

**Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Дніпровська політехніка»**

Інститут електроенергетики  
(інститут)

Факультет інформаційних технологій  
(факультет)

Кафедра інформаційних систем та технологій та комп'ютерної інженерії  
(повна назва)

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

**кваліфікаційної роботи ступеня магістра**  
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Гай Олесі Володимирівни  
(ПІБ)

академічної групи 126М-22з-1  
(шифр)

спеціальності 126 Інформаційні системи та технології  
(код і назва спеціальності)

за освітньо-професійною програмою 126 Інформаційні системи та технології  
(офіційна назва)

на тему «Інформаційна технологія моніторингу вулканічної активності в Ла-Пальмі»  
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтингово ю	інституційною	
кваліфікаційної роботи	доц. Каштан В.Ю.			
розділів:				
<b>Рецензент</b>				
<b>Нормоконтролер</b>	проф. Коротенко Г.М.			

**Дніпро  
2023**

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**  
завідувач кафедри  
інформаційних технологій  
та комп'ютерної інженерії  
(повна назва)

\_\_\_\_\_ Гнатушенко В.В.  
(підпис) (прізвище, ініціали)

«\_» \_\_\_\_\_ 202\_ року

**ЗАВДАННЯ**  
**на кваліфікаційну роботу**  
**ступеня магістр**

студенту Гай О.В.  
(прізвище та ініціали)

академічної групи 126М-22з-1  
(шифр)

спеціальності \_\_\_\_\_ 126 «Інформаційні системи та технології»  
за освітньо-професійною програмою 126 «Інформаційні системи та технології»

(офіційна назва)

на тему «Інформаційна технологія моніторингу вулканічної активності в Ла-Пальмі»

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 09.10.2023 р.  
№ 1228-с

Розділ	Зміст	Термін виконання
Розділ 1 Аналіз області дослідження	Провести огляд області дослідження, її географічне положення.	12.09.2023
Розділ 2 Технологія моніторингу вулканічної активності	Розробка технології моніторингу вулканічної активності.	03.10.2023
Розділ 3 Результати досліджень вулканічної активності в Ла-Пальмі	Провести експериментальні дослідження, запропонованої інформаційної технології.	24.11.2023

**Завдання видано** \_\_\_\_\_  
(підпис керівника)

\_\_\_\_\_ доц. Каштан В.Ю.  
(прізвище, ініціали)

**Дата видачі** 04 вересня 2023 р.

**Дата подання до екзаменаційної комісії**

\_\_\_\_\_ р.

**Прийнято до виконання** \_\_\_\_\_  
(підпис студента)

\_\_\_\_\_ Гай О.В.  
(прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 57 с., 16 рис., 21джерел, 1 додаток.

**Об'єкт дослідження:** супутникові знімки Sentinel-2 для моніторингу вулканічної активності в Ла-Пальмі.

**Предмет дослідження:** технологія для аналізу впливу вулканічної активності на морське середовище та навколишню екосистему.

**Мета кваліфікаційної роботи:** розробка інформаційної технології моніторингу вулканічної активності в Ла-Пальмі.

Кваліфікаційна робота присвячена актуальній задачі розробки інформаційної технології моніторингу вулканічної активності на основі обробки та аналізу даних дистанційного зондування та геоінформаційних методів. Розроблено інформаційну технологію за допомогою якої було виявлено та здійснено аналіз впливу вулканічної активності на морське середовище та навколишню екосистему.

Наукове дослідження полягає у використанні різночасових знімків супутника, атмосферну корекцію, розрахунок теплових індексів, візуалізацію цих індексів та аналіз отриманих даних. Це надає можливість відстежувати зміни в температурі та інших параметрах поверхні вулкана, що може бути корисним для передбачення вулканічних вивержень та забезпечення безпеки населення.

Практичне значення роботи полягає в тому, що результати дослідження можуть бути впровадженні в процеси відстежування змін в температурі та інших параметрах поверхні вулкана, що може бути корисним для передбачення вулканічних вивержень та забезпечення безпеки населення.

**Ключові слова:** ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ (ДЗЗ), СУПУТНИКОВИЙ ЗНІМОК, ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ (ГІС), ВУЛКАНІЧНА АКТИВНІСТЬ, SENTINEL-2, ЧАСОВІ РЯДИ

## ABSTRACT

The explanatory statement has 57 p., 16 figures, 21 sources, and 1 appendix.

**Object of research:** Sentinel-2 satellite images for monitoring volcanic activity in La Palma.

**Subject of research:** technology for analyzing the impact of volcanic activity on the marine environment and the surrounding ecosystem.

**The purpose of the diploma project:** development of information technology for monitoring volcanic activity in La Palma.

The qualification work is dedicated to the actual task of developing information technology for monitoring volcanic activity based on the processing and analysis of remote sensing data and geoinformation methods. An information technology was developed, with the help of which the impact of volcanic activity on the marine environment and the surrounding ecosystem was identified and analyzed.

Scientific research consists in the use of satellite images at various times, atmospheric correction, calculation of thermal indices, visualization of these indices and analysis of the obtained data. This provides an opportunity to monitor changes in temperature and other parameters of the volcano's surface, which can be useful for predicting volcanic eruptions and ensuring public safety.

The practical significance of the work is that the results of the study can be implemented in the processes of monitoring changes in the temperature and other parameters of the surface of the volcano, which can be useful for predicting volcanic eruptions and ensuring public safety.

**Keywords:** REMOTE SENSING (DZZ), SATELLITE IMAGE, GEO-INFORMATION SYSTEMS (GIS), VOLCANIC ACTIVITY, SENTINEL-2, TIME SERIES

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ</b> .....	6
<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>1 АНАЛІЗ ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ</b> .....	9
1.1 Особливості вулканічної активності.....	9
1.2 Географічне положення острова Ла-Пальм.....	12
1.3 Активність вулкану Кумбре-В'єха в Ла-Пальмі.....	14
1.3 Дослідження вулканічного рельєфу.....	16
1.4 Висновки до першого розділу.....	19
<b>2 ТЕХНОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ ВУЛКАНІЧНОЇ АКТИВНОСТІ</b> .....	21
2.1 Аналіз наукових публікацій моніторингу вулканічної активності.....	21
2.2 Алгоритми пошуку температури поверхні землі.....	25
2.2.1 Моніторинг геодезичних параметрів.....	27
2.2.2 Сейсмічний моніторинг.....	28
2.2.3 Моніторинг пеплових опадів.....	29
2.2.4 Супутниковий моніторинг.....	30
2.3 Інформаційна технологія моніторингу вулканічної активності.....	31
2.4 Висновки до другого розділу.....	36
<b>3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВУЛКАНІЧНОЇ АКТИВНОСТІ В ЛА- ПАЛЬМІ</b> .....	38
3.1 Програмне забезпечення та опис даних.....	38
3.2 Аналіз та інтерпретація даних.....	41
3.3 Висновки до третього розділу.....	49
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	50
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b> .....	51
<b>Додаток А</b> .....	54

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ГІС – геоінформаційні системи;

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі;

SAR – радіолокатора з синтетичною апертурою;

ЦМР – цифрові моделі рельєфу;

ОТВ – Orfeo ToolBox;

ЕМ– електромагнітне випромінювання;

NIR – ближній інфрачервоний;

SWIR – короткий інфрачервоний;

MWIR – середньохвильовий інфрачервоний.

## ВСТУП

Дослідження вулканічної діяльності займає важливе місце серед вивчення ендегенних процесів. Це явище є одним з найбільш динамічних і природно є руйнівним та катастрофічним. Тому вчені звертають особливу увагу на вивчення структури планети, з метою розуміння вулканізму та його впливу.

Вплив вулканізму на навколишнє середовище є значним, збурюючи рельєф, впливаючи на клімат та рослинний покрив. Цей процес має важливе значення серед факторів формування рельєфу. Вибухи магми, що виходять на земну поверхню, змінюють її структуру. Населення на територіях з активним вулканізмом збільшує ризик від несприятливих і небезпечних вулканічних явищ. За останні 500 років активність понад 500 земних вулканів призвела до смерті близько 200 тисяч людей.

Розвиток аерокосмічної техніки і засобів дистанційного зондування надав можливість отримувати обширну інформацію щодо вулканічних процесів на Землі у вигляді матеріалів аерокосмічних зйомок. Ці дані вимагають оперативної обробки для ефективного контролю за станом потенційно небезпечних об'єктів. Тому вирішення проблеми створення єдиної системи моніторингу вулканічних зон є критичним для забезпечення безпеки населення. Це вимагає розробки теоретичних основ та створення класифікацій різних вулканічних явищ та методів їх виявлення за допомогою аерокосмічних засобів.

**Об'єктом досліджень** є супутникові знімки Sentinel-2 для моніторингу вулканічної активності в Ла-Пальмі.

**Предметом дослідження** – технологія для аналізу впливу вулканічної активності на морське середовище та навколишню екосистему.

**Мета роботи** – розробка інформаційної технології моніторингу вулканічної активності в Ла-Пальмі.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати аналіз особливостей моніторингу вулканічної активності на основі даних дистанційного зондування та дослідити різні підходи до виявлення змін на космічних знімках;

- розробити методику аналізу даних отриманих з космічних знімків для оперативного моніторингу вулканічної активності;

- розробити комплексну методику дешифрування та виявлення просторово-часових змін, за космічними знімками.

**Наукова новизна результатів дослідження.** Наукова новизна роботи полягає в тому, що в результаті досліджень був проведений аналіз впливу вулканічної активності на морське середовище та навколишню екосистему, та аналізу просторово-часових змін.



# 1 АНАЛІЗ ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Особливості вулканічної активності

Спостереження за вулканами різноманітні і включають різні методи. Це включає відео-візуальні спостереження для відстеження активності вулканів, геофізичні методи, такі як сейсмічні, гравіметричні та акустичні спостереження для вимірювання змін у вулканічній активності. Також використовують геодезичні методи з використанням нахиломірів та GPS-приймачів для вимірювання зсувів та змін у геометрії вулканів. Додатково використовують газові спостереження для вимірювання концентрації газів, гідрологічні методи та інші. Такий широкий спектр методів дозволяє отримати комплексну інформацію про стан вулканічних систем.

У той же час останні десятиліття на вирішення завдань моніторингу вулканічної активності активно розвиваються і впроваджуються супутникові технології. Це пов'язано в першу чергу з такими факторами:

1. Важкодоступні місця: багато активних вулканів розташовані у важкодоступних або небезпечних регіонах, що робить небезпечним проведення спостережень на місці. Супутникові дані надають можливість отримання інформації без прямого доступу до вулканів.

2. Покриття великих територій: вулканічна активність може мати вплив на значні території. Супутникові дані дозволяють вивчати і вимірювати розповсюдження викидів попелу та інших матеріалів на значні відстані.

3. Оперативність інформації: супутникові дані забезпечують оперативний доступ до інформації про вулканічну активність. Це дозволяє оперативно реагувати на зміни, а також передбачати та мінімізувати негативні наслідки виверження.

Всі ці фактори роблять супутникові технології важливим інструментом для моніторингу вулканічної активності, забезпечуючи швидку, широкомасштабну та безпечну збір інформації [3].

Супутникові системи надають можливість розробки низки інформативних методів моніторингу вулканічної активності. Деякі з них:

- контроль вивержень: вони дозволяють відслідковувати території вивержень та оцінювати їхню інтенсивність.
- спостереження за лавовими потоками: вулканічні викиди часто супроводжуються лавовими потоками. супутникові дані дозволяють спостерігати за їх рухом та поширенням.
- оцінка параметрів попелових викидів: супутникові дані використовуються для вимірювання та прогнозування поширення попелових хмар під час вивержень.
- слідування за аерозолями: вони дозволяють контролювати розповсюдження аерозольних частинок, викинутих у повітря під час вивержень.
- моніторинг деформацій земної поверхні: супутникові дані допомагають вимірювати зміни в земній поверхні, що може вказувати на можливе виверження.
- дослідження передвіщ виверження та наслідків: вони дозволяють вивчати явища, що відбуваються перед виверженням, та аналізувати наслідки вивержень.

Ці методи стеження за вулканічною активністю надають важливу інформацію для прогнозування, моніторингу та запобігання можливих наслідків вулканічних подій [4].

