

ЗАСТОСУВАННЯ РАДАРНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ

Передовий досвід підготовки та ведення бойових дій показав, що рельєф є одним з найважливіших елементів змісту будь-якої карти, яка визначає особливості ландшафту певної території. Цифрові моделі рельєфу використовуються при актуалізації цифрових топографічних карт і планів різного масштабу, проведення різного роду інженерних вишукувань, геологічних, біологічних та географічних досліджень.

У статті розглянуто наявні моделі та методи побудови цифрових моделей рельєфу з метою їх порівняльного аналізу на основі комплексування відкритих, загальнодоступних джерел інформації. Наведено підходи побудови цифрових моделей рельєфу та розглянуто інформаційне забезпечення для їх створення. Продемонстровано можливість використання різних джерел даних, призначених для створення цифрової моделі рельєфу: для моделювання задач землеустрою, моделювання гідрологічної мережі, аналізу зони покриття радіочастотних вишок, моделювання задач будівництва, моделювання зон затоплення внаслідок повеней та паводків. За рахунок удосконалювання цифрової моделі рельєфу можливе вироблення нових підходів для їх створення або інтеграція наявних. На сучасному етапі розвитку ЗС України для побудови цифрової моделі рельєфу доцільно використовувати радарну інтерферометрію як відносно швидкий і точний метод побудови цифрової моделі рельєфу. Інтерферометрія – це технологія вилучення висоти рельєфу по фазовій інформації двох знімків. Інтерферометричну обробку проводять на основі використання радіолокаційних даних. Метод передбачає, що одна і та сама територія повинна бути відзнята зі зміщенням у просторі приймальної антени радіолокатора. Таким чином, за рахунок застосування радарної інтерферометрії можливе швидке вироблення нових підходів для створення цифрової моделі рельєфу або поєднання декількох.

Ключові слова: цифрова модель рельєфу, інтерполяційні методи, геометрична модель, кригінг, система радіотехнічного знімання місцевості.

Вступ та постановка задачі. На різних етапах розвитку Збройних Сил завдання аналізу місцевості вирішувалися різними методами. Тривалий час основними джерелами отримання даних про місцевість слугували топографічні карти, дані рекогностування та розвідки (наземної та авіаційної), опитування місцевих жителів та інші джерела [1, 2]. На сучасному етапі розвитку Збройних Сил форма і зміст документів про місцевості суттєво змінилися. Поряд з паперовими картами, які продовжують застосовуватися до теперішнього часу, використовуються дані дистанційного зондування, також з'явилися цифрові та електронні карти місцевості, які суттєво прискорили розвиток геоінформаційних технологій (ГІТ) в автоматизованій системі управління Збройних Сил України (ЗСУ).

Дані про рельєф місцевості є одним з найважливіших елементів змісту будь-якої карти, що визначає особливості ландшафту. Характер рельєфу враховується при освоєнні та заселенні територій, розвитку транспортних мереж, промисловості, сільського господарства і будівництва, веденні і плануванні бойових дій (визначення можливостей відкритого пересування, маскування, умов прохідності, невидимості тощо). Дані про рельєф місцевості є необхідною складовою при створенні і реалізації геоінформаційних проектів різного призначення, ортотрансформуванні даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [3].

Джерелом даних про рельєф зазвичай виступають цифрові моделі місцевості (ЦММ), які містять точні дані про висоту земної поверхні (рослинність та інші висотні антропогенні

об'єкти) і цифрові моделі рельєфу (ЦМР), по англ. Digital Elevation Model (DEM)), що містять дані про висоту безпосередньо над поверхнею землі.

ЦММ містять в собі цифрові шари (моделі) рельєфу, вектори (об'єкти з атрибутивними характеристиками), щільність населення, контингентів військ (адміністративні межі, межі населених пунктів баз зосередження військ і техніки тощо), перешкод (висоти будівель, рослинності та інженерних споруд).

ЦММ створюються в прийнятих для карт проекціях, розграфці, системах координат і висот, з урахуванням законів картографічної генералізації і встановленням необхідних топологічних відношень між об'єктами. Це картографічна модель, що містить дані про об'єкти місцевості та їх характеристики. Вона будується таким чином, щоб була можливість виділення з неї незалежні моделі в прийнятих для топографічних планів умовних знаках рельєфу місцевості, фортифікаційних споруд, комунікацій, будівель і споруд, гідрографії, рослинного покриву тощо.

ЦММ, які використовуються в геоінформаційних системах (ГІС) дозволяють здійснювати різні розрахунки по поверхні рельєфу. Серед них можна виділити:

- обчислення ухилів і експозиції схилів, що дуже важливо при будівництві доріг, наведенні переправ і розрахунку часу їх подолання;
- одержання морфометричних та інших даних про рельєф місцевості;
- аналіз поверхневого стоку на території;
- моделювання затоплення територій під час руйнування дамб, гребель артилерією або авіацією;
- аналіз видимості, при плануванні комунікаційних мереж та ряді інших військових завдань;
- ортокоррекцію зображень;
- вимір площ і обсягів, отримання профілів поверхні;
- перегляд даних у трьох вимірах, створення віртуальних польотів над місцевістю;
- інших обчислювальних операціях і графоаналітичних побудовах.

Під ЦМР розуміють тривимірну математичну модель відображення земної поверхні, що подається у вигляді масиву точок з визначеною висотою по всій області їх простягання. Найчастіше як приклад, наводять рельєф, проте поверхнями можна подати температуру, концентрації забруднення території тощо.

ЦМР необхідна для одержання максимально детальної інформації про рельєф місцевості, певної території, при актуалізації цифрових топографічних карт і планів різного масштабу, проведення різного роду інженерних вишукувань, геологічних, біологічних та географічних досліджень.

Найбільш поширеними застосуваннями ЦМР на сучасному етапі є такі:

- визначення особливостей місцевості;
- побудова профілів, горизонталей та розрізів рельєфу;
- прогнозування безпечності будівництва фортифікаційних споруд, аеродромів, портів, інженерних споруд;
- прогнозування змін рельєфу місцевості при нанесенні ударів військової авіації, балістичних і крилатих ракет, застосуванні ядерної зброї;
- моделювання радіовидимості;
- моніторингу стратегічно важливих територій і об'єктів.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Одним з напрямків розвитку сучасних ГІС є автоматизація процесів отримання ЦМР. Дослідженням рельєфу місцевості і розробкою алгоритмів створення ЦМР займалися Бурштинська Х.В., Городинський І.В., Дорожинський О.Л., Костін А.В., Ласточкін О.М., Рудий Р.М, Хромченко А.І., Черваньов І.Г., Poul Frederiksen, Ole Jacobi, Kurt Kubik та інші. Ними розроблені методики побудови ЦМР та різні способи створення 3D моделей.

Визнаючи наукову і практичну цінність розробок названих авторів, треба відзначити, що проблема оцінки можливостей цих алгоритмів щодо точності і швидкодії ще далека від свого завершення і потребує глибокого системного опрацювання.

Метою статті. Є задача проведення порівняльного аналізу існуючих методик побудови максимально коректних ЦМР на основі комплексування відкритих, загальнодоступних джерел інформації, до яких перед усім відносяться супутникові дані – AsterGDEM (Global Digital Elevation Model) та SRTM (Shuttle radar topographic mission); топографічні карти масштабу 1:200000, 1:100000.

Виклад основного матеріалу. Сьогодні тривимірне подання рельєфу засобами сучасних ГІТ є одним із напрямків у геоінформатиці при ситуаційному моделюванні (тренажери, командні навчання тощо), аналізі проектів і рішень (дорожнє будівництво та архітектура), розвитку транспортної і інженерної інфраструктури, в промисловості і сільському господарстві, моніторингу надзвичайних ситуацій, в моделюванні родовищ корисних копалин, як засіб найбільш ефективної просторової організації різночасових даних, для виконання аналітичних розрахунків і як інструмент підтримки прийняття управлінських рішень, який дуже швидко розвивається.

Сукупність основних задач, що можуть розв'язуватись за допомогою ЦМР представлена на рис.1. Список розглянутих задач, де можуть використовуватися глобальні ЦМР не є вичерпним і він потребує подальшого розширення і аналізу. Оскільки рівень вимог щодо точності цифрового опису рельєфу, як системоутворюючого фактора місцевості, багато в чому визначається типом наукової або інженерно-технологічної задачі, методами її розв'язання, вартістю, наявним програмним забезпеченням то перед споживачем стоїть задача вибору джерел даних, які багато в чому визначають розрізнення моделі і алгоритмами створення ЦМР [3].

Джерелами даних для створення ЦМР можуть слугувати дані ДЗЗ, аерофотознімки, фотограмметричні виміри, дані систем супутникового позиціонування, наземні геодезичні зйомки, дані промірних робіт і ехолотування, лазерного сканування місцевості, картографічні дані тощо [3]. Висока швидкість проведення вимірів і ефективність зйомки забудованих площ, таких як міські території надають повітряному лазерному скануванню низку переваг порівняно з іншими видами побудови ЦМР. Отриманий в результаті 3D масив точок високої щільності і точності фактично є цифровою моделлю рельєфу, яка може бути основою для ортофотопланів, цифрових топографічних планів масштабів 1:500 і дрібніше, тривимірних моделей рельєфу і об'єктів місцевості [3, 4].

