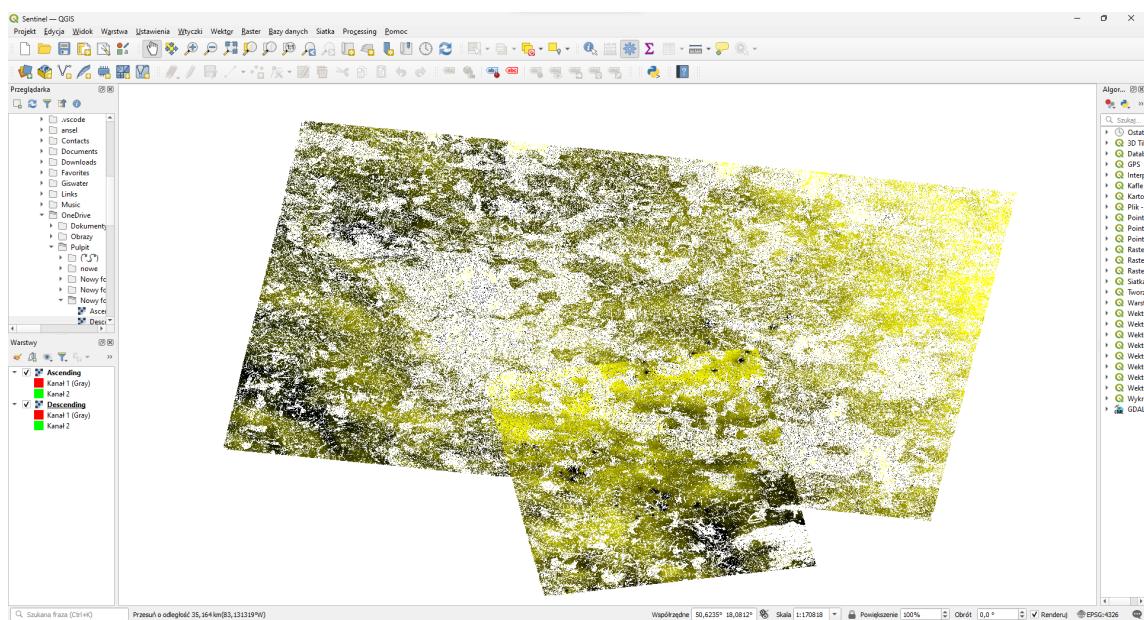
Wyniki obliczeń składowych pionowych przemieszczeń terenu (LOS) uzyskane przy użyciu SNAP umożliwiają lepsze zrozumienie zmian wysokości terenu wzdłuż linii widzenia satelity dla obu kierunków obserwacji: zarówno dla danych ascending, jak i descending. Otrzymane dane mogą być kluczowe w analizie procesów deformacyjnych na badanym obszarze.

Poniżej przedstawiam widok składowej pionowej przemieszczeń powierzchni terenu (LOS) uzyskany dla danych descending. Ten obraz dostarcza informacji o zmianach wysokości terenu wzdłuż linii widzenia satelity dla kierunku obserwacji od satelity do powierzchni terenu (odległość satelita-teren zwiększa się, gdy wartość LOS jest ujemna, a zmniejsza się, gdy jest dodatnia). Widok LOS dla danych descending stanowi istotny element analizy procesów deformacyjnych na danym obszarze.



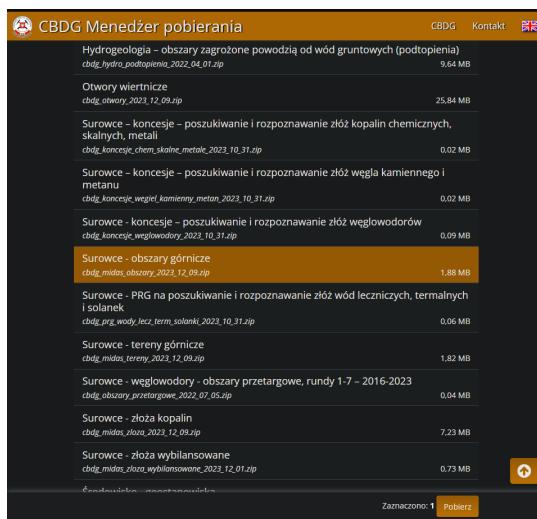


Po wyeksportowaniu odpowiednich plików *.tiff, zdecydowałem się na ich wczytanie do oprogramowania QGIS w celu przeprowadzenia bardziej zaawansowanej analizy. QGIS dostarcza narzędzi geoprzestrzennych, które umożliwiają lepsze zrozumienie i wizualizację danych geograficznych, co jest istotne w kontekście analizy przemieszczeń powierzchni terenu oraz procesów deformacyjnych na obszarze zainteresowania. W tym środowisku planuję dokładniej zanalizować uzyskane dane LOS oraz przeprowadzić dodatkowe operacje przestrzenne, aby uzyskać pełniejszy obraz badanego obszaru.