Виявлення та моніторинг діючих вулканів здійснюється завдяки різноманітним супутниковим системам. Деякі з найбільш важливих для цих цілей включають: супутники NOAA зі сенсорами AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer): Ці супутники надають дані з високою роздільною здатністю, допомагаючи відстежувати діяльність вулканів з великою точністю [4].

Геостаціонарні супутники GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), TERRA і AQUA з датчиками MODIS і ASTER: Ці

супутники надають дані з різних спектральних діапазонів, що дозволяє виявляти різноманітні аспекти активності вулканів, такі як температурні зміни та зміни у відбитті світла [3].

Ці супутники надають можливість оновлення інформації про вулканічну активність відносно швидко, що дозволяє вчасно реагувати на зміни та виверження, моніторити поширення попелових хмар та інші небезпечні прояви вулканічної активності.

Дані, отримані від полярно-орбітальних супутників серії NOAA (з датчиками AVHRR), протягом понад двадцяти років стали ключовим джерелом інформації для оперативного моніторингу вулканічної активності. Ці дані дозволяють відстежувати термальні аномалії на вулканах і контролювати попелові шлейфи під час експлозивних вивержень.

Це надзвичайно важливий інструмент для спостереження, оскільки дозволяє оперативно реагувати на будь-які зміни в активності вулканів, визначати розміри попелових хмар та вивчати їхнє поширення. Це також допомагає передбачати можливі наслідки вулканічних вивержень і вживати необхідні заходи безпеки в разі небезпеки для населення та ландшафту.

Поява нових систем супутникового спостереження у найближчі роки може суттєво розширити можливості моніторингу вулканічної активності. Це включає підвищення частоти спостережень, що дозволить отримувати більше даних за короткий час, збільшення просторового розрізнення і розширення типів використовуваної супутникової інформації.

Крім того, розвиток методів та технологій автоматизованої обробки даних може значно полегшити роботу фахівців, що ведуть моніторинг. Це спростить отримання даних, зменшить час їх обробки та аналізу, а також розширить можливості використання цієї інформації для прийняття швидких та ефективних рішень в разі виникнення вулканічної активності.

## 1.2 Географічне положення острова Ла-Пальм

Архіпелаг Канарських островів складається з семи островів, розташованих поблизу північно-західного узбережжя Африки, між широтами  $27^{\circ}38'N$  і  $29^{\circ}25'$  пн.ш., а довготи  $13^{\circ}20'W$  і  $18^{\circ}90'W$  (рис. 1.1). Всі ці острови мають вулканічне походження. Вулканізм на Канарських островах почався під час олігоцену і все ще активний. Острів Ла-Пальма розташований у західній частині архіпелагу і є одним з наймолодших островів.

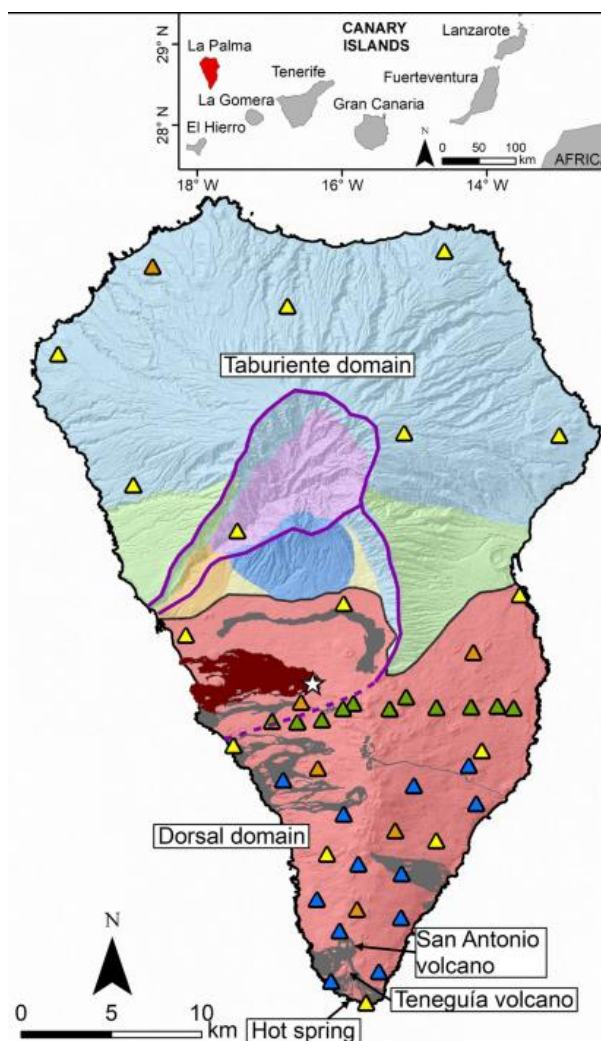


Рисунок 1.1 – Геологічна карта острова Ла Пальма

Острів має витягнуту форму, спрямовану з півночі на південь, з максимальною висотою 2426 м над рівнем моря. На острові Ла-Пальма можна виділити два дуже добре диференційованих геологічних домени: домен Табуріенте, який є найстарішим доменом, розташований у північній

частині острова, і вулканічний комплекс Кумбре-В'єха, який утворений найновішими вулканічними матеріалами в південній частині острова .

Утворення острова почалося з підводних викидів лави 4 млн років тому. Перший субаеральний матеріал викинувся 1,77 млн років тому, утворивши стратовулкан Табурієнте. Між 0,77 і 0,56 млн. років на південь від стратовулкану Табурієнте утворився вулканічний комплекс Кумбре Нуева. У цей період на західному схилі Кумбре Нуева стався зсув, утворивши велику долину Арідан у центральній частині острова.

Геологічна будова Ла-Пальми (рис.1.1) свідчить про вулканічну походження острова. Острів є частиною гірського хребта Cumbre Vieja, який перетинає Ла-Пальму з південного заходу на північний схід. Гірський хребет є складеною системою стратовулканів та вулканічних куполів.

Історія геологічної активності на острові включає в себе численні виверження вулканів, що призвело до формування різноманітних ландшафтів, таких як кратери, лавові поля та вулканічні конуси. Останнє значуще виверження відбулося у вересні 2021 року, коли вулкан Cumbre Vieja проявив інтенсивну активність, супроводжуючись виливанням лави та іншими вулканічними явищами.

Геологічна структура Ла-Пальми є об'єктом вивчення для вчених, оскільки дозволяє розуміти природу вулканічної активності та розробляти стратегії моніторингу та передбачення для зменшення ризиків для місцевого населення.

Останнє виверження вулкана на острові Ла-Пальма розпочалося 19 вересня 2021 року і тривало приблизно три місяці до 13 грудня. Це виверження, відоме як виверження Таджогаїт, супроводжувалося великими соціальними, економічними і науковими наслідками.

Перед початком виверження, вже за вісім днів, з 11 вересня 2021 року, виникли заворушення. Під час цього періоду сейсмічність швидко мігрувала з глибини 10 км до поверхні, слідуючи шляху магми вгору.

Остаточне виверження розпочалося близько 14:00 UTC 19 вересня і мало передусім стромболіанську активність, включаючи епізодичні фреатомагматичні імпульси. Це виверження нагадало про потенціал острова для зберігання геотермальних ресурсів.

Зазначимо, що це останнє виверження також викликало знову виявлення інтересу до геотермальних досліджень на Канарських островах. На це вказують ряд геофізичних і геохімічних досліджень, проведених на островах Гран-Канарія, Тенеріфе і Ла-Пальма.

### **1.3 Активність вулкану Кумбре-В'єха в Ла-Пальмі**

Кумбре-В'єха – великий вулкан, його форма гладка з одного боку й крута з іншого. В минулому тут було кілька вивержень, тому його сейсмічна активність постійно контролюється, оскільки це може свідчити про можливе виверження у майбутньому.

Магма вулкану Кумбре-В'єха має високу в'язкість і переміщується повільно, що може створити тиск всередині вулкана. Це може збільшити ризик вибуху, який може бути небезпечним для мешканців навколишніх територій.

В разі виверження Кумбре-В'єха можуть утворитися токсичні гази, попіл та лавові потоки, що можуть вплинути на людей і економіку регіону. Тому важливо бути інформованим і готовим до можливої небезпеки.

Вулкан також знаходиться в сейсмічно активній зоні, де часті землетруси можуть бути ознакою вулканічної активності. Ці землетруси використовуються для моніторингу вулканічної активності.

Острів Ла-Пальма приваблює багато туристів, які бажають піднятися на вулкан Кумбре-В'єха, щоб насолодитися природнім красивим видом. Проте важливо дотримуватися рекомендацій місцевої влади та уникати небезпечних зон, щоб уникнути загрози для безпеки.

Вулкан Кумбре-В'єха є щитовим вулканом, його форма довга та гладка з одного боку й крута з іншого. Цей тип вулкана утворюється через накопичення рідкої лави та шлаку, які поширюються в усі напрямки від центрального кратера вулкана. Процес утворення полягає в послідовному накладанні шарів лави та шлаку один на одного, утворюючи витягнуту гору.

Кумбре-В'єха виник у результаті кількох вулканічних вивержень, які тривали протягом тисяч років. Цей процес розпочався близько 1,2 мільйона років тому і триває й донині. Протягом вивержень шари лави та шлаку поступово накопичувалися, утворюючи гору, яку ми спостерігаємо сьогодні.

Щодо складу вулкана, він переважно складається з базальту та трахіту, які є двома типами вулканічних порід. Базальт - це темна, щільна порода, а трахіт - світла, менш щільна. Хімічний склад цих порід важливий, оскільки він впливає на в'язкість магми і, отже, на поведінку вулкана під час його активності.

Вулкан Кумбре-В'єха відзначився кількома виверженнями протягом своєї історії, останнє з яких сталося у вересні 2021 року. Виверження включають викид магми, попелу, газів та інших матеріалів через центральний кратер і тріщини на боках вулкана.

Ці виверження можуть відрізнитися за інтенсивністю та тривалістю. Вибухові виверження характеризуються раптовим викидом великої кількості попелу та пірокластичного матеріалу, що може становити загрозу для людей та будівель навколо вулкана. З іншого боку, ефузивні виверження характеризуються поступовим виділенням рідкої лави, яка повільно стікає по схилах вулкана.

Під час виверження місцева влада тісно співпрацює з науковцями для спостереження за активністю вулкана та вживає заходів для захисту людей та майна в навколишніх районах. Видача попереджень та проведення евакуацій можуть бути інструментами, використовуваними у випадку необхідності.

Виверження 1949 року було одним із найвідоміших. Тріщина на південному схилі викидала лаву та попіл. Лава потрапила до моря,

утворивши новий півострів на південній частині острова. Також були вибухи та викиди попелу, що вплинули на населення в околицях.

Ще одне значне виверження сталося 1971 року, коли тріщина на північному фланзі виділяла лаву та газу. Лава зруйнувала кілька будівель і доріг у своєму шляху на північ, а також були викиди золи та газу, що вплинули на населення поблизу.

### **1.3 Дослідження вулканічного рельєфу**

Для дослідження вулканічного рельєфу використовуються різноманітні методи, які дозволяють отримувати різні типи інформації про вулкани та їхні ділянки. Ось деякі з основних методів:

1. Картографічні методи: включають в себе складання карт вулканічних об'єктів та топографічних карт, які дають ідею про форму та рельєф вулканічних територій [1].

2. Методи дистанційного зондування: використовують супутникові дані для створення карт, оцінювання теплових аномалій, вивчення газових викидів та моніторингу змін у поверхневій структурі вулкану.

3. Методи сейсмічного моніторингу: одним з ключових методів для прогнозування виверження є вимірювання сейсмічної активності вулкану, виявлення та аналіз землетрусів, які можуть передувати виверженню [2].

4. Наземні дослідження вулканів: польові експедиції, які включають у себе вивчення вулканічного матеріалу, взірців газів, ґрунтів та інших матеріалів, що дають детальні відомості про склад вулкану та його активність.

5. Геофізичні методи: використовуються для вимірювання геофізичних параметрів вулканічних об'єктів, таких як магнітне та електричне поле, що може вказувати на зміни в складі магми або наявність різних вулканічних процесів.



Ці методи у поєднанні дозволяють вченим та геологам отримувати комплексну інформацію про вулканічний рельєф та динаміку його активності.