ЦМР для великих територій можна отримати різними способами, зокрема при радіометричному зніманні місцевості, яке було зроблене на всю територію поверхні Землі (крім полюсів) радаром, запущеним у космос за допомогою космічного корабля Shuttle американським космічним агентством NASA – CGIAR. Створити ЦМР можна і на основі фотограмметричних способів. Застосування методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) і фотограмметрії, де існує велика кількість напрацьованих і перевірених методик дозволяють створювати досить точні і достовірні цифрові моделі місцевості, точність результатів яких є переконливою. Проте, використання матеріалів ДЗЗ передбачає велику кількість контрольних вимірів, застосування спеціалізованого сертифікованого програмного забезпечення [5, 6].

На сьогодні популярним є створення ЦМР на основі ДДЗ та SRTM. SRTM (Shuttle radar topographic mission) – міжнародна місія з отримання даних цифрової моделі рельєфу території Землі. В результаті цієї міжнародної програми були отримані топографічні дані для бази даних Землі у майже глобальному масштабі від 56° південної широти до 60° північної широти [7, 8].

Можливість використання SRTM та ASTER GDEM для території України досліджена в праці [9], де засвідчено що для території України дані SRTM та ASTER GDEM забезпечують точність по висоті 3-8 метрів. ASTER GDEM – інструмент здатний здійснювати спостереження з високою роздільною здатністю в інфрачервоній, видимій і тепловій областях електромагнітного спектру.

ЦМР створюються на основі нерегулярних триангуляційних мереж TIN та регулярних сіток GRID (рис. 2).

У тій чи іншій мірі глобальні ЦМР можуть забезпечити розв'язання поставлених задач, навіть без залучення додаткових даних. Традиційний підхід до 3D-моделювання рельєфу місцевості полягає в реалізації технологічної схеми TIN (Triangulated Irregular Network) моделі ЦМР, яка включає етапи (рис. 3).

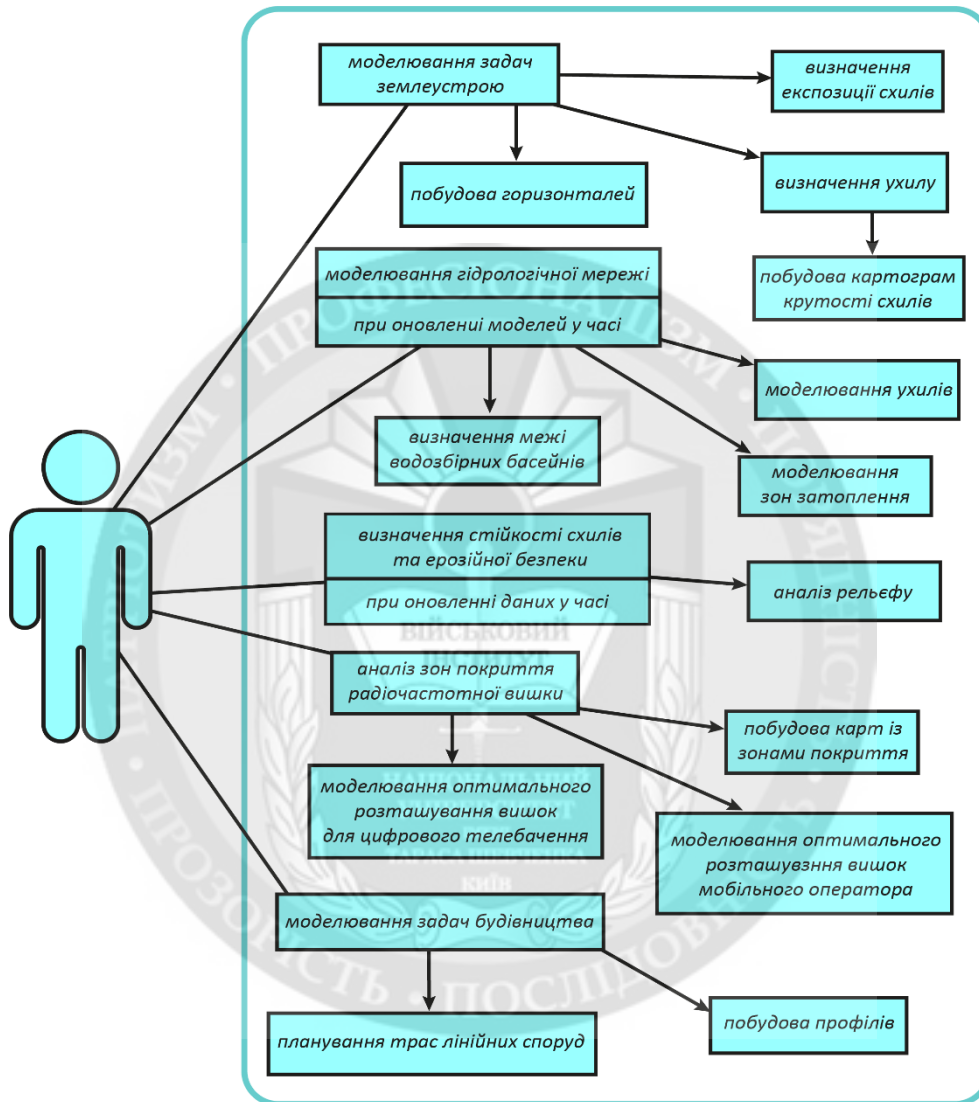


Рисунок 1 – Сукупність задач, що можуть розв'язуватись за допомогою ЦМР

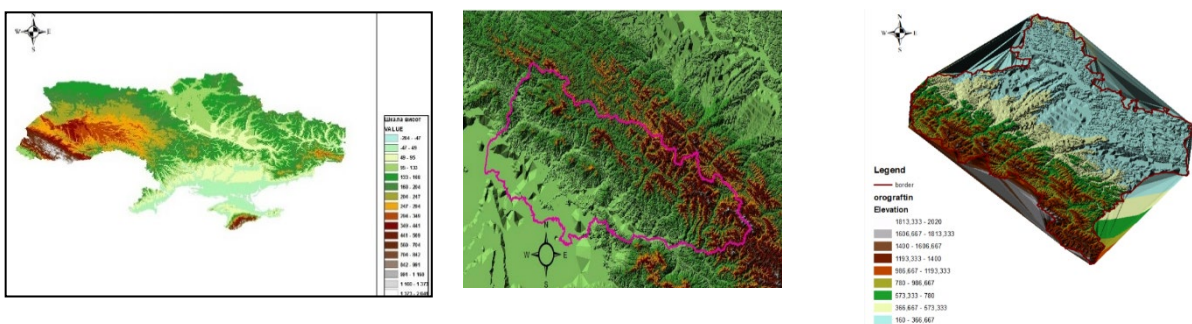


Рисунок 2 – Карта рельєфу України, Закарпатської та Івано-Франківської областей



Рисунок 3 – Технологічна схема традиційного створення ЦМР на основі TIN-моделі

В основі методів моделювання (побудови) безперервних поверхонь на основі дискретних (точкових) масивів просторово-координованих даних лежать процедури просторової інтерполяції. При цьому використовуються як стохастичні, так і детерміновані дані. На сьогодні існує багато методів, які дозволяють розв'язувати цю задачу. Серед них – інтерполяція на основі триангуляції Делоне, метод зворотно зважених відстаней, метод природної околиці, методи сплайн-апроксимації, трендів, радіальних базисних функцій, кригінг, метод “Топо в растр” та ряд інших. Кожен з методів просторової інтерполяції має свої переваги і недоліки, які доцільно врахувати при виборі того чи іншого методу при побудові ЦМР. Крім того вибір методу інтерполяції наявних даних також залежить від кількості вихідних точок даних і рівномірності їх розподілу в області інтерполяції. На сучасному етапі розвитку ЗС України доцільно використовувати для побудови ЦМР радарну інтерферометрію, як відносно швидкий і точний метод побудови ЦМР.

Інтерферометрія – це технологія вилучення висоти рельєфу по фазовій інформації двох знімків. Інтерферометричну обробку проводять на основі використання радіолокаційних даних. Метод розуміє, що одна і та сама територія повинна бути відзнята зі зміщенням у просторі приймальної антени радіолокатора [10]. Інтерферометричний SAR (InSAR) технологія яка використовує різницю фаз принаймні двох комплексних зображень SAR, отриманих з різних позицій на орбіті та/або в різний час. Інформацію, отриману з цих наборів інтерферометричних даних можна використовувати для вимірювання кількох геофізичних величин, однією з яких є рельєф [11].