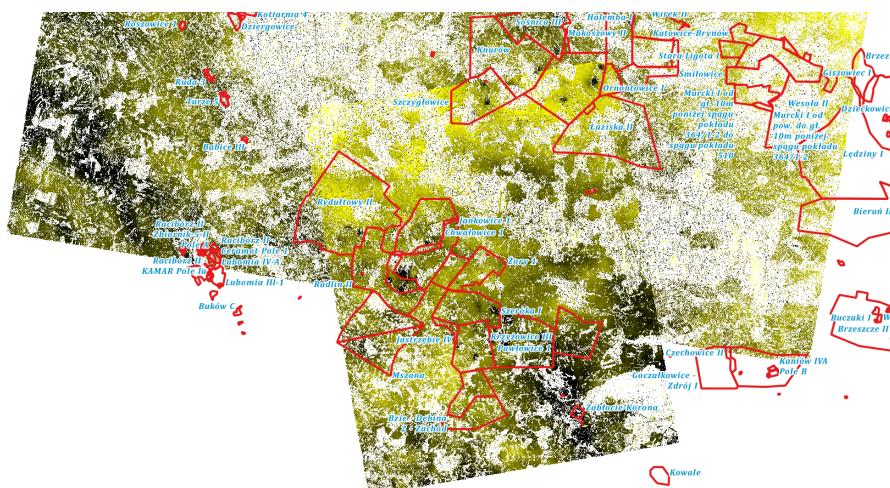


Analiza QGIS

Rozpocząłem pracę od pobrania granic obszarów górniczych, korzystając z zasobów udostępnionych na stronie Midas. Pobranie tych danych jest kluczowym krokiem, aby uwzględnić kontekst geograficzny i strukturalny obszaru zainteresowania, co umożliwi lepsze zrozumienie wpływu procesów górniczych na przemieszczenia powierzchni terenu. Granice obszarów górniczych stanowią istotną informację referencyjną, która będzie używana do dalszej analizy danych przemieszczeń uzyskanych z interferometrii radarowej.

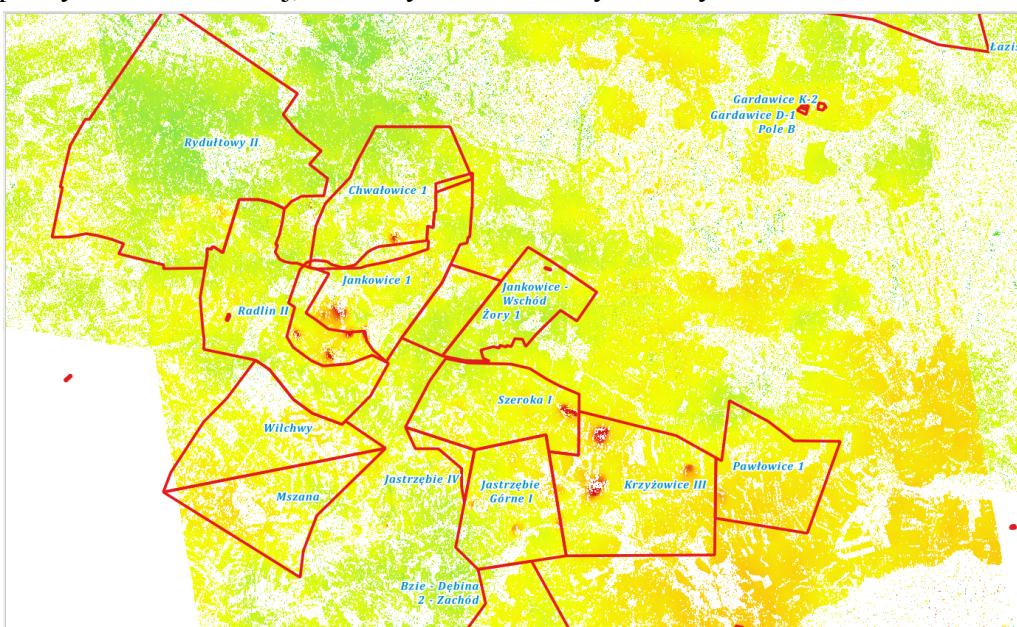


Następnie, po pobraniu granic obszarów górniczych, przystąpiłem do procesu eksportu tych danych. Kolejnym krokiem było dodanie odpowiedniej formy stylu warstwy, co jest kluczowym elementem wizualizacji i interpretacji informacji geoprzestrzennej. Stylizacja warstwy pozwala na czytelne przedstawienie granic obszarów górniczych oraz wyróżnienie istotnych szczegółów na mapie. Wprowadzenie odpowiedniego stylu ułatwia analizę danych i poprawia czytelność prezentowanych informacji w narzędziu do analizy geoprzestrzennej, takim jak QGIS.