Під час польових досліджень проводиться збір і аналіз зразків лави та пірокластичного матеріалу, які пізніше проходять лабораторні випробування. Такий аналіз дозволяє отримати багато цінної інформації про склад та властивості цих матеріалів. Також виконуються морфометричні вимірювання елементів рельєфу, що пов'язані з різними типами вулканічних утворень. Такий аналіз надає детальні дані про геометрію, розміри та інші характеристики вулканічних форм, які є важливими для розуміння процесів, які відбуваються вулканічному регіоні та для передбачення можливих наслідків вулканічних подій.

Забір та геохімічний аналіз лав та газів на активних вулканах - це важливий процес, який допомагає передбачати можливі виверження та моніторити вулканічну активність. Інструмент COSPEC використовується для забору газів з фумаролів і вимірює їх концентрацію [2]. Збільшення концентрації різних газів, таких як сірчистий газ, вуглекислий газ, сірководень, хлористий і фтористий водень, а також окис вуглецю, може свідчити про наближення виверження.

Також важливо звертати увагу на зміни у колірному спектрі газів, що виходять з вулканічних жерл. Інтенсивність та характер цих газів допомагають визначати, чи проходить спокійний період вулкану, чи відбувається підвищення тиску вулканічних газів. Після досягнення певного рівня тиску ці гази можуть прорвати стару лавову пробку, що закриває канали, або розірвати схил вулкана тріщиною, що може викликати виверження. Такі спостереження та аналізи газів є ключовими для раннього виявлення можливих вулканічних загроз.

Веб-камери, інфрачервоні камери, відеокамери та фотокамери є важливими інструментами для спостереження за виверженнями вулканів. Веб-камери, розташовані у вулканічних районах, надають можливість

реального часу спостерігати за вулканічною діяльністю через Інтернет. Ці камери фіксують відео або фотографії, які дозволяють вченим і владі реагувати на зміни у вулканічній активності.

Інфрачервоні камери вимірюють температуру об'єктів, таких як гарячі зони на вулкані. Вони здатні виявляти теплове випромінювання, що допомагає визначити зміни в температурі та виявляти можливі зони, де активність може збільшуватися перед виверженням.

Відеокамери та фотокамери також застосовуються для документування та аналізу вулканічних вивержень. Вони дозволяють фіксувати різноманітні аспекти активності вулканів і становлять важливий інструмент для вивчення та прогнозування вулканічних вибухів.

На схилах вулкана проводяться детальні вимірювання деформації ґрунту на схилах вулкана є важливою складовою процесу моніторингу вулканічної активності. Перед виверженням зміни в формі землі можуть вказувати на можливість наближення виверження. Опуклості, зміни рельєфу, а також збільшення деформації можуть свідчити про накопичення магми ближче до поверхні.

Інструменти для вимірювання деформації, такі як електронні дальноміри (EDM), рівнівні вимірювання, GPS (глобальна система позиціонування), дозволяють виявляти і вимірювати навіть найменші зміни у формі та положенні ґрунту. Це надає важливі дані для прогнозування можливих вивержень вулканів.

Крім цього, інструменти, що визначають кількість лави, що рухається під землею, такі як VLF (дуже низькочастотна радіофікація) та EM-31 (електромагнітний індукційний зонд), також грають важливу роль у визначенні стану вулканічної діяльності [2]. Ці методи дозволяють оцінювати вміст різних матеріалів, таких як магма, що рухається під поверхнею, і надають додаткову інформацію для аналізу ризиків і прогнозування вивержень.

При наближенні виверження магма піднімається до поверхні, створюючи або піднімаючи купол вулкану. Швидкість цього підняття може слугувати орієнтиром для передбачення можливого часу виверження. Для цього використовуються різні методи вимірювання змін у формі та структурі вулканічних масивів.

Детальні виміри перевищень і відстаней між точками на піднятій ділянці, а також визначення кутів нахилу місцевості є важливими. Інструменти, які використовуються для цього, такі як нахиломіри (tiltmeters), мають високу чутливість і дозволяють виявити і виміряти навіть дуже малі зміни кутів нахилу з великою точністю.

Наземні спостереження за зміною температури гірських порід та природних вод є важливою частиною моніторингу вулканічної активності. Електронні реєстратори температур, які розміщують на різних глибинах вулкана, в кратерних озерах або у інших розташуваннях, служать для вимірювання та реєстрації змін температури.

Зростання температур може вказувати на нагрівання магми або на інші процеси, що відбуваються внутрішньо вулкана. Поступовий або різкий ріст температур може слугувати передвісником наближення виверження. Такі зміни температур є одним із важливих показників для передбачення активності вулканів та надання попереджень стосовно можливих вивержень.

Такі виміри можуть надати цінну інформацію про тенденції підняття магми і зміни в структурі вулканічних формацій, що може бути корисним для передбачення активності вулканів.

#### **1.4 Висновки до першого розділу**

Технологія дистанційного зондування дійсно змінила спосіб моніторингу вулканічної активності, надаючи вченим нові можливості для спостереження за вулканами та раннього попередження про можливі виверження.

Супутникові зображення є одним із найважливіших інструментів для вивчення вулканів з космосу. Вони надають високоякісну інформацію про зміни на поверхні землі, такі як потоки лави, попіл та теплова активність. Ці дані дозволяють вченим виявляти зміни у поведінці вулканів та прогнозувати можливі виверження.

Бортовий лідар, використовуючи лазери для вимірювання топографії вулканічної області та виявлення навіть незначних змін у ландшафті, також став важливим інструментом. Це дозволяє виявляти навіть найдрібніші зміни у терені навколо вулканів.

Технології дистанційного зондування не лише допомагають вченим прогнозувати виверження, але й вони можуть бути використані для розробки систем раннього попередження про виверження вулканів. Супутникові зображення та лідари надають дані, що допомагають визначити ознаки наближення виверження, що робить можливим попередження населення про можливу небезпеку.

Узагальнюючи, технологія дистанційного зондування грає ключову роль у спостереженні за вулканами та ранньому попередженні про можливі виверження. Ці техніки забезпечують важливі дані для дослідження вулканічної активності та розвитку стратегій безпеки для зон ризику.

## 2 ТЕХНОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ ВУЛКАНІЧНОЇ АКТИВНОСТІ

### 2.1 Аналіз наукових публікацій моніторингу вулканічної активності

За оцінками, у світі налічується 550 історично активних вулканів і 1300 діючих вулканів, які мають докази вивержень протягом голоцену (10000 років) [5]. Східноафриканський рифт, один з найдраматичніших розломів у світі, породив вулкани від величезного Кіліманджаро до жерл в ефіопській западині Данакіль, що лежать нижче середнього рівня моря. Два сусідні вулкани в Національному парку Вірунга в Заїрі (сучасна Демократична Республіка Конго), Ньямурагіра і Ньїрагонго, відповідають за майже дві п'ятих історичних вивержень в Африці. Ефіопський регіон налічує близько одного мільярда років геологічної історії, а сучасна піднесена топографія Ефіопії піднесений рельєф ефіопських плато є результатом рясного накопичення вулканічної лави та послідовного підняття. Розподіл діючих вулканів по всьому світу показано на (рис. 2.1). Червоні точки показують розподіл діючих вулканів [6].

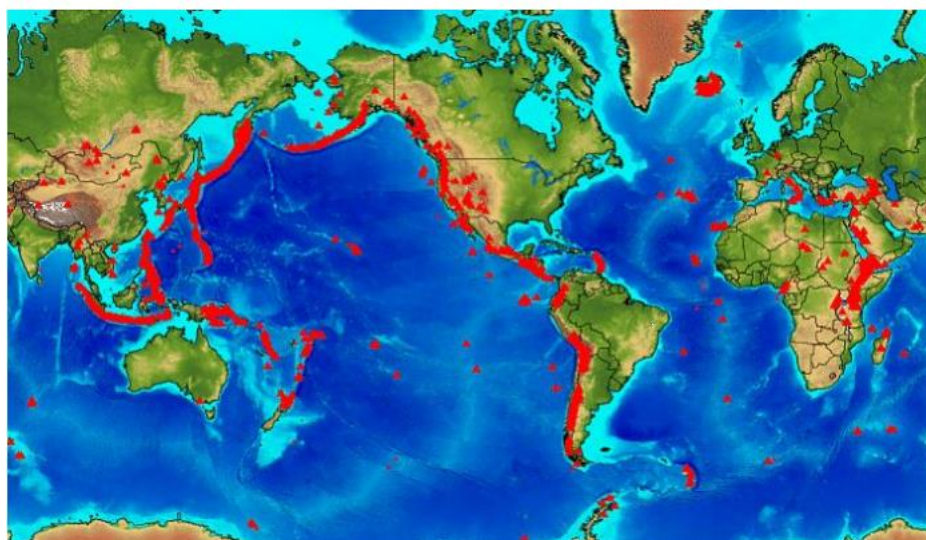


Рисунок 2.1 – Розподіл голоценових вулканів у світі [6]

Отримання інформації про деякі властивості об'єкта або явища за допомогою реєструючого пристрою, який не перебуває у фізичному або тісному контакті з досліджуваним об'єктом або явищем; наприклад, використання на відстані (наприклад, з літака або корабля) на відстані (наприклад, з літака, космічного корабля або судна) будь-якого пристрою та його дисплея для збору інформації, що стосується навколишнього середовища, наприклад, вимірювання силових полів, електромагнітного випромінювання або акустичної енергії. У техніці використовуються такі пристрої, як камера, лазери, радіо частотні приймачі, радіолокаційні системи, гідролокатори, сейсмографи, гравіметри, магнітометри та сцинтиляційні лічильники.

Географічна інформаційна система по суті є центральним сховищем аналітичного інструменту для географічних даних, зібраних з різних джерел. Дистанційне зондування та геоінформатика це нові геопросторові технології, які широко використовуються в різних галузях геонаук.

Геологія є однією з областей застосування дистанційного зондування, яка включає вивчення рельєфу, структур і підземних вод, структур і надр, щоб зрозуміти фізичні процеси, що створюють і змінюють земну кору. земну кору.

Геологічні застосування дистанційного зондування включають: картування поверхневих покладів або корінних порід, літологічне картування, структурне картування, розвідку/видобуток піску і гравію, розвідку корисних копалин, розвідку вуглеводнів, екологічну геологію, геоботаніку, базову інфраструктуру, картування і моніторинг седиментації, картування і моніторинг подій, картування і моніторинг геологічних небезпек і планетарне картування. Поява географічних інформаційних систем (ГІС) у середині 1960-х років відображає прогрес у комп'ютерних технологіях і вплив кількісної революції в географії. ГІС кардинально еволюціонували від інструменту автоматизованого картографування та управління даними на початку свого розвитку до потужної технології

обробки та аналізу просторових даних, а нещодавно - до географічної інформаційної науки. Географічна інформаційна система - це інтеграція комп'ютерних інформаційна система - це інтеграція комп'ютерного пакету, спеціально розробленого для використання географічних даних, який виконує широкий спектр завдань з обробки даних.

Виверження лавових потоків є частою небезпекою, яка впливає на населення та майно на багатьох вулканах по всьому світу [7]. Тому картування активних лавових потоків є цінним джерелом інформації для документування поточних вивержень [8], а також дає уявлення про розвиток лавових полів, необхідне для прогнозування майбутньої поведінки потоків [8]. Хоча лавові поля зазвичай наносяться на карту за допомогою наземних зйомок або останнім часом за допомогою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в повітрі [9], супутникове дистанційне зондування дає загальне уявлення про активні лавові потоки, уникаючи при цьому труднощів, пов'язаних з роботою в небезпечних місцях [10].

Площу активних лавових потоків важко зафіксувати традиційними польовими методами через великі розміри лавових полів і часто обмежений доступ до вулканічних районів. Крім того, аналіз невеликих ділянок поля лавового потоку може дати нерепрезентативні результати щодо всього лавового потоку під час виверження. Таким чином, методи дистанційного зондування вважаються безпечнішим і надійнішим альтернативним підходом, здатним забезпечити більш комплексне дослідження всього поля лавового потоку, що є важливим при спробі моніторингу безпеки лавових потоків під час виверження вулканів. Мультиспектральний характер даних і багаторазове покриття великих вулканічних територій є основними перевагами супутникових методів дистанційного зондування.

Постійно зростаюча кількість космічних датчиків продовжує надавати велику кількість високоякісних мультиспектральних даних. Оптичні зображення з супутників широко використовуються для картографування лавових потоків і пов'язаних з ними спектральних властивостей [11].