Проміжок часу отримання даних декількох фаз становить від кількох до десятків днів, залежить від плану польотів супутників. Використовуючи повторні супутникові нальоти, озброєні спеціалізованими передавальними і приймальними пристроями SAR (Synthetic Aperture Radar) дозволяє сканувати поверхню Землі на площі в багато тисяч км² практично одночасно. Ефект сканування, що здійснюється за допомогою радіолокаційної хвилі, спрямованої на Землю, є так званою радарограмою (растровим зображенням). Під час запису в окремих пікселях зображення зберігається інформація про інтенсивність відбиття радіолокаційної хвилі від поверхні Землі та фазу цього сигналу в момент його повернення на приймач.

При проведенні інтерферометричної обробки можливе отримання цифрової моделі рельєфу (у разі використання інтерферометричної пари), а також отримання даних про зміщення поверхні при використанні методів диференціальної інтерферометрії, які передбачають сумісну обробку різночасової зйомки. Основними етапами виконання робіт для побудови ЦМР є формування інтерферограми, фільтрація, розрахунок когерентності та розвертка фази. Дані операції в результаті дають можливість використовувати зв'язок інтерферограми з рельєфом і створити ЦМР. Інтерферометричний метод має теоретично високу точність результатів, що поєднуються з довжиною хвилі використовуваного джерела випромінювання. Для побудови високоточної цифрової моделі рельєфу за радіолокаційним зніманням, необхідно два проходження по одній і тій же території радарними супутниками (наприклад, Sentinel-1), при цьому для підвищення точності моделі необхідне використання орбітальних даних про положення супутника на момент зйомки (Sentinel-1 надає такі дані).

Технологія диференціальної інтерферометричної обробки полягає у формуванні інтерферограми, яка у спрощеному вигляді являє собою результат перемноження пари

комплекснозначних радарних зображень однієї й тієї самої місцевості, отриманих ідентичними знімальними SAR-системами з близько розташованих точок орбіти. При цьому різниця значень фазових циклів у межах кожного пікселя на інтерферограмі - це величина відносної зміни відстані між відбивачем (поверхня, що зондується) і антеною радара SAR [12].

Супутники SAR випромінюють радіолокаційні хвилі та вимірюють амплітуду та фазу (частку повної хвилі) відбитих хвиль для кожного пікселя зображення. Інформація про фазу може бути дуже точно виміряна супутником і є основою для радіолокаційної інтерферометрії. У своїй найпростішій формі InSAR об'єднує два (точно вирівняних) зображення SAR однієї сцени в «інтерферограму», обчислюючи різницю у фазі радіолокаційних хвиль [13].

Складання двох радарограм однієї області знятих за певний інтервал часу дозволяє розрахувати різницю фаз радіолокаційних сигналів у відповідних пікселях. Це значення зі знанням довжини хвилі обробляється чисельно, отримуючи інформацію про висоти поверхні місцевості. Цю інформацію несе інтерферограма – продукт комп'ютерної обробки пари радарограм.

Результуюча різниця фаз, інформація про яку міститься в інтерферограмі, є функцією рельєфу місцевості, зміщення земної поверхні, атмосферних ефектів і помилок вимірювань [14]:

$$\varphi = \varphi_{top} + \varphi_{dis} + \varphi_{atm} + \varphi_{err} . \quad (1)$$

де φ_{top} – зміна фази, що пов'язана з рельєфом місцевості (за рахунок огляду місцевості під двома різними кутами);

φ_{dis} – зміна фази за рахунок зміщення відбиваючої поверхні в період між знітками;

φ_{atm} – виникає за рахунок відмінності довжини оптичних шляхів із-за переломлення в атмосфері;

φ_{err} – зміна фази в результаті електромагнітного шуму, помилок моделювання, тощо.

Комплексна інтерферограма обчислюється за формулою:

$$I = M \cdot S^* , \quad (2)$$

де $M = |M|e^{i\varphi_M}$ – комплексний сигнал основного знімку;

$S = |S|e^{i\varphi_S}$ – комплексний сигнал додаткового знімку, «зірочка» означає комплексне сполучення.

Тоді формулу (2) можна переписати у вигляді:

$$I = |M| \cdot |S| e^{i(\varphi_M - \varphi_S)} = |M| \cdot |S| e^{i\Delta\varphi} . \quad (3)$$

В подальшому, із $\Delta\varphi$, отриманого за формулою (3) у відповідності з попередньою (1) необхідно вирахувати зміну фази, що не пов'язані зі зміщенням Землі. Позначаються ці зміни через $R = e^{i\varphi_R}$.

В результаті формула (2) має вигляд:

$$I = M \cdot S^* \cdot R^* , \quad (4)$$

А зміна фази розраховується за формулою:

$$\Delta\varphi = \varphi_M - \varphi_S - \varphi_R . \quad (5)$$

Цикли різниці фаз в інтерферограмі називаються «смугами» і викликані згортанням фази, оскільки спостережувана частка хвилі ніколи не перевищує один цикл хвилі. Залежно від напрямку огляду супутника, кожна смуга відповідає зменшенню або збільшенню діапазону

на половину довжини хвилі SAR вздовж лінії видимості супутника. Ці згорнуті різниці фаз часто придатні для цілей візуалізації, але багатьом програмам потрібна розгорнута (безперервна) інформація про різницю фаз, яку можна отримати шляхом застосування передових математичних алгоритмів розгортання фаз [13].

Інтерферограма показує у відповідно обраній колірній шкалі різницю фаз радіолокаційних сигналів у відповідних пікселях встановленої пари радарограмм. Зони різних висот поверхні Землі (наприклад, западини) на інтерферограмі виглядають у вигляді характерних кольорових смуг із повторюваною послідовністю кольорів. Залежно від використовуваної колірної палітри та довжини хвилі радара, що використовується для сканування місцевості, кожен колір відповідає вертикальній зміні висоти з певним фіксованим значенням. Довжини хвиль радара, які зараз використовуються для сканування поверхні Землі, можуть виявляти зміни висоти в субміліметровому діапазоні [11].

Основою правильної побудови ЦМР зареєстрованих методом InSAR є хороша якість інтерферограм. Це залежить головним чином від когерентності використовуваних радіолокаційних зображень. Зафіксована на інтерферограмі фаза знаходиться в інтервалі від $-\pi$ до π , але її дійсно значення може далеко виходити за ці межі. Відновлення фази (phase unwrapping, інакше — розгортання фази) дозволяє відновити справжнє її значення за допомогою додавання або вирахування кратного 2π числа до фази таким чином, щоб зробити відповідну фазову картину максимально гладкою [14]. Тимчасові та перпендикулярні базові лінії (у поєднанні з областю інтересу та наявністю даних) встановлюють граничні умови для застосування InSAR. Оскільки ця техніка ґрунтується на порівнянні фази кожного пікселя на двох або більше зображеннях, фази мають бути достатньо когерентними у своєму радарному відбитті, щоб їх можна було порівнювати. Чим більше часу пройшло між двома зображеннями, тим більша ймовірність того, що якийсь об'єкт або елемент, який сприяє відображенню в цьому пікселі, зміниться. Це спричиняє втрату когерентності та зрештою призводить до повної декореляції між двома пікселями. Втрата когерентності також виникає з більшими перпендикулярними базовими лініями.

Інтерферограма з помірною перпендикулярною базовою лінією та невеликою тимчасовою базовою лінією дуже добре покаже локальну топографію території. Використання методу InSAR при дослідженні висотних характеристик місцевості дозволяє отримувати просторову інформацію без необхідності проведення прямих робіт по вимірюванню інформацію про топографію в польових умовах.

Практична побудова цифрової моделі рельєфу. Інтерферометричний радар із синтетичною апертурою (InSAR) використовує різницю фаз між двома комплексними зображеннями SAR, отриманими з різних положень датчиків, і витягує інформацію про земну поверхню. Сигнал SAR містить інформацію про амплітуду та фазу. Амплітуда – це потужність відгуку радара, а фаза – це частка одного повного циклу синусоїдальної хвилі (одна довжина хвилі SAR). В першу чергу це визначається відстанню між супутниковою антеною та наземними цілями. Об'єднавши фазу двох зображень після спільної реєстрації, можна створити інтерферограму, інформація якої сильно корелює з топографією зображення, отримані з дещо інших позицій датчика, і витягує інформацію про земну поверхню [15].

Побудувавши таким чином інтерферограму можна обрахувати абсолютні відмітки висот для обраної території і побудувати ЦМР.

Для отримання ЦМР з даних радарної зйомки потрібно виконати ряд кроків і обрахунків. Насамперед потрібно підібрати актуальні дані, які підходять для даного процесу.

Для побудови якісної інтерферограми та визначення з її допомогою висоти або розміщення поверхні необхідно, щоб два зображення мали високу когерентність (умова інтерференції), а також були поєднані геометрично з високою точністю. При підборі пари знімків актуально було дотримуватися таких правил:

- мінімальний часовий проміжок між знімками (в ідеалі до 2 тижнів);
- відповідна базова лінія: відстань між орбітальними положеннями супутників на момент отримання зображення (найкращий варіант, якщо від 150 до 300 метрів).