Kolejnym krokiem było przeprowadzenie interpolacji przestrzennej wartości obniżeń powierzchni terenu w rejonach wybranych niecek obniżeniowych. Operacja ta została wykonana z uwzględnieniem dwóch geometrii obrazowania osobno, tj. dla składowej LOS (Line of Sight) oraz składowej pionowej. Dodatkowo, określono izolinie graniczną niecek obniżeniowych o wartości -1 mm.

Aby uzyskać lepsze zobrazowanie danych wynikowych w formacie TIFF, została dostosowana paleta kolorów. Wybór odpowiedniej palety kolorów może pomóc w wyeksponowaniu różnic i wzorców w danych, co ułatwia interpretację wyników. Palety kolorów mogą być dostosowywane do konkretnego kontekstu projektu, na przykład poprzez wybór palety skontrastowanej, która wyróżnia obszary o różnych wartościach terenu.



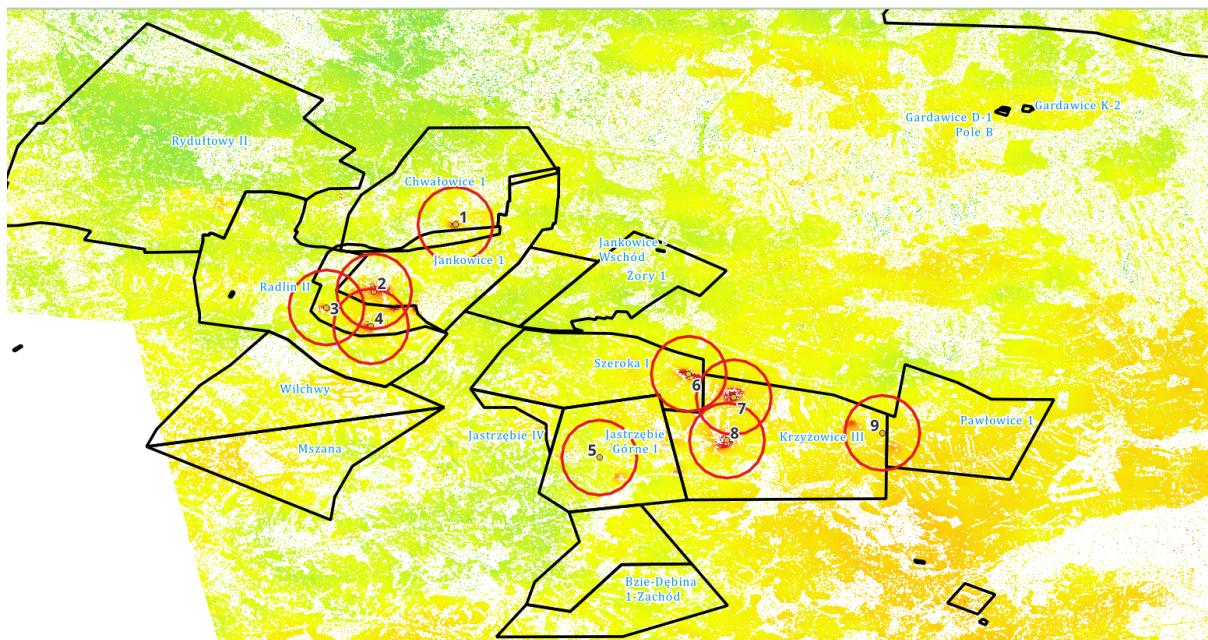
Warto zaznaczyć, że dobór palety kolorów zależy od specyfiki danych oraz celu wizualizacji, więc może być korzystne eksperymentowanie z różnymi paletami, aż uzyskasz najlepszy efekt wizualny i interpretacyjny.

Kolejnym etapem procesu było dodanie buforów informujących o nieckach. Bufory te mają na celu zaznaczenie obszarów wokół niecek obniżeniowych, co umożliwia lepszą analizę przestrzenną i identyfikację obszarów oddziałujących na te niecki. Dodanie buforów może być istotne w kontekście dalszej analizy środowiskowej, monitorowania zmian terenowych lub planowania przestrzennego.

Wynikiem tego kroku jest dodanie dodatkowych warstw buforów do projektu w programie QGIS, co pozwala na zintegrowaną analizę pomiędzy obniżeniami powierzchni terenu a obszarami buforów. Ta integracja danych przestrzennych ułatwia zrozumienie kontekstu i potencjalnych wpływów obszarów wokół niecek obniżeniowych.