Супутникові дані у видимій, інфрачервоній та тепловій частинах електромагнітного спектру містять інформацію про відбиття та випромінювання лавових поверхонь різного віку та природи, а тому можуть бути використані для розрізнення свіжих лавових потоків з точки зору мінералогічних, текстурних та композиційних відмінностей [12]. Однак на оптичних зображеннях може бути важко розрізнити поверхні вивіреної лави і оцінити їхній відносний вік через схожість їхніх хімічних і поверхневих характеристик. Крім того, використання оптичних супутникових знімків вимагає, щоб над ураженою зоною не було хмар, а цього часто не буває.

Радіолокаційні супутникові дані вирішують цю проблему видимості, дозволяючи виявляти морфологічні зміни, пов'язані з вулканічною активністю, в будь-який час, в тому числі вночі або коли область, що нас цікавить, вкрита хмарами [13]. Однак, картування великих лавових потоків на основі супутникових радіолокаційних даних вимагає специфічних стратегій збору. Широко розповсюджена стратегія базується на аналізі когерентності зображень радіолокатора з синтезованою апертурою (SAR), де порівнюються два зображення, записані в різний час, і лавові потоки ідентифікуються за областями з низькою когерентністю [14]. Альтернативна стратегія ґрунтується на поєднанні SAR-зображень з видимими, інфрачервоними та тепловими супутниковими даними. Однак, використання SAR-зображень має деякі недоліки, такі як неоднозначність того, що представляють собою декорельовані області, стійка декореляція, що маскує нову активність, і проблеми з картуванням потоків, які проникають в рослинність [11].

Інший метод дистанційного зондування, який може бути використаний для виявлення нещодавніх лавових полів, - це розрізнення цифрових моделей рельєфу (ЦМР) до і після виверження, створених за допомогою стереооптичних знімків високої роздільної здатності [15]. На жаль, топографія з високою роздільною здатністю до виверження рідко доступна на вулканах, за якими погано ведеться спостереження, а поля лавових



потоків можна виявити, лише якщо їхня товщина перевищує мінімальну невизначеність, пов'язану з ЦМР; тому цей метод, як правило, не підходить під час виверження лавових потоків.

Роль зображень до і після виверження виявилася вирішальною в попередніх добре відомих методах, оскільки диференціальна інформація між ними тісно пов'язана з новоутвореним лавовим потоком. Дистанційні оптичні зображення до і після виверження можна було б використовувати для ручного відстеження нових лавових потоків, але різниця в часі зйомки призводить до відмінностей у стані довкілля на зображеній ділянці, що ускладнює автоматизацію цього завдання.

На сьогоднішній день методи машинного навчання широко використовуються в задачах обробки зображень [15]. Серед них моделі штучних нейронних мереж (ШНМ) виявилися добре придатними для складної класифікації даних [16]. ШНМ продемонстрували відмінну продуктивність у різних завданнях [17], таких як розпізнавання образів, у широкому спектрі наукових і промислових застосувань [18]. При розробці класифікатора ШНМ навчальні дані повинні бути репрезентативними для досліджуваних явищ. Однак, великі обсяги даних не завжди доступні, тому можуть знадобитися інші стратегії для обмеження розміру набору навчальних даних. Каскадування різних методів є цінним рішенням для підвищення ефективності навчання.

## **2.2 Алгоритми пошуку температури поверхні землі**

Були розроблені різні методи та алгоритми для отримання температури поверхні суші за даними теплового дистанційного зондування, як одноканального, так і двох теплових діапазонів, такі як алгоритми Split-Window (SW), алгоритм подвійного кута, одноканальний алгоритм та ін. Кожен алгоритм має свої власні параметри для розрахунку температури поверхні землі. Наприклад, алгоритм з розділеним вікном вимагає верхньої

межі атмосферної яскравості, температури та випромінювальної здатності матеріалу. матеріалу.

Одноканальні алгоритми в основному використовуються для оцінки температури поверхні землі з однієї теплової смуги датчика датчика, спочатку розроблений для Landsat TM-6 і також називається одновіконним алгоритм. Він використовує випромінювання, виміряне датчиком в одному каналі, для отримання LST за допомогою загальне рівняння переносу яскравості.

Двоканальний алгоритм також називають алгоритмом з розділеним вікном, оскільки він використовує два теплові діапазони датчика для отримання температури поверхні землі. Крім Landsat 8, датчики мають лише один тепловий діапазон, тоді як TIRS Landsat 8 має два спектрально суміжні теплові діапазони, які називаються канал10 і канал11, які розташовані в атмосферному вікні між 10 мкм і 12 мкм. Алгоритм розділеного вікна підходить і найбільш широко використовується для пошуку LST завдяки простоті та надійності. Одноканальний алгоритм також може бути застосований для теплових датчиків супутника Landsat 8. На сайті USGS Landsat рекомендує використовувати смугу 10 для алгоритму SW. Результат для отримання LST зі смуги 11 показують більшу невизначеність, ніж для діапазону 10, що узгоджується з оголошеною проблемою калібрування TIRS.

Багатокутовий метод відповідає різному поглинанню атмосфери через різної довжини пробігу, пов'язаної зі спостереженням одного і того ж об'єкта з різних кутів огляду. Цей метод був розроблений на основі першого датчика, який працював у біангулярному режимі, радіометра сканування вздовж траєкторії (ATSR) на борту першого європейського супутника дистанційного зондування (ERS-1). ATSR може здійснювати двокутове спостереження за однієї і тієї ж ділянки земної поверхні протягом приблизно двох хвилин. Один кут огляду - це кут зенітного зенітним кутом від  $0^{\circ}$  до  $21,6^{\circ}$ , а інший - прямий зенітний кут від  $52^{\circ}$  до  $55^{\circ}$  (Jin et al. до  $55^{\circ}$ . Припускаючи, що LST і

SST не залежать від VZA і що атмосфера є горизонтально однорідною і стабільною протягом часу спостереження, Прата розробив метод подвійного кута для отримання SST і LST з даних ATSR. Пізніше запропонували вдосконалений двокутний алгоритм, який включає випромінювальну здатність в надирі та випромінювальну здатність у прямому куті.

### 2.2.1 Моніторинг геодезичних параметрів

Магнітне поле Землі по суті є дипольним. Полярність поля змінюється, інтенсивність поля коливається, і на дипольне поле накладаються регіональні динамічні компоненти магнітного вектора, які, можливо, є результатом конвективних процесів на ядро-мантія. Дипольні та недипольні флуктуації магнітного поля призводять до широтно-залежної, випадкової палеосекюлярної варіації спостережуваних положень магнітних полюсів. Запис напрямку та інтенсивності Запис напрямку та інтенсивності магнітного поля Землі може зберігатися в геологічних матеріалах. Природний залишковий магнетизм (ПЗМ) будь-якого зразка матиме декілька компонентів, що складають його магнітний вектор, які включають високостабільний первинний вектор, набутий під час формування, який який згодом може бути надрукований будь-якими вторинними, низькостабільними компонентами МПМ, такими як удари блискавки удари блискавки або довготривалий вплив пізніших магнітних полів. Оскільки вторинний сигнал є менш стабільний, лабораторна обробка потенційно може бути використана для поступового розмагнічування кожного зразка, щоб зібрати початкові вектори нахилу і схилення, які були успадковані при утворенні (навіть якщо навіть коли вторинний відбиток є сильним), якщо залишилося достатньо первинних високо стабільних первинних векторів. Нахили та падіння решти векторів NRM з усіх зразків на ділянці потім порівнюються. Якщо вони збігаються в одному напрямку, всі зразки додаються для отримання результуючого вектора, і розраховується альфа-95 ( $\alpha_{95} = 95\%$  довірча межа) статистичного розкиду з використанням методу Фішера Фішера (аналогічно

до двох оцінених стандартних відхилень для гауссівського розподілу дисперсії. Порівняння між ділянками нахилу, схилення та інтенсивності PSV "відбитки" (в геологічному контексті) можуть виявити ймовірні одночасні події, коли результуючий вектор одного геологічного місця збору повністю міститься в межах довірчої ймовірності  $\alpha_{95}$  для іншого.

Вулканічне поле Сентинел-Арлінгтон є хорошим кандидатом для палеомагнітних досліджень, оскільки вулканічні одиниці геологічно картографовані в достатньому масштабі, щоб окреслити послідовність більшості вивержень, вулканізм є відносно мафічним із залізовмісними мінералами, і SAVF майже не виявляє ознак тектонічних порушень після розміщення, що призвели до обертання або нахилу. SAVF також пропонує часове та географічне розширення попередніх палеомагнітних досліджень південного заходу.

Палеомагнітні дані SAVF були використані для:

- уточнення історії вивержень шляхом виявлення кореляцій між географічно незалежними, несуміжними, але потенційно одночасними виверженнями;
- екстраполяції радіогенних дат на ці статистично корельовані події;
- зв'язування дистальних лав переплетені дистальні лавові потоки з відповідними джерелами, де стратиграфія може бути де стратиграфія може бути неоднозначною, а лавові потоки були текстурно та геохімічно подібними.

### **2.2.2 Сейсмічний моніторинг**

Сейсмічний моніторинг - це один з найважливіших методів моніторингу вулканічної активності, який дозволяє вченим відстежувати та аналізувати землетруси та вулканічні поштовхи, що відбуваються поблизу або внутрішньо вулканічних систем. Сейсмічний моніторинг є важливим

інструментом для передбачення вулканічних ерупцій та збирання інформації про внутрішні процеси вулкана.

Сейсмічний моніторинг базується на реєстрації сейсмічних хвиль, які виникають під час руху гірських порід усередині вулкана або навколо нього. Зазвичай, вулкани мають два типи сейсмічної активності:

- вулканічні землетруси виникають внаслідок переміщення мас гірських порід усередині вулкана, що може бути пов'язане з напливом магми, лавовими потоками або газовими викидами;
- тектонічні землетруси – це землетруси, пов'язані з рухом земної кори навколо вулкана або в регіоні, де розташований вулкан. Вони можуть вплинути на вулканічну активність, викликаючи зсуви, підняття або поглиблення землі, а також стимулюючи ерупції.

Для сейсмічного моніторингу встановлюють сейсмографи - спеціальні пристрої, які реєструють коливання землі від землетрусів. Сейсмографи складаються з сенсорів, які перетворюють коливання в сейсмічні сигнали, та реєстраторів, які фіксують ці сигнали. Дані, зібрані сейсмографами, надсилаються на центральну обробку для подальшого аналізу.

Сейсмічні дані аналізуються для визначення характеристик землетрусів, таких як магнітуда, глибина та епіцентр. Коли виявляється збільшення сейсмічної активності в області вулкана, це може служити сигналом для вулканологів про наближення вулканічної активності. Сейсмічні дані також допомагають визначити напрямок руху магми та підготувати попередження для місцевості.

### **2.2.3 Моніторинг пеплових опадів**

Моніторинг пеплових опадів є важливою складовою системи моніторингу вулканічної активності. Пеплові опади виникають під час вулканічних ерупцій, коли породи та гази викидаються у повітря та

потрапляють на землю. Вони можуть мати серйозний вплив на навколишнє середовище, людей та інфраструктуру.

Детектори пеплових опадів:

- великі мережі детекторів пеплових опадів розміщуються в регіонах, що підлягають вулканічному ризику;
- детектори можуть виявляти масу та швидкість падіння пеплових часток;
- інформація від детекторів передається до центральних лабораторій для аналізу.

Перевірка товщини пеплових шарів здійснюється за допомогою приладів, які вимірюють висоту накопиченого пеплу на землі. З цих даних можна зробити припущення про об'єм пеплових викидів та їх потенційний вплив.

#### **2.2.4 Супутниковий моніторинг**

Супутниковий моніторинг є потужним інструментом для вивчення вулканічної активності та відстеження змін у вулканічних регіонах. Він базується на використанні спеціалізованих супутникових систем і дозволяє здійснювати дистанційний нагляд та аналіз вулканічних процесів.

Супутникові теплові датчики, такі як MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), Landsat, і ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), можуть вимірювати температуру вулканічного випромінювання. Це дозволяє виявити збільшення теплового випромінювання, що може бути зв'язане зі зростанням активності вулкана перед виверженням.