Для побудови ЦМР було обрано територію Надвірнянського району Івано-Франківської області (рис. 4).

Було завантажено дані радіолокаційного знімання Sentinel-1 інтерферометричного режиму з широкою смугою (IW). Всі дані було завантажено з сервісу scihub.copernicus.eu. Завантажено два набори даних за березень 2021 р., що задовольняє умови в проміжку часу для отримання коректної ЦМР. Перпендикулярна базова лінія більше 150 м.

Для побудови ЦМР з радарних знімків обрано програмне забезпечення SNAP, що має інструментарій для роботи з набором даних Sentinel-1.



Рисунок 4 – Територія Надвірнянського району Івано-Франківської області для побудови ЦМР за даними Sentinel-1 (знімок підтягнуто в ArcGIS з онлайн шару basemap)

Платформа додатків Sentinel або коротко SNAP – безкоштовне та відкрите програмне забезпечення, яке включає в себе набір виконуваних інструментів і інтерфейсів програмування додатків (API), які були розроблені для полегшення використання, перегляду та обробки різноманітних даних дистанційного зондування. Функціональність SNAP доступна через Sentinel Toolbox. Мета Sentinel Toolbox полягає не в тому, щоб дублювати існуючі комерційні пакети, а в тому, щоб доповнити їх функціями, призначеними для обробки продуктів даних із супутників спостереження Землі [16].

Для побудови ЦМР за даними радіолокаційного знімання в SNAP можна виділити таку послідовність кроків, що потрібно зробити:

- попередня обробка даних (завантаження знімків, завантаження точних даних про орбіти і виділення потрібної території);
- об'єднання пари знімків;
- створення інтерферограми;
- розгортання фази;
- переведення радіанних значень в абсолютні висоти території;
- проведення радіометричної корекції.

Насамперед для можливості виконання всіх кроків в SNAP додатково встановлено плагін *SnapHu*. Даний плагін відповідає за розгортання фази і відповідно отримання даних про абсолютні висоти. Після встановлення плагіну було завантажено датасет в SNAP. Вхідними даними для обробки є інтерферометрична пара, що складається з основного і додаткового радарних знімків (рис. 5).

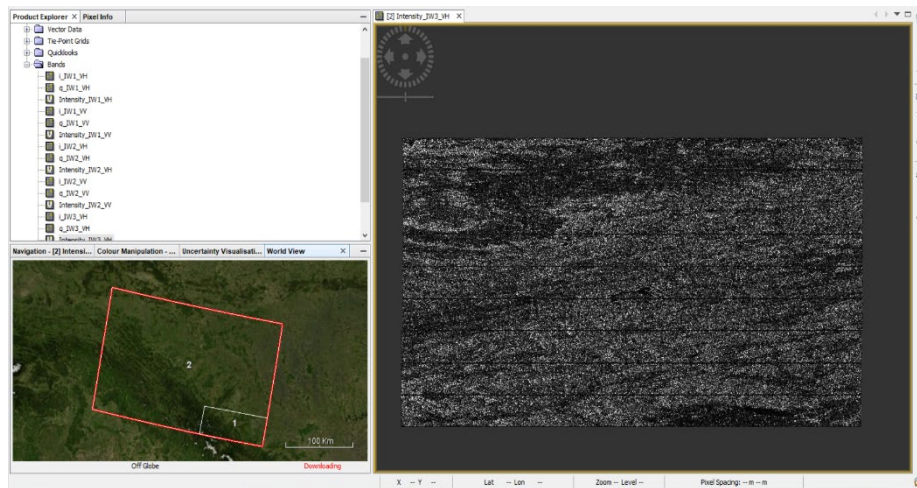


Рисунок 5 – Дані Sentinel-1 з сервісу scihub.copernicus.eu за 20 березня 2021 р. візуалізовані в SNAP

Дані Sentinel-1 покривають велику територію і розрахунок за ними є досить затратними, тому актуально перед обробкою провести відбір даних, що покривають обрану територію. Датасети складається з окремих 27 знімків, для обраної території актуально відібрати 2 із них. Для цього застосовується інструмент S-1 TOPS Split, щоб вибрати лише ті пакети, які потрібні для аналізу. В налаштуванні інструменту вибирається підсмуга IW2 і поляризація VV у параметрах обробки. Дана процедура повторюється для кожного з двох наборів даних (рис. 6).

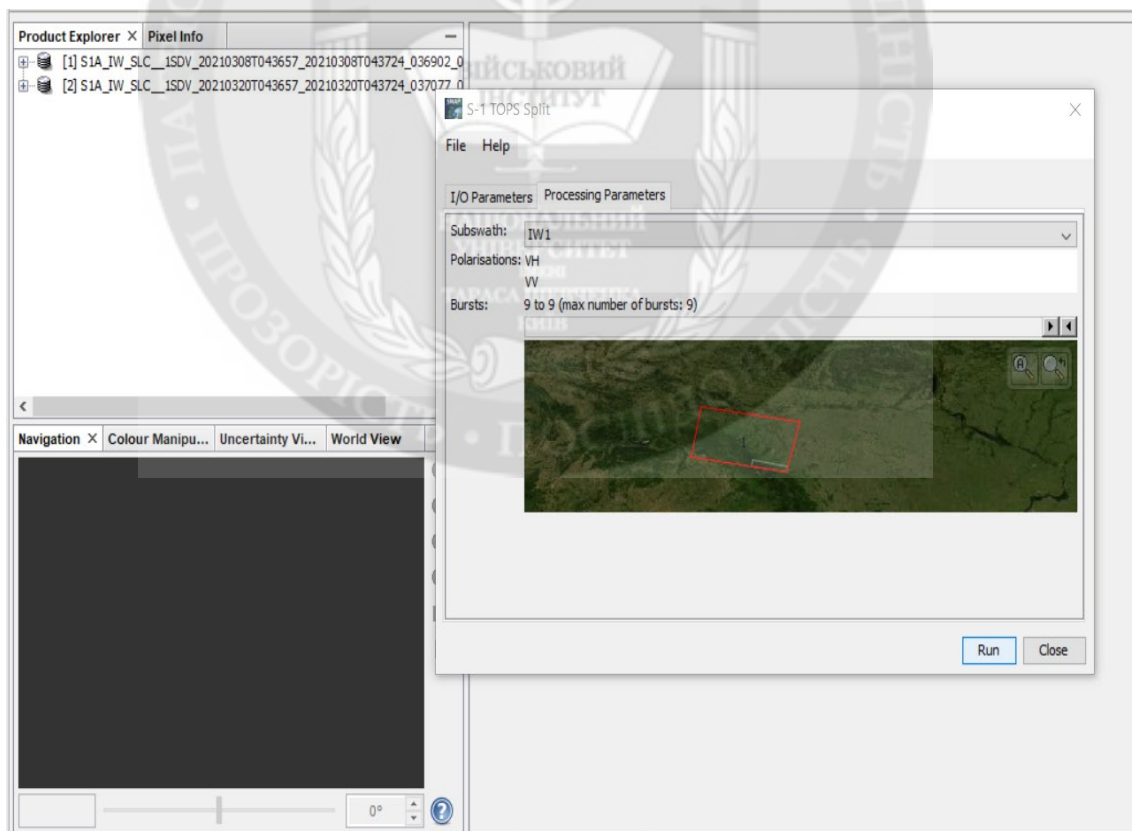


Рисунок 6 – Інструмент S-1 TOPS Split в SNAP для відбору потрібних даних, що покривають обрану територію

Для побудови інтерферограми в подальшому актуально завантажити дані орбіт про точне розташування супутника в просторі під час знімання території за допомогою інструменту Apply orbit file, використання якого повтворюється для кожного набору даних.

Після завантаження даних про орбіти потрібно провести об'єднання двох окремих датасетів для їх обробки в комплексі. Даний процес відбувається на основі раніше завантаженого файлу орбіт і автоматично підвантаженого програмою SNAP знімку SRTM (може бути інший за вибором), що відповідає за прив'язку знімків до однієї системи координат. На даному етапі використовується інструмент S-1 Back Geocoding (coregistration > s1 tops coregistration > S-1 Back Geocoding). Також що підвищити якість реєстрації знімків застосовано інструмент S-1 Enhanced Spectral Diversity, для корекції зміщення дальності й азимута (рис. 7).

Наступним етапом є побудова інтерферограми, що формується перехресним множенням еталонного зображення на комплексне сполучення вторинного. Амплітуда двох зображень множиться, а фаза представляє різницю фаз між двома зображеннями. Разом з цим обчислюються смуги когерентності, що показують наскільки схожі пікселі між двома зображеннями за різні дати [15].