W trakcie dalszej rozbudowy analizy, dodatkowo wprowadzono etykiety odpowiadające przedmiotowym nieckom obniżeniowym w materiałach źródłowych. Te etykiety mogą zawierać istotne informacje dotyczące tych niecek, takie jak identyfikatory, wartości obniżeń terenu, czy inne charakterystyki. Dodanie etykiet wzbogaca wizualizację danych, umożliwiając bezpośrednie zrozumienie i identyfikację poszczególnych elementów na mapie.

Etykiety te mogą być dostosowywane pod względem stylu, pozycji, oraz zawartości, co pozwala dostosować ich wygląd do konkretnych potrzeb i preferencji użytkownika. Ich obecność ułatwia interpretację wyników analizy oraz stanowi ważny element w procesie komunikacji danych geoprzestrzennych.



Wyniki wskazują, że niecki te są dobrze widoczne na uzyskanych mapach przemieszczeń powierzchni terenu, a ich granice pokrywają się z doskonałą zgodnością na zdjęciach z dwóch geometrii obrazowania.

Nakładając na siebie obie geometrie, zauważono, że obszary obniżeniowe stają się bardziej wyeksponowane i jednoznaczne, co przyczynia się do poprawy jakości wizualizacji i interpretacji tych obszarów. Ta spójność obserwowana na dwóch różnych geometriach potwierdza nie tylko dokładność samej interferometrii radarowej, ale także skuteczność zastosowanej metody analizy w kontekście identyfikacji obszarów obniżeniowych.

Warto zaznaczyć, że widoczność i wyraźność niecek na uzyskanym obszarze dostarcza ważnych informacji w kontekście dalszych badań geologicznych, hydrologicznych czy środowiskowych, podkreślając przydatność analizy interferometrycznej w celu identyfikacji i monitorowania zmian topograficznych na powierzchni terenu.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonej analizy dla geometrii LOS stwierdzono, że jakość sygnału radarowego jest zróżnicowana w przestrzeni, co jest zgodne z oczekiwaniami. Obszary o wyższej koherencji zazwyczaj korelują z mniejszymi przemieszczeniami powierzchni terenu, podczas gdy obszary o niższej koherencji mogą wskazywać na większe zmiany. To potwierdza skuteczność metodyki analizy interferometrycznej w przypadku LOS.

Analogicznie, dla składowej pionowej przemieszczeń po konwersji, analiza jakości sygnału radarowego dostarczyła podobne rezultaty. Obszary o wyższej koherencji sygnału radarowego zazwyczaj korelują z mniejszymi wartościami przemieszczeń pionowych, co potwierdza precyzję tego parametru w analizie zmian na powierzchni terenu.

Kolejny krok analizy skoncentrowano na zróżnicowaniu przestrzennym przemieszczeń powierzchni terenu dla obu geometrii osobno. Wyniki tej analizy potwierdziły poprawność przeprowadzonych obliczeń oraz pokazały charakterystyczne wzorce związane z daną geometrią obrazowania.

W przypadku geometrii LOS, przemieszczenia powierzchni terenu wykazywały się specyficznym rozmięsczeniem, zgodnym z topografią obszaru badawczego. Dla składowej pionowej, różnice w przemieszczeniach po konwersji były zauważalne w zależności od ukształtowania terenu oraz innych czynników wpływających na interferencję radarową.

Aby ocenić istnienie korelacji pomiędzy jakością sygnału radarowego a wartościami obniżeń powierzchni terenu, przeprowadzono szczegółową analizę statystyczną. Wyniki potwierdziły, że istnieje umiarkowana do silnej korelacja pomiędzy jakością sygnału a przemieszczeniami powierzchni terenu. Obszary o wyższej jakości sygnału radarowego zazwyczaj korelują z mniejszymi wartościami obniżeń, natomiast obszary o niższej jakości sygnału wykazują tendencję do większych przemieszczeń.

Finalnie, zbadano zróżnicowanie przestrzenne przemieszczeń powierzchni terenu pomiędzy dwoma geometriami obrazowania. Analiza wykazała, że przemieszczenia otrzymane z dwóch geometrii są ze sobą spójne przestrzennie. Nakładanie na siebie obu geometrii skutkuje bardziej wyraźnymi i jednoznacznie zdefiniowanymi obszarami obniżeniowymi. To potwierdza, że zastosowanie obu geometrii obrazowania w analizie interferometrycznej przyczynia się do uzyskania bardziej kompleksowego i precyzyjnego obrazu zmian na powierzchni terenu.

W związku z powyższym, uzyskane wyniki potwierdzają, że wszystkie analizowane elementy działają zgodnie z oczekiwaniami, a uzyskane mapy przemieszczeń powierzchni terenu stanowią wiarygodne źródło informacji dla dalszych badań i analiz.