Супутникові сенсори здатні аналізувати світло в різних спектральних діапазонах. Це дозволяє визначити хімічний склад та мінеральний склад матеріалів, які викидаються вулканом під час ерупції. Наприклад, ASTER може виділяти різні мінерали у вулканічних породах.

Одним із методів супутникового моніторингу є використання радіальних оптичних зйомок, які дозволяють вимірювати дисторсії поверхні вулкана під час його деформації перед ерупцією. Цей метод допомагає передбачити можливий виверження.

Супутникові радары, такі як SAR (Synthetic Aperture Radar), можуть детально відслідковувати зміни вулканічної території, включаючи деформацію, зсуви та інші зміни рельєфу. Радарні інтерферометричні методи (InSAR) дозволяють вимірювати деформацію земної поверхні, зокрема, деформацію вулканічних куполів та кратерів. Вони базуються на спостереженнях радіохвильового відбиття від земної поверхні, що дозволяє визначити зміни в рельєфі. Ці дані можуть бути використані для визначення геодинамічних змін в околицях вулкана.

Деякі супутники вимірюють інфрачервоний сигнал, що випромінюється вулканічними газами. Це дозволяє визначити концентрацію газів, таких як діоксид сірки та водень хлорид. Супутникові дані допомагають виявити зміни в рельєфі гори, що можуть бути попередженням можливих зсувів чи обвалів.

Супутниковий моніторинг вулканічної активності забезпечує раннє виявлення ознак підвищеної активності вулкана та допомагає уникнути потенційних небезпек для людей та інфраструктури.

### **2.3 Інформаційна технологія моніторингу вулканічної активності**

В роботі запропоновано інформаційну технологію моніторингу вулканічної активності використовує різночасові знімки супутника Sentinel-2, аналізує теплові індекси та проводить аналіз параметрів води у водоймах. На рисунку 2.2 наведено етапи методу, опишемо детально.

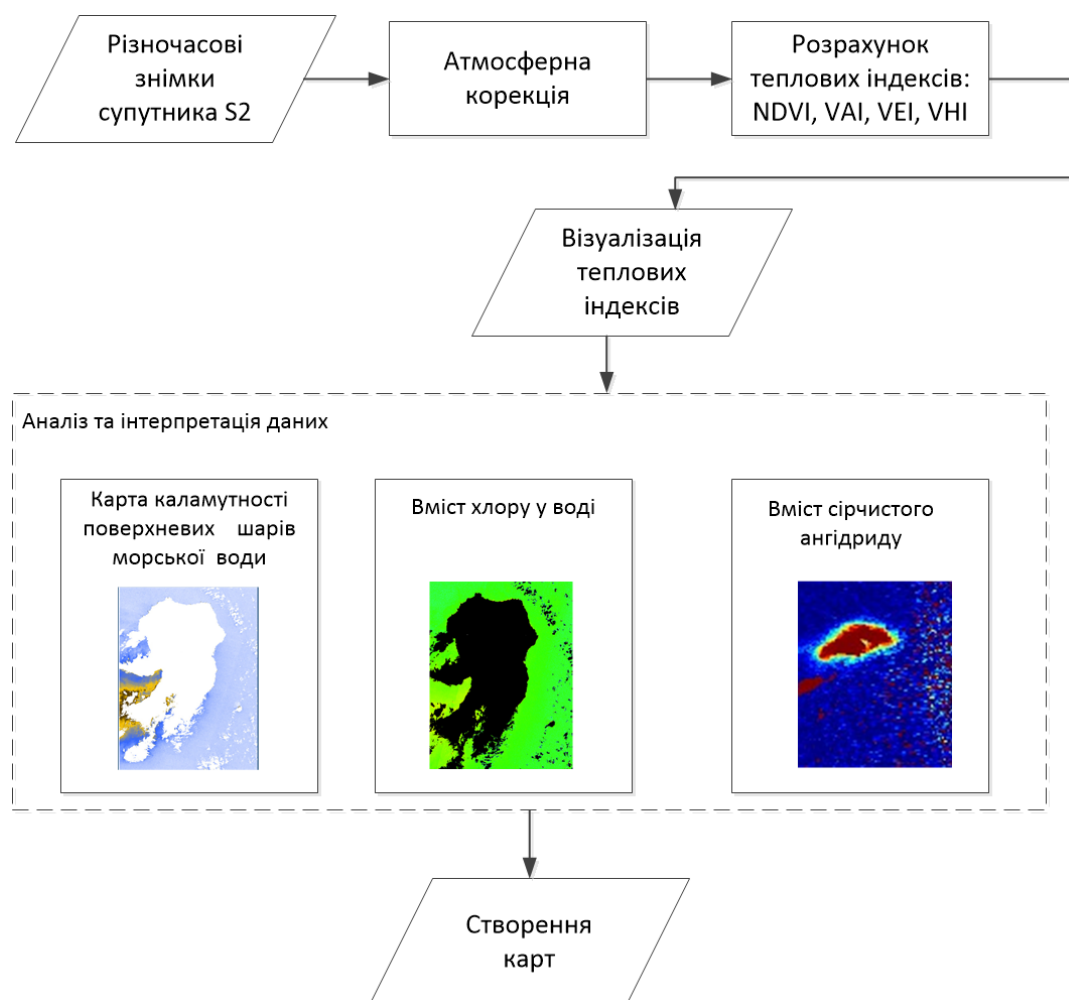


Рисунок 2.2 – Структурна схема технології моніторингу вулканічної активності

Для збору різночасових знімків використано відповідні бібліотеки для обробки супутникових даних, такі як Sentinel Hub. На рисунку 2.3 та рис.2.4 наведено знімки Sentinel-2 за різні періоди.

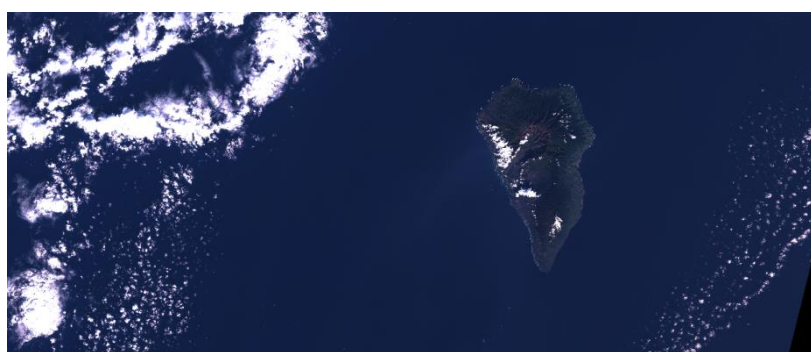


Рисунок 2.3 – Знімок вулкану грудень 2021 року





Рисунок 2.4 – Знімок вулкану жовтень 2021 року

Атмосферна корекція видаляє вплив атмосфери на супутникові знімки. Один з популярних методів - це метод DOS (Dark Object Subtraction), який видаляє вплив атмосферного розсіювання. Формула для DOS виглядає так:

$$R_{atmospheric\ corrected} = R_{measured} - R_{dark\ object} \quad (2.1)$$

Третій крок, який включає розрахунок теплових індексів, що допоможе виявити теплові аномалії на поверхні землі. Вулкани можуть виділяти тепло, і ці аномалії можуть бути показниками активності.

$$NDVI = (NIR + RED)(NIR - RED) \quad (2.2)$$

$$VAI = (NIR + SWIR)(NIR - SWIR) \quad (2.3)$$

$$VEI = (NIR + MIR)(NIR - MIR) \quad (2.4)$$

$$VHI = 2/3 \times (NDVI + VAI + VEI) \quad (2.5)$$

Гарячі об'єкти (наприклад, лавові потоки) особливо випромінюють у спектральній області SWIR. Більше того, поверхні з вищою температурою випромінюють сильніше на коротших, а не довгих довжинах хвиль SWIR. Отже, сенсори з каналами в інфрачервоному діапазоні можуть бути використані для ідентифікації та картування вулканічних теплових аномалій. З іншого боку, вдень відбите сонячне випромінювання становить велику проблему. Алгоритм NHI враховує вищезазначене, використовуючи два нормалізованих індексів для виявлення та картографування вулканічних гарячих точок:

$$NHI_{SWIR} = \frac{L_{2.2} - L_{1.6}}{L_{2.2} + L_{1.6}} \quad (2.6)$$

$$NHI_{SWNIR} = \frac{L_{1.6} - L_{0.8}}{L_{1.6} + L_{0.8}} \quad (2.7)$$

де,  $L_{2.2}$ ,  $L_{1.6}$  і  $L_{0.8}$  - випромінювання TOA [Вт м<sup>-2</sup> ср<sup>-1</sup> мкм<sup>-1</sup>], виміряні для кожного пікселя аналізованої сцени на довжинах хвиль 2.2 мкм, 1.6 мкм (SWIR) і 0.8 мкм (NIR), у відповідних спектральних діапазонах MSI/OLI. Індекс у рівнянні (2.6), що аналізує SWIR випромінювання, враховує те, що раніше було показано іншими авторами, які використовували дані з повітря [82]. Індекс у рівнянні (2.7), який використовує ті ж спектральні смуги нормалізованого коефіцієнта вигорання (NBR), що виділяють поверхні вигорання, повинен дозволити більш ефективно ідентифікувати високотемпературні поверхні. Ми оцінили поведінку індексів NHI проаналізувавши декілька сцен Sentinel 2 MSI та Landsat 8 OLI. Приклад показано на рисунку 2.5, на якому показано продукт червоного, зеленого і синього кольорів (RGB) зі знімка Sentinel 2.



а)



б)

Рисунок 2.5 – Знімок вулкану 2021 року: а) грудень; б) жовтень

Після розрахунку теплових індексів ви можете візуалізувати їх на мапі для подальшого аналізу.

Для аналізу вулканічної активності проведено аналіз параметрів води у водоймах на основі побудови карт каламутності поверхневих шарів морської води, вміст хлору у воді та вміст сірчистого ангідриду. Розрахунок відображення водної поверхні (Remote Sensing Reflectance - Rrs):

$$Rrs = (Lw / Es), \quad (2.8)$$

де  $Lw$  - відображення водної поверхні (пропорційно рівню світла, яке покидає воду);  $Es$  - сумарна інсоляція на водній поверхні.

Величина Rrs є співвідношенням між відбитим світлом від води та входячим світлом води.

Оптична турбідність (T) може бути розрахована з Rrs, існують різні формули для цього. Однією з популярних формул є формула Ліньєра-Туоронга:

$$T = -k * \ln(Rrs), \quad (2.9)$$

де T - оптична турбідність; Rrs - відображення водної поверхні; k - константа, яка залежить від властивостей води та супутника.

Для оцінки параметрів якості води під час кризи виверження ми обрали каламутність (FNU) та хлорофіл-а (мг/м<sup>3</sup>) як стандартні продукти:

$$FNU = I_0 - I / I_0 \times 1000 \quad (2.10)$$

де  $FNU$  - індекс фракційного числа азоту (у фракційних одиницях),  $I_0$  - інтенсивність світла, яке виходить з джерела (безперервна спектральна інтенсивність),  $I$  - інтенсивність світла, яке проходить через воду (повернене світло).

Оцінка доброго екологічного стану прибережних вод у контексті Водної рамкової директиви ЄС включає обидва показники - каламутність і хлорофіл-а. Кінцеві продукти якості води були отримані з просторовою

роздільною здатністю 10м для Sentinel-2. Дані були відмічені з використанням стандартного маскування суші та хмар, а також низькою ефективністю атмосферної корекції. Каламутність оцінювали за напіваналітичним алгоритмом Нечада та ін. [16], використовуючи дані дистанційного зондування відбиття червоної смуги ( $R_{rs} 665$  нм) Sentinel-2. Цей алгоритм вже використовувався в декількох середовищах. Ці напіваналітичні моделі ґрунтуються на притаманних воді оптичних властивостях і забезпечують більш глобальне застосування. Концентрацію хлорофілу-а у воді розраховували за допомогою загальноновживаного алгоритму OC3 - трисмугового максимуму, який використовує поліноміальну функцію четвертого порядку як проксі-функцію цвітіння хлорофілу-а:

$$Chl-a = a_0 + a_1 \times R1 + a_2 \times R2 + a_3 \times R3 + a_4 \times R4 \quad (2.11)$$

де  $Chl-a$  - концентрація хлорофілу-а,  $R1, R2, R3, R4$  - значення спектральних відбитків світла в різних діапазонах хвильових довжин,  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  - коефіцієнти, які обчислюються під час калібрування алгоритму.