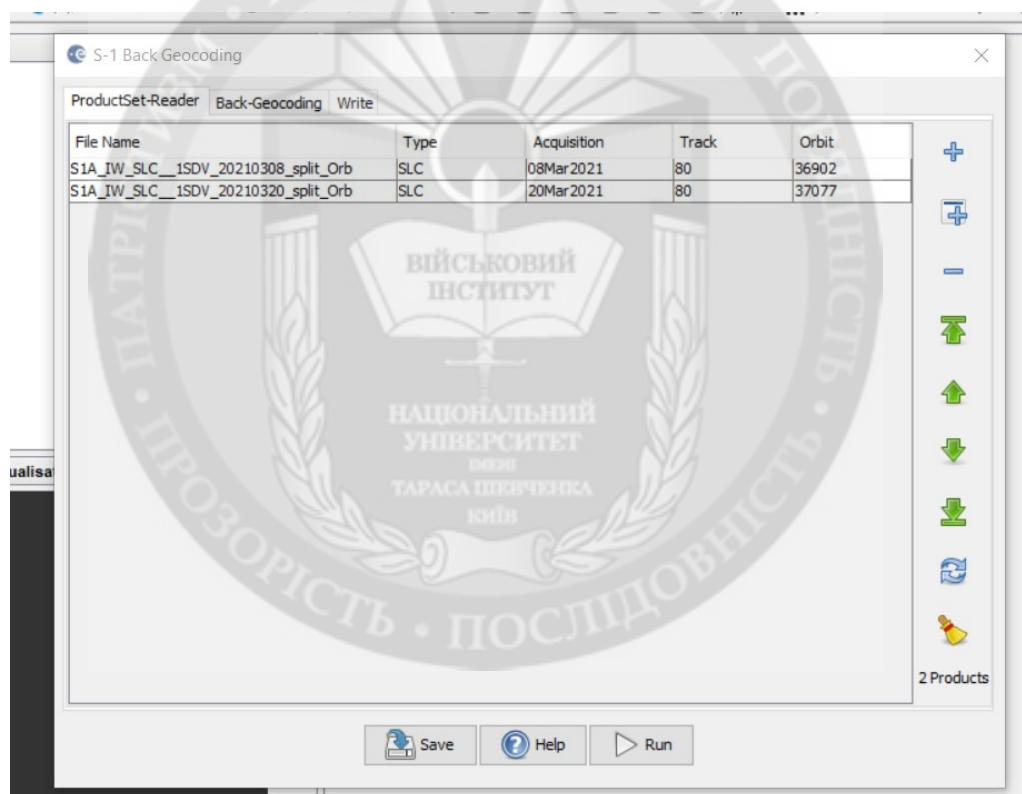


Рисунок 7 – Інструмент S-1 Back Geocoding в SNAP для об'єднання датасетів Sentinel-1 (в інструменті також відображаються дати збору даних і номери орбіт)

Для виконання даного етапу в SNAP використовується інструмент Interferogram Formation operator (under Radar > Interferometric > Products > Interferogram Formation) (рис. 8).

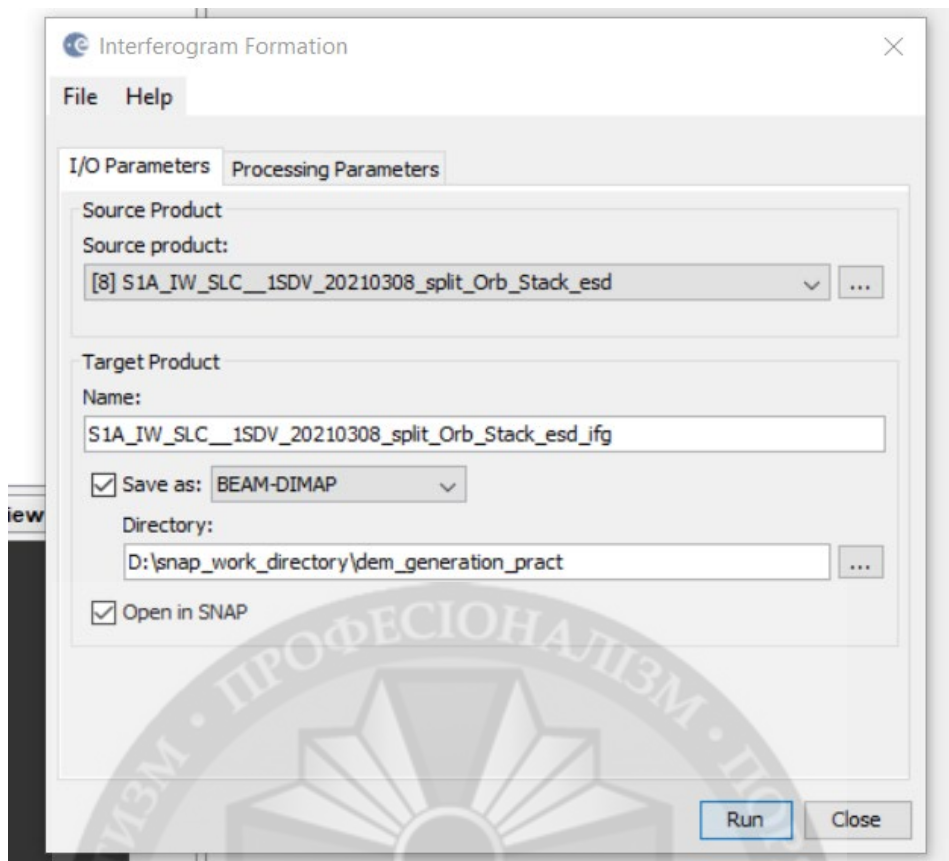


Рисунок 8 – Інструмент Interferogram Formation в SNAP для побудови інтерферограми

В результаті отримуємо інтерферограму і смугу когерентності для відібраних раніше смуг, що покривають досліджувану територію. Інтерферограма відображається в райдужній кольоровій шкалі, що включає в себе рельєф, атмосферу та потенційну деформацію поверхні (вважається нульовою). Ділянки фазової декореляції виглядають на інтерферограмі як шум (рис. 9).

Оскільки дані подані у вигляді одиничних смуг (відібрано два знімки), то між ними можна спостерігати шов, що є недопустимим для подальшої побудови ЦМР. Для видалення швів застосовується інструмент S-1 TOPS Deburst до інтерферограми. На виході отримуємо ж ті самі дані, але вже без швів (рис. 10).

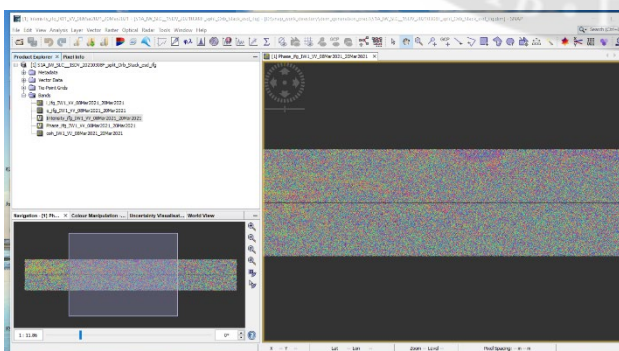


Рисунок 9 – Побудована інтерферограма в SNAP за відібраними даними



Рисунок 10 – Інтерферограма після використання інструменту S-1 TOPS Deburst для видалення швів між смугами (знімками)

Інтерферометрична фаза може бути спотворена шумами часової та геометричної декореляції, об'ємним розсіюванням та іншими помилками обробки. Фазова інформація в областях, пов'язаних з декоруванням, не може бути відновлена, але якість смуг, що існують на інтерферограмі, може бути підвищена шляхом застосування спеціалізованих фазових фільтрів, таких як фільтр Гольдштейна, який використовує швидке перетворення Фур'є для покращення співвідношення сигнал/шум зображення [15].

Для цього застосовується інструмент Goldstein Phase Filtering (under Radar > Interferometric > Filtering). Результатом буде відфільтроване фазове зображення (рис.11).

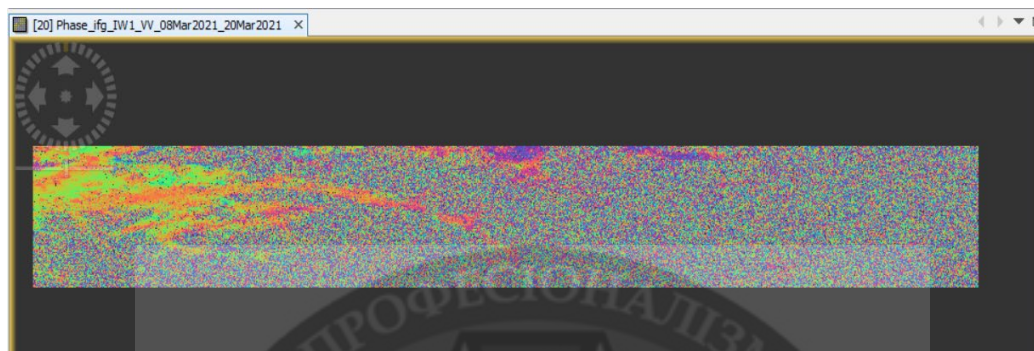


Рисунок 11 – Відфільтроване фазове зображення інтерферограми

Для того, щоб пов'язати інтерферометричну фазу з топографічною висотою її повинно бути спочатку розгорнуто. Невизначеність висоти визначається як різниця висот, що генерує інтерферометричну зміну фази. Розгортання фази розв'язує цю неоднозначність шляхом інтегрування різниці фаз між сусідніми пікселями. Після видалення різниці фаз між двома точками на сплюсненій інтерферограмі можна виміряти фактичну зміну висоти. Відповідно, розгорнуті результати слід інтерпретувати як відносну висоту чи зміщення між пікселями двох зображень. Розгортання фази в SNAP відбувається в три окремі етапи (рис. 12):

1. Експорт згорнутої фази (та визначення параметрів) (interferometric > unwrapping > snaphu export)

2. Розгортання фази (виконується поза SNAP за допомогою snaphu) (interferometric > unwrapping > snaphu unwrapping)

3. Імпорт розгорнутої фази назад в SNAP (interferometric > unwrapping > snaphu import).

Проходження вище описаних 3 кроків в результаті дає зображення розгорнутої фази, що можна використовувати для побудови цифрової моделі рельєфу (рис. 13).

Розгорнута фаза тепер є безперервним растром, але ще не є метричною мірою. Для перетворення радіанних одиниць в абсолютні висоти застосовується інструмент Phase to Elevation.

Він переводить фазу в висоти поверхні вздовж лінії прямої видимості (LOS) в метрах. LOS - це лінія між сенсором і пікселем. Для приведення значень висот до правильного рівня використовується матриця висот.

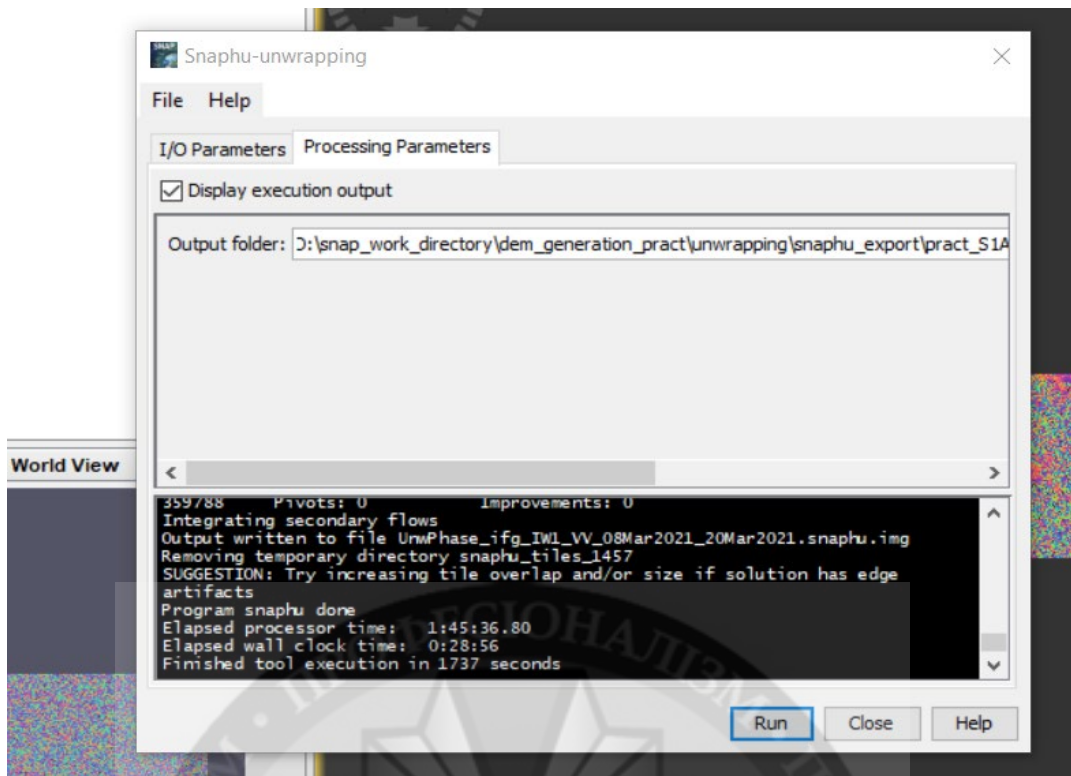


Рисунок 12 – Інструмент Snaphu unwrapping модуля Snaphu для розгортання фази інтерферограми в SNAP

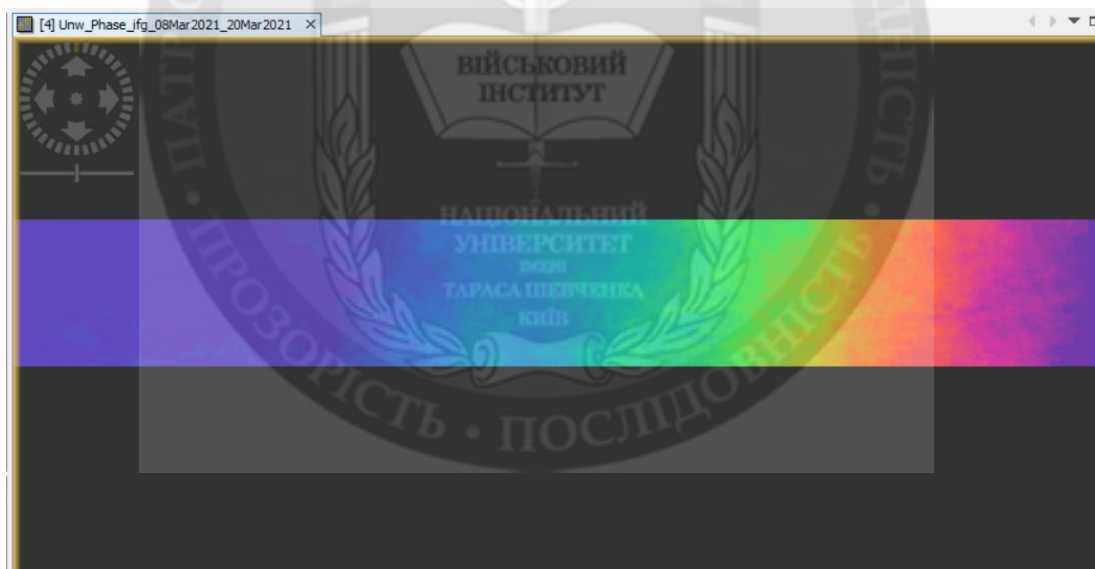


Рисунок 13 – Зображення розгорнутої фази інтерферограми

Він створює результат, який виглядає подібно до розгорнутої фази (дещо інша попередньо визначена кольорова гама), але тепер кожен піксель має метричне значення, що вказує на його висоту над рівнем моря (рис. 14).

На попередніх етапах обробки також могли бути внесені порожні пікселі на краю інтерферограми. Наприклад, в областях, які не вкриті обома вхідними зображеннями. Для обрізання цих ділянок варто використати інструмент Subset (рис.15).

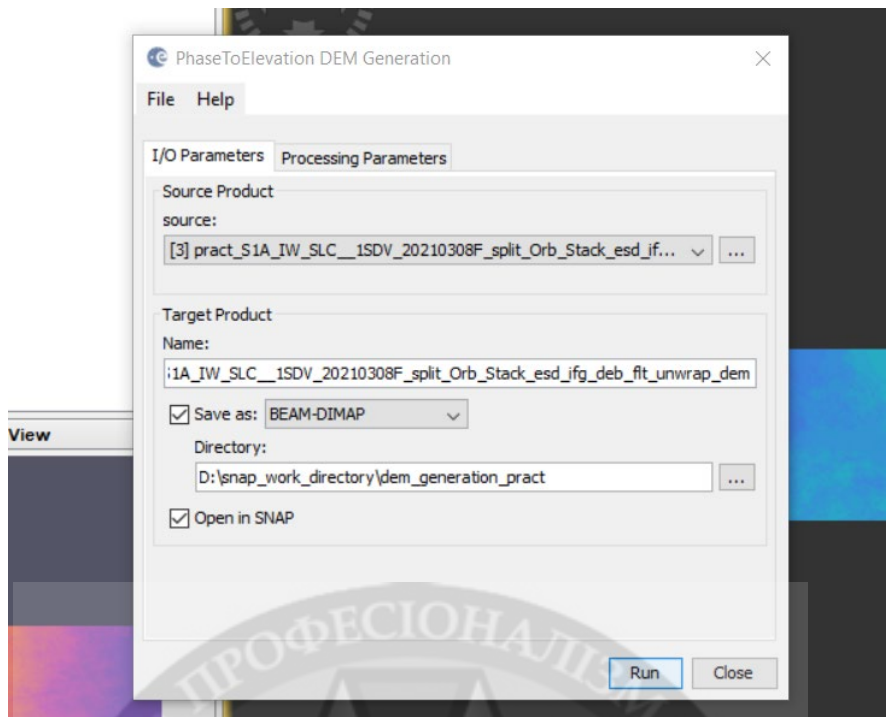


Рисунок 14 – Інструмент Phase to Elevation для отримання абсолютних висот території



Рисунок 15 – Зображення розподілу отриманих даних висот (попередня ЦМР) за допомогою інструментів Phase to Elevation та Subset

Викривлення викликані зображенням, що дивиться збоку (а не прямо вниз або в найнижчу точку) і ускладнюється пересіченою місцевістю. Корекція ландшафту переміщує пікселі зображення в правильне просторове співвідношення один з одним. Радіометрична корекція рельєфу поєднує обидві корекції для отримання чудового продукту для наукових застосувань (рис. 16).