Завершальним етапом є візуалізація отриманих даних в географічній інформаційній системі QGIS.

## 2.4 Висновки до другого розділу

Було проведено аналіз наукових публікацій, присвячених питанням моніторингу вулканічної активності. Цей аналіз надав цінний інсайт щодо сучасних методів та підходів, які використовуються в галузі вулканології для виявлення, прогнозу та відслідковування вулканічних активностей. Виявлено, що сучасні дослідження включають в себе використання супутникових даних, сейсмічного моніторингу, метеорологічних вимірювань та інших методів для отримання повного обсягу інформації про стан вулканів. Також були розглянуті алгоритми для пошуку температури поверхні землі, які можуть бути корисними для виявлення теплових змін, пов'язаних із вулканічною активністю.

Описано методику моніторингу вулканічної активності, яка включає в себе різночасові знімки супутника, атмосферну корекцію, розрахунок теплових індексів, візуалізацію цих індексів та аналіз отриманих даних. Ця методика надає можливість відстежувати зміни в температурі та інших параметрах поверхні вулкана, що може бути корисним для передбачення вулканічних вивержень та забезпечення безпеки населення.

## 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВУЛКАНІЧНОЇ АКТИВНОСТІ В ЛА-ПАЛЬМІ

### 3.1 Програмне забезпечення та опис даних

Для досягнення цілей цього дослідження було використано наступне програмне забезпечення:

- QGIS 3.20.3: QGIS використовувався для попередньої обробки та постобробки супутникових знімків, включаючи накладання шарів та мозаїку, зберігання та управління географічними даними в пакеті баз геоданих, компіляції та редагування наборів даних ГІС, а також відображення та аналізу просторових даних як у векторному, так і в растровому форматі.
- інструментальне програмне забезпечення для попередньої обробки та накладання шарів на супутниковий знімок Sentinel-2A;
- інтерпретатор Python.

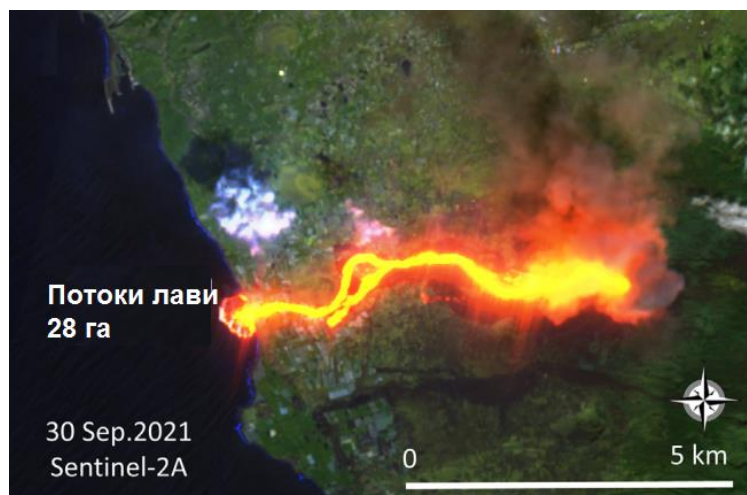
19 вересня 2021 року почалося виверження нового вулкану на Кумбре-В'єха, що становить південну частину острова Ла-Пальма в іспанського архіпелагу Канарські острови (рис. 3.1). Лава потекла вниз з гори після того, як після того, як у вулкані відкрилася тріщина, викидаючи велику кількість вулканічного матеріалу та попелу в повітря. Лава руйнувала все на своєму шляху на своєму шляху, а через десять днів досягла океану, що стало найбільш руйнівним виверження вулкану на Ла-Пальмі з моменту початку спостережень (IGN, 2021). Потік лави, що контактував з морським середовищем, швидко застигла, створивши нову лавову дельту, відому в народі як "фаджана" (рис. 3.2), і сформувавши новий півострів .

Влада встановила зону відчуження навколо нової дельти, включаючи водного масиву з 500-метровим охоронним периметром, до якого не можуть заходити судна. На рис. 3.3 показано формування цього віялоподібного пагорба з лопатевою морфологією в західній частині Ла-Пальма в результаті

накопичення вулканічного матеріалу на дні океану. Знімки Sentinel-2 до і після утворення нової смуги, 15 і 30 вересня 2021 року відповідно, вказують на зміну берегової лінії (рис. 3). Новостворена лавова дельта продовжувала зростати в міру того, як гарячі лавові потоки входили в море, розширюючи берегову лінію назовні: станом на 30 вересня 2021 року вона становила 28 га, 34 га до 10 жовтня 2021 року і 35 га до 15 жовтня 2021 року. 25 грудня 2021 року місцева влада офіційно оголосила про припинення виверження через три місяці. Виверження вулкану Ла-Пальма 2021 року стало найтривалішим виверженням, зафіксованим в історії острова, і найбільш руйнівним за останнє століття в Європі.



а)



б)

Рисунок 3.1 - Розташування досліджуваної території: а) на карті; б) сцена після виверження

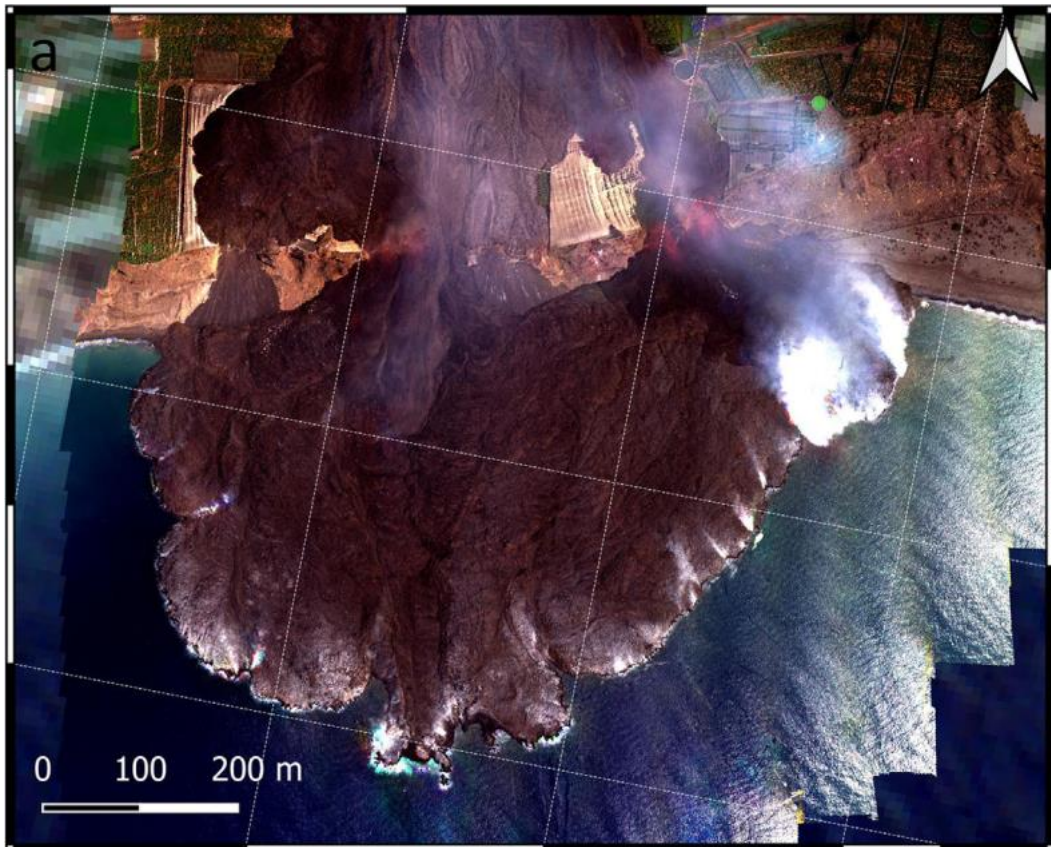


Рисунок 3.2 - RGB (червоно-зелено-синя) композитна сцена від 2 жовтня 2021 року

Тисячі людей були евакуйовані, а сотні об'єктів були після виверження вулкану. Уряд Іспанії оголосив Ла-Пальму зоною стихійного лиха і підготував план реконструкції, комплекс невідкладних заходів та фінансову підтримку для постраждалих. На прохання Головного управління з питань цивільного захисту та надзвичайних ситуацій Іспанії (CENEM) для підтримки реагування на надзвичайні ситуації під час виверження вулкану було задіяно систему швидкого картографування Copernicus Emergency Management Service (CEMS) (EMSR546). Для аналізу використовувалися як радіолокаційні, так і оптичні супутникові дані, залежно від наявності придатних для використання знімків.

Оскільки виверження тривало, а ситуація в Ла-Пальмі розвивалася, зокрема, з появою нових потоків лави, зокрема, з новими потоками лави



внаслідок часткового обвалу головного вулканічного конуса, оперативне картографування надало оновлену інформацію про виверження з детальним описом змін у розмірах попелу та лавових потоків, а також зруйнованих доріг, будівель та інших об'єктів інфраструктури. Супутникові дослідження є переконливими і важливими для нашого добробуту, як це було продемонстровано під час цієї надзвичайної ситуації.

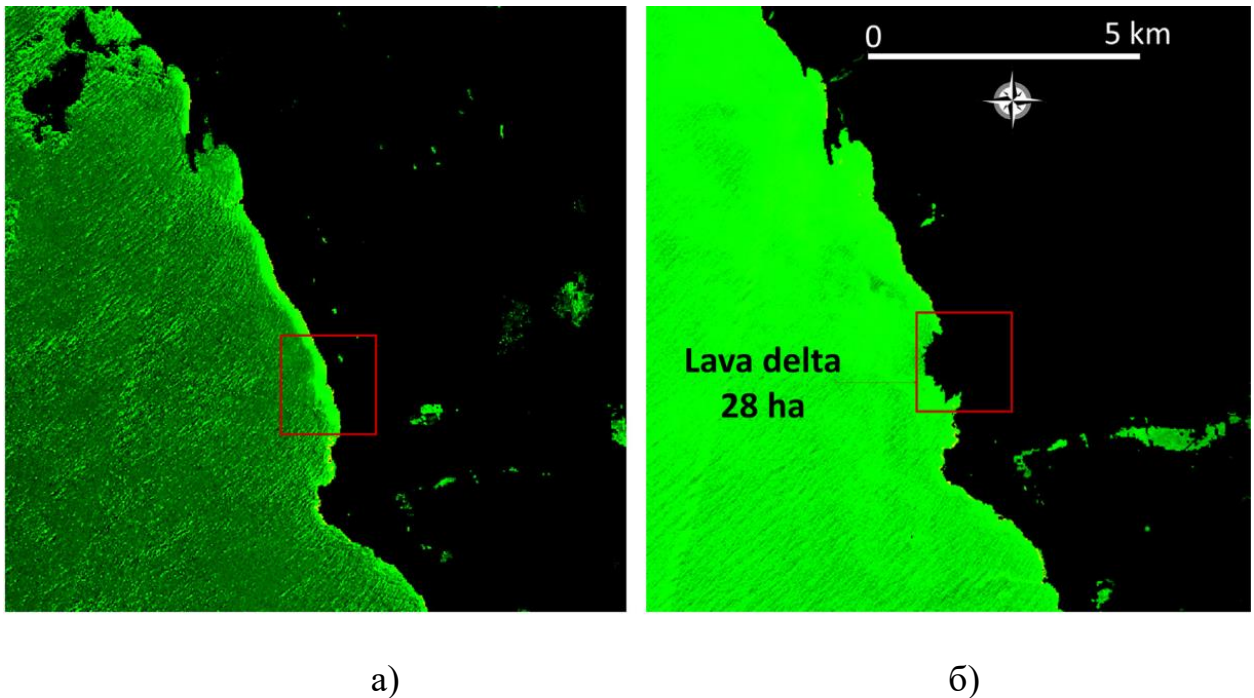


Рисунок 3.3 - Карта берегової лінії: а) до (15 вересня 2021 року), б) після (30 вересня 2021 року) утворення лавової дельти на західній частині Ла-Пальми

### 3.2 Аналіз та інтерпретація даних

Розглянемо результати використання теплових індексів, таких як NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), VAI (Vegetation Anomaly Index), VEI (Vegetation Health Index) та VHI (Vegetation Health Index), та їх інтерпретацію.