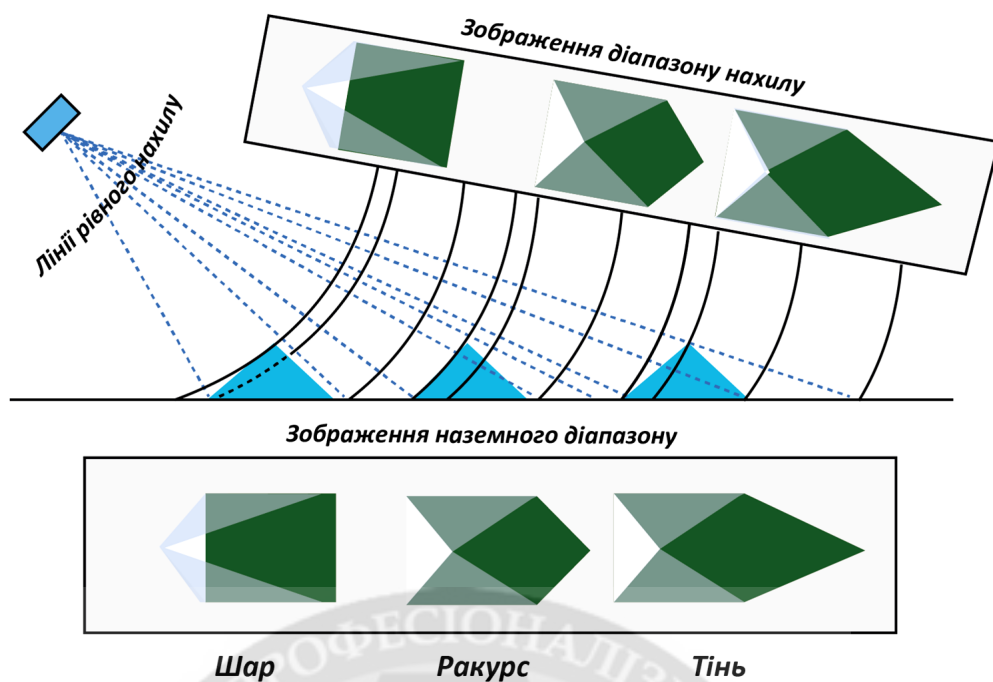


Рисунок 16 – Геометричні спотворення на радіолокаційних знімках

В інструменті Terrain Correction задамо додатково систему координат карти WGS84 і UTM Zone 35, що відповідає даній території (рис.17).

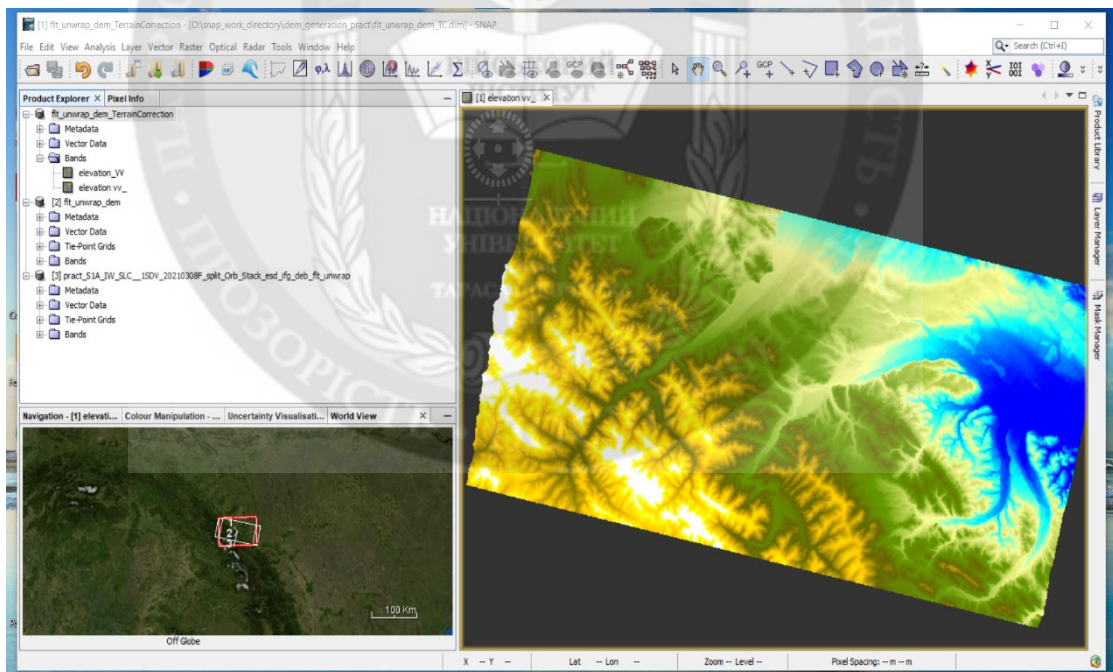


Рисунок 17 – Побудована ЦМР в SNAP за даними радарного знімання Sentinel-1 з проведенням радіолокаційної корекції

Для відображення ЦМР на території для якої вона будувалася її було експортовано в форматі GEOTiff і додано в Arcmap, а далі візуалізовано з напівпрозорістю 45% (рис. 18).

На основі створеної ЦМР можна створити 3D модель рельєфу. Для цього використаний один із додатків ArcGIS, а саме ArcScene. Насамперед підвантажуємо ЦМР в ArcScene.

Заходимо в налаштування знімку і в налаштуваннях «Base Heights» піднімаємо рельєф. В результаті отримано 3D модель рельєфу для даної території (рис. 19).

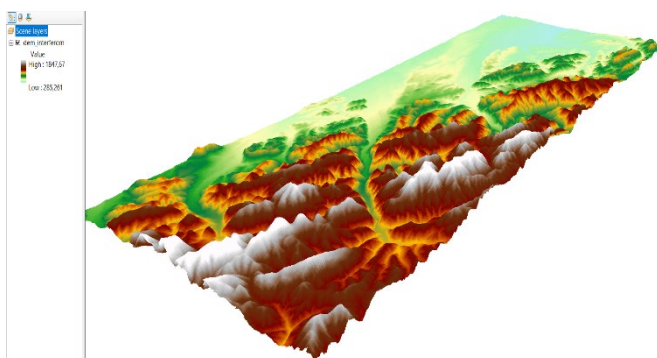
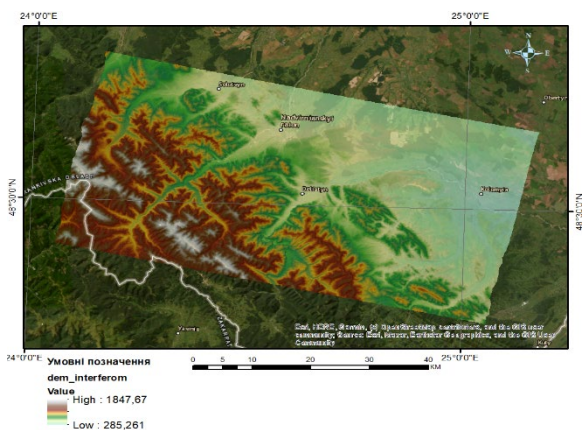


Рисунок 18 – Побудована ЦМР за даними радарного знімання Sentinel-1 в Arcstar на підкладці з підтягнутого онлайн шару basemap

Рисунок 19 – 3D модель рельєфу для обраної частини території Надвірнянського району Івано-Франківської області в ArcScene

Висновки. За рахунок застосування радарної інтерферометрії можливе швидке вироблення нових підходів для їх створення ЦМР або поєднання декількох. На даному етапі в умовах відсутності нормативних документів щодо порівняння і створення ЦМР неможливо важко сказати, яка краща, оскільки кожна з них має як позитивні так і негативні сторони. При побудові універсальних ЦМР необхідні не тільки висотні позначки рельєфу, а й дна водойм та урізу води.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Азов В. Роль и место глобальной системы оперативного управления в стратегическом руководстве США / В. Азов // Зарубежное военное обозрение”. – 2003. – № 5. – С. 2 – 7.
2. Беяченко В. В., Бобров С. В., Закалад М. А., Утюшев М. К. Обґрунтування функціональних вимог до програмної компоненти системи управління життєвим циклом автоматизованих систем у Збройних Силах України// Збірник наукових праць Центру військово-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського № 2(72), 2021 С. 97–106
3. Зацерковний В. Аналіз підходів щодо створення цифрових моделей рельєфу/ В. Зацерковний, Н. Руль, Л. Плічко, С. Кривоберець //Технічні науки та технології. – 2017. – №1.– С. 87–97.
4. Андреев А.А. В. Методика построения прецизионных цифровых моделей местности на основе данных спутниковой радарной интерферометрии с использованием ГИС / Андреев А.А., Пестова И. А., Свиденюк М.О., Суханов К.Ю., Титаренко О.В. //Збірник тез доповідей IV міжнародної науково-практичної конференції (Київ 10 квітня 2019 року). – Київ: Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, 2019. – 89 с.
5. Зацерковний В.І. Геоінформаційні системи і бази даних: монографія. – Кн.2. / В. І. Зацерковний. В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2017. – 237 с.
6. Зацерковний В.І. Геоінформаційні системи в науках про Землю : монографія / В.І.Зацерковний, І.В.Тішаєв, І.В. Віршило, В.К. Демидов. – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2016. – 510 с.