NDVI є важливим індексом для визначення ступеня живості рослинного покриву на земній поверхні. Він базується на різниці між

видимою і поблизькою інфрачервоною світловою радіацією, і його значення може коливатися від -1 до +1. На рис.3.4 наведено візуальний результат індексу.

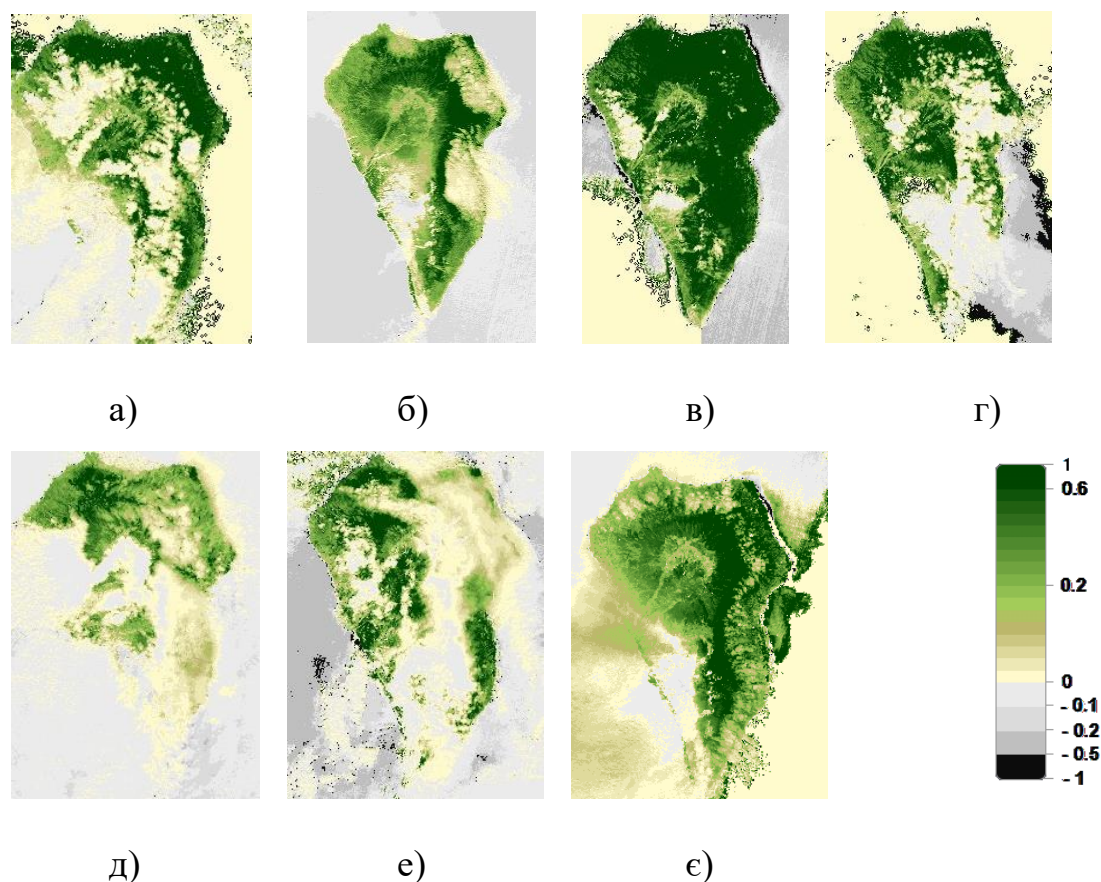


Рисунок 3.4 – NDVI для вулкана Кубре-В'єха; а) 14.11.2021;  
б) 14.12.2021; в) 15.10.2021; г) 19.11.2021; д) 20.09.2021; е) 29.11.2021;  
є) 30.10.2021

На рисунку 3.4 б, в більшість території NDVI в межах 0.2-0 – це вказує на наявність здорового рослинного покриву. Це може означати, що рослинний покрив є стабільним та здоровим. На рисунку 3.4 а, д значення NDVI рівне 0 може свідчити про відсутність рослинного покриву або дуже низьку щільність рослин. Це може бути наслідком пошкодження рослин чи антропогенних втручань. На решті рисунків NDVI в межах -0.1 до -0.2, що вказує на різні стани рослин, включаючи сушку, пошкодження або погане здоров'я рослин. Зазвичай, менші від'ємні значення вказують на менше здоров'я рослин.

VAI є індексом, призначеним для виявлення аномалій в рослинному покриві. Він допомагає визначити зміни в рослинності, які можуть бути наслідком вулканічних вивержень, осушення чи інших природних аномалій (рис.3.5).

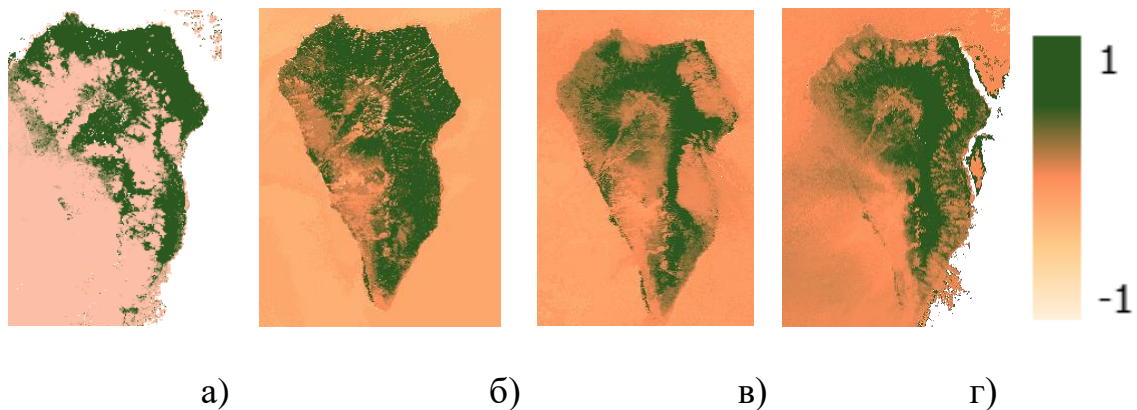


Рисунок 3.5 – VAI для вулкана Кубре-В'єха; а) 14.11.2021;  
б) 14.12.2021; в) 15.10.2021; г) 30.10.2021

Отримані значення VAI вказує на ступінь аномалій у рослинному покриві. Високі позитивні значення можуть свідчити про надзвичайно здорову вегетацію, в той час як високі негативні значення можуть вказувати на аномалії, такі як посушення або пошкодження рослин. Рис.3.5а, 3.5б містить більше пікселів пікселі в діапазоні 1, що вказує на здорову вегетацію, в інший період спостерігаємо порушення рослинного покриву.

VEI оцінює стан здоров'я рослин та їх спроможність володіти фотосинтезом. Зміни в VEI можуть вказувати на стрес рослин, що може бути викликано вулканічною активністю чи іншими факторами. Аналіз VEI дозволяє відстежувати вплив вулканічних викидів на рослинний покрив та шукати ознаки деградації (рис.3.6).

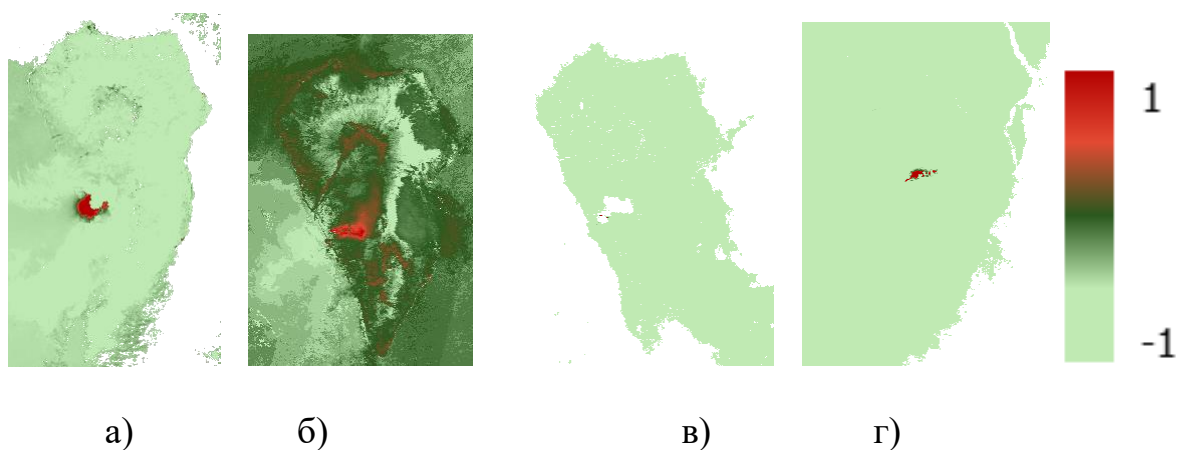


Рисунок 3.6 – VEI для вулкана Кубре-В'єха; а) 14.11.2021;  
б) 14.12.2021; в) 15.10.2021; г) 30.10.2021

VHI поєднує в собі інформацію про теплову активність та вологість рослинного покриву. Він дозволяє оцінювати стан рослин в контексті впливу температур і вологості на їх здоров'я та розвиток (рис.3.7).

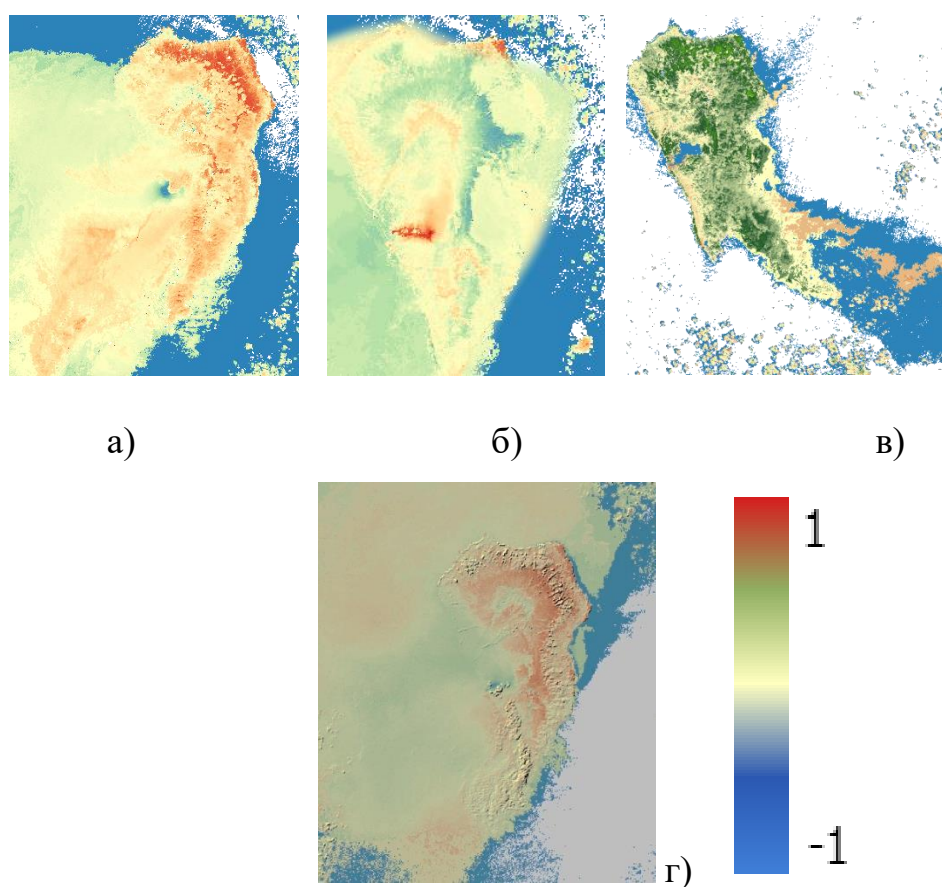


Рисунок 3.7 – VHI: а) 14.11; б) 14.12.2021; в) 15.10.2021; г) 30.10.2021

Значення VHI від +0.1 до +1 вказують на те, що рослинний покрив перебуває в нормальному, здоровому стані, без стресу. Значення VHI від 0 до +0.1 можуть вказувати на початковий стрес рослинного покриву, але стан рослин ще не є критичним. Значення VHI від -0.1 до 0 можуть свідчити про помітний стрес рослинного покриву та можливість виникнення проблем. Значення VHI від -0.1 до -1 вказують на серйозний стрес рослинного покриву і можливу шкоду для рослин.