7. Часковський О.Г. Створення цифрових моделей рельєфу на основі даних аерофотознімання//Електроннийресурс:http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/iglpdp/2009_35/35-3.pdf.

8. Что такое SRTM? Данные SRTM, и где скачать SRTM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://mapgroup.com.ua/articles/dzz/109-dannye-srtm-sposoby-polucheniya-dannykh>.

9. Процик М.Т. Методи фотограмметричного та картографічного супроводу багаторівневої системи моніторингу ерозійних ґрунтових процесів: автореферат дис. канд. техн. наук: 05.24.01 Геодезія, фотограмметрія та картографія / Процик М. Т. – Львів, 2012. – 26 с.

10. Електронний ресурс – режим доступу: <https://www.scanex.ru/thematic/projects/differentsialnaya-radarnaya-interferometriya/>

11. Електронний ресурс – режим доступу: <https://postminquake.eu/insar-satellite-radar-interferometry/>

12. Електронний ресурс – режим доступу: <https://innoter.com/services/obrabotka-radarnykh-dannykh/obrabotka-dannykh-radiolokatsii/>

13. Електронний ресурс – режим доступу: <https://www.gim-international.com/content/article/satellite-radar-interferometry>

14. Harfenmeister, K.; Spengler, D.; Weltzien, C. Analyzing temporal and spatial characteristics of crop parameters using Sentinel-1 backscatter data. *Remote Sens.* 2019, 11, 1569.

15. Електронний ресурс – режим доступу: <http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20DEM%20generation%20with%20Sentinel-1%20IW%20Tutorial.pdf>

16. Електронний ресурс – режим доступу: <https://seadas.gsfc.nasa.gov/help-8.1.0/general/overview/SnapOverview.html>

17. Електронний ресурс – режим доступу: <https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/how-to-radiometrically-terrain-correct-rtc-sentinel-1-data-using-s1tbx-script/>

REFERENCES:

1. Azov V. (2003), Rol y mesto hlobalnoi systemy operatyvnoho upravleniya v stratezhicheskoy rukovodstve SShA / V. Azov // *Zarubezhnoye voennoye obozreniye*. № 5. – pp. 2–7.

2. Beliachenko V. V., Bobrov S. V., Zakalad M. A., Utiushev M. K. (2021), «Obgruntuvannya funktsionalnykh vymoh do prohramnoi komponenty systemy upravlinnia zhyttievym tsyklom avtomatyzovanykh system u Zbroinykh Sylakh Ukrainy» // *Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy imeni Ivana Cherniakhovskoho* № 2(72), pp. 97 – 106.

3. Zatserkovnyi V. (2017), «Analiz pidkhodiv shchodo stvorennia tsyfrovyykh modelei reliefu / V. Zatserkovnyi, N. Rul, L. Plichko, S. Kryvoberets» // *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*. № 1. – pp. 87-97.

4. Andreev A.A. V. (2019), "Metodyka postroyeniya pretsyzyonnykh tsyfrovyykh modelei mestnosti na osnove dannykh sputnykovoї radarnoi ynterferometriyy s yspolzovanyem HYS" / Andreev A.A., Pestova Y. A., Svydeniuk M.O., Sukhanov K.Iu., Tytarenko O.V. // *Zbirnyk tez dopovidei IV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Kyiv 10 kvitnia 2019 roku)*. – Kyiv: Natsionalnyi universytet oborony Ukrainy imeni Ivana Cherniakhovskoho, 89 p.

5. Zatserkovnyi V.I. (2017), "Heoinformatsiini systemy i bazy danykh: monohrafiia". – Kn.2. / V. I. Zatserkovnyi, V. H. Burachek, O. O. Zhelezniak, A. O. Tereshchenko. – Nizhyn : NDU im. M. Hoholia, 237 p.

6. Zatserkovnyi V.I. (2016), "Heoinformatsiini systemy v naukakh pro Zemliu": monohrafiia – V.I.Zatserkovnyi, I.V.Tishaiev, I.V. Virshylo, V.K. Demydov. Nizhyn: NDU im. M. Hoholia, 510 p.

7. Chaskovskyi O.H. (2009), "Stvorennia tsyfrovyykh modelei reliefu na osnovi danykh aerofotoznimannia" /Elektronnyiresurs:http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/natural/iglpdp/35/35-3.pdf.

8. Chto takoe SRTM? Данные SRTM, y hde ckachat SRTM [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <http://mapgroup.com.ua/articles/dzz/109-dannye-srtm-sposoby-polucheniya-dannykh>.

9. Protsyk M.T. (2012), "Metody fotogrammetrychnoho ta kartohrafichnoho suprovodu bahatorivnevoi systemy monitorynhu eroziinykh gruntovykh protsesiv": avtoreferat dys. kand. tekhn. nauk: 05.24.01 Heodeziia, fotogrammetriia ta kartohrafiia / Protsyk M. T. – Lviv, 26 p.

10. Elektronnyi resurs – rezhym dostupu: <https://www.scanex.ru/thematic/projects/differentsialnaya-radarnaya-interferometriya/>

11. Elektronnyi resurs – rezhym dostupu: <https://postminquake.eu/insar-satellite-radar-interferometry/>

12. Elektronnyi resurs – rezhym dostupu: <https://innoter.com/services/obrabotka-radarnykh-dannykh/obrabotka-dannykh-radiolokatsii/>

13. Elektronnyi resurs – rezhym dostupu: <https://www.gim-international.com/content/article/satellite-radar-interferometry>

14. Harfenmeister, K.; Spengler, D.; Weltzien, C. Analyzing temporal and spatial characteristics of crop parameters using Sentinel-1 backscatter data. *Remote Sens.* 2019, 11, 1569.

15. Elektronnyi resurs – rezhym dostupu: <http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20DEM%20generation%20with%20Sentinel-1%20IW%20Tutorial.pdf>

16. Elektronnyi resurs – rezhym dostupu: <https://seadas.gsfc.nasa.gov/help-8.1.0/general/overview/SnapOverview.html>

17. Elektronnyi resurs – rezhym dostupu: <https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/how-to-radiometrically-terrain-correct-rtc-sentinel-1-data-using-s1tbx-script/>

Bialyi M.O., Ph.D. Savkov P.A.

APPLICATION OF RADAR INTERFEROMETRY FOR CONSTRUCTION OF DIGITAL RELIEF MODELS

Advanced experience in preparing and conducting military operations has shown that terrain is one of the most crucial elements in any map, as it determines the characteristics of the landscape of a specific area. Digital Elevation Models are used in updating digital topographic maps and plans of various scales, conducting various types of engineering surveys, and geological, biological, and geographical research.

This article examines existing models and methods for constructing digital elevation models for the purpose of their comparative analysis based on the integration of open, publicly available sources of information. The approaches to building digital elevation models are described, and the information support for their creation is considered. The possibility of using different data sources intended for creating digital elevation model is demonstrated: for land management tasks modeling, hydrological network modeling, analysis of radio tower coverage zones, construction task modeling, and modeling flood and inundation zones. By improving digital elevation model, it is possible to develop new approaches for their creation or integrate existing ones.

At the current stage of Ukraine's Armed Forces development, it is advisable to use radar interferometry as a relatively fast and accurate method for constructing digital elevation model. Interferometry is a technology for extracting elevation information from the phase of two images. Interferometric processing is carried out based on the use of radar data. The method assumes that the same area should be imaged with a displacement in space of the radar antenna receiver. Thus, by applying radar interferometry, it is possible to rapidly develop new approaches for creating digital elevation model or combining multiple ones.

Keywords: digital elevation model, interpolation methods, geometric model, kriging, remote sensing system.