На рис. 3.8 та в додатку А показано карти каламутності поверхневої морської води, отримані на основі зображень, причому зображення відповідають попереднім дням до і після початку виверження вулкана 19 вересня 2021 року. Перше спостереження, зроблене на основі зібраних даних, полягає в тому, що, як повідомлялося для поверхневої каламутності, західна частина острова мала помітно більші значення і градієнти, де нещодавні лавові потоки потрапили в океан. Загалом, рівні каламутності були дуже низькими ( $< 2$  FNU) в прибережній зоні 10, 15, 25 і 26 вересня 2021 року, до утворення лавової дельти. 30 вересня, після утворення дельти лави, у західній частині Ла-Пальми спостерігався підвищений рівень каламутності ( $\sim 4$  FNU), а 15 жовтня каламутність була вищою, ніж у попередні дні, із середнім рівнем  $\sim 10$  FNU, а в деяких регіонах досягала  $\sim 20$  FNU. Цей вулканічний шлейф з'явився поруч з дельтою лави в західній частині в середині жовтня. Високий рівень каламутності через шлейфи частинок зберігався не тільки в центрі західної частини, але й на південному заході. В інших регіонах каламутність води була подібною до стану перед виверженням. Ці шлейфи зі знебарвленою водою вулканічного походження можуть мати можливий вплив на водоростеві спільноти, оскільки вулкани викидають в океани велику кількість матеріалу зі змінним хімічним складом, що є потенційним джерелом мікроелементів і поживних речовин. Середні рівні каламутності в регіоні інтересу (ROI) поблизу дельти лави в західній частині острова, що підкреслює підвищення рівня каламутності в порівнянні з ситуацією до і

після виверження внаслідок виверження попелу і зміни дельти лави, що впливає на хімічний склад океану.

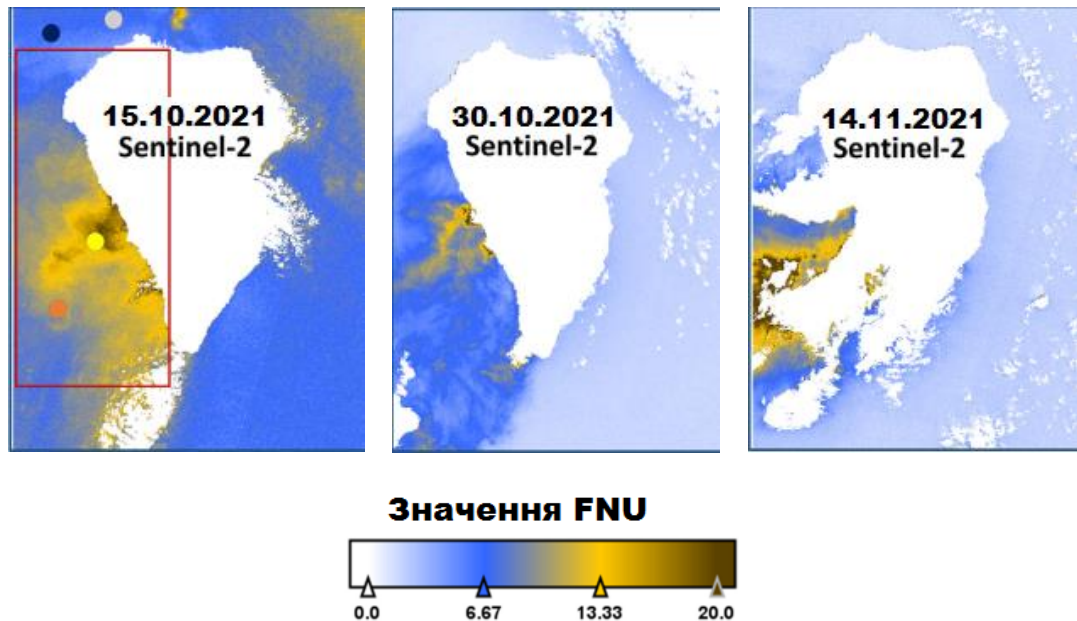


Рисунок 3.8 – Карти поверхневої каламутності морської води (FNU)

На рис. 3.9 та в додатку А показані карти поверхневого вмісту хлору в морській воді, що відповідають дням до і після початку виверження вулкану 19 вересня 2021 року. Найпоширенішими умовами хлор-а в цей період були зазвичай  $<0,3$  мг/м<sup>3</sup>, в межах 0,1-0,39 мг/м<sup>3</sup> з оліготрофними водами, що спостерігалися навколо острова, а також поблизу лавової дельти. Як видно з цієї часової послідовності, концентрація хлор-а в західній частині після утворення лавової дельти суттєво не збільшилася, тому пікове цвітіння планктону, яке спостерігалось протягом досліджуваного періоду, не було виявлено ні на мезо-, ні на субмезомасштабному рівнях. Отже, не було чітких ознак евтрофних умов і цвітіння водоростей, що розвинулися внаслідок вулканічного виверження і формування лавової смуги. Типові низькі значення хлор-а не були швидко змінені в бік евтрофних умов протягом жовтня, листопада або грудня 2021 року. Однак інші дослідження припускають, що потенційна реакція швидкості росту після цвітіння фітопланктону може відбутися після екстремальних погодних явищ та природних. Виверження вулканів можуть спричинити цвітіння водоростей,

коли дифузне залізо з вулканічного попелу взаємодіє з водою і запліднює існуючі водорості. Природні докази біологічної реакції на осадження вулканічних частинок зони субдукції у напрямку моря походять із супутникових знімків і даних про біооптичні властивості морської води. Нещодавнє дослідження показало, що під час виверження вулкану Райкоке (Курильські острови) видимі супутникові знімки показали розширення площі острова і, можливо, пов'язане з ним цвітіння водоростей на південь від острова. Присутність багатих на вулканічні матеріали матеріалів може обмежувати, стимулювати або посилювати реакцію спільноти фітопланктону поблизу лавової дельти. Під час виверження Ла-Пальма очікуваний шлейф знебарвленої води не спричинив масового цвітіння, принаймні, цього не спостерігалось протягом досліджуваних безхмарних днів.

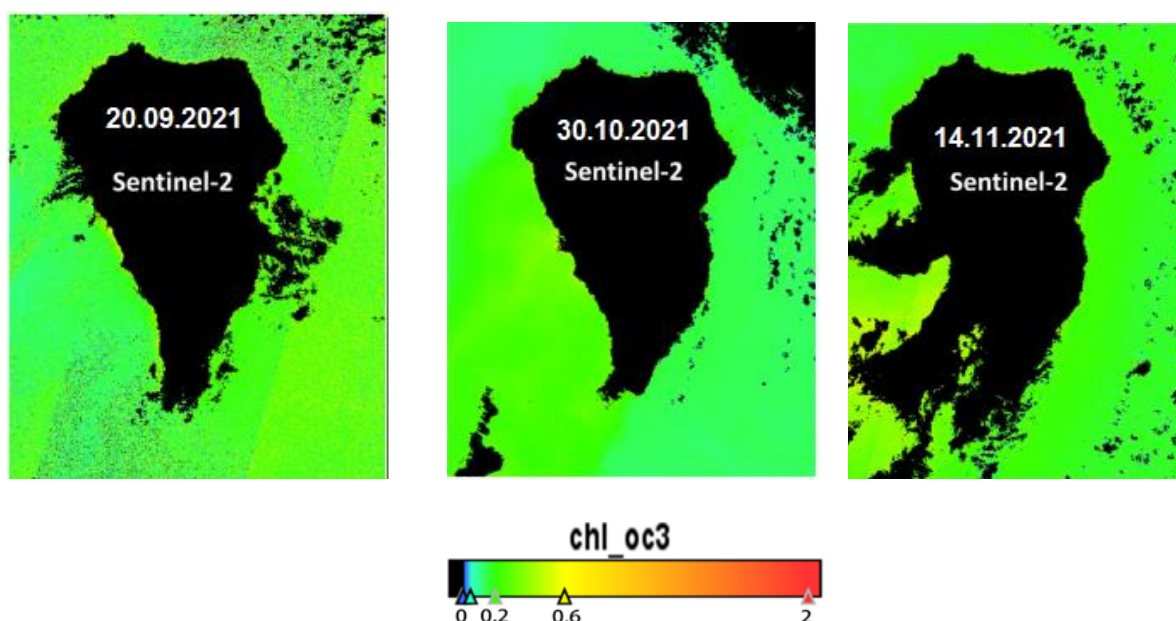


Рисунок 3.9 – Карти концентрації хлорофілу-а у поверхневій морській воді

Виверження вулкану може викинути значні кількості газів у атмосферу, включаючи сульфурний діоксид ( $\text{SO}_2$ ). Сульфурний діоксид - це один з основних газів, які викидаються під час вулканічних вивержень, і він може

мати важливий вплив на довкілля та клімат. Сульфурний діоксид може утримувати сонячне випромінювання і призводити до охолодження клімату в регіонах, де великі вулканічні виверження викидають значні обсяги  $\text{SO}_2$ . На рис.3.10 наведено значення  $\text{SO}_2$ .

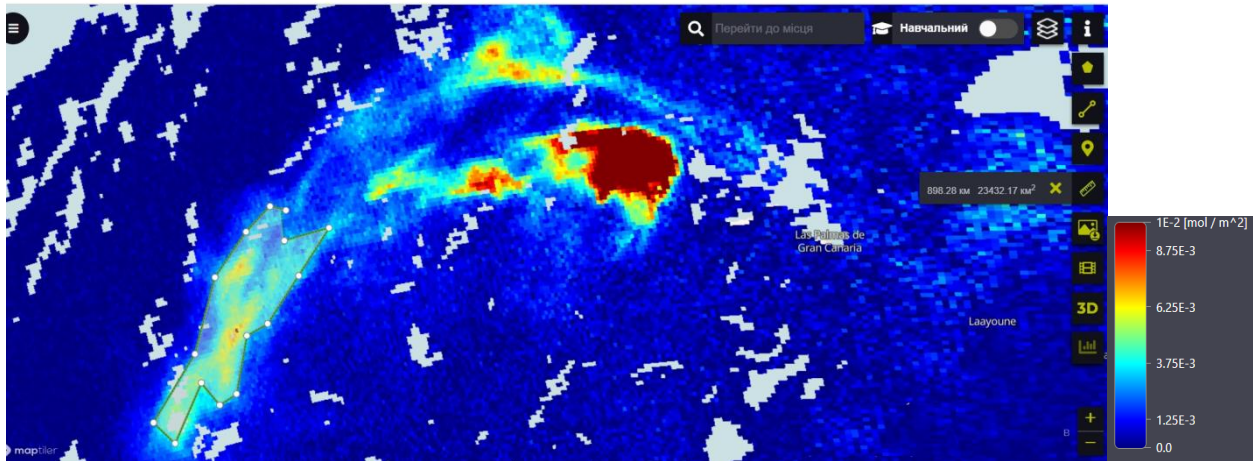


Рисунок 3.10 – Карти концентрації  $\text{SO}_2$  15.10.2021 року

На рис. 3.11 показано спектральну сигнатуру супутника Sentinel-2 в період 15 жовтня 2021 року над чотирма контрольними точками, розподіленими по різних ділянках (P1 і P3 - у чистій воді, P2 і P4 - у шлейфі каламуті поблизу дельти лави; розташування контрольних точок). Отриманий спектр показує значення коефіцієнта відбиття дистанційного зондування ( $R_{rs}$ ) для океанічних і прибережних вод поблизу лавової дельти. Цікаво, що вздовж західного узбережжя спостерігалася зміна значень  $R_{rs}$ ; далеко від дельти лави в північному регіоні радіометрична сигнатура нагадувала типову для океанічних прибережних вод, тоді як в межах шлейфу  $R_{rs}$  поступово змінювалася в інший спектр з характерним падінням значень для зеленого, червоного, червоного та ближнього інфрачервоного діапазонів (560-850 нм). Ці попередні результати щодо дискримінації знебарвлених морських вод за їх відбивною здатністю, що додатково підтверджує неабияку цінність цих продуктів якості води після послідовної корекції атмосферних



та сонячних променів за допомогою процесора ACOLITE процесора ACOLITE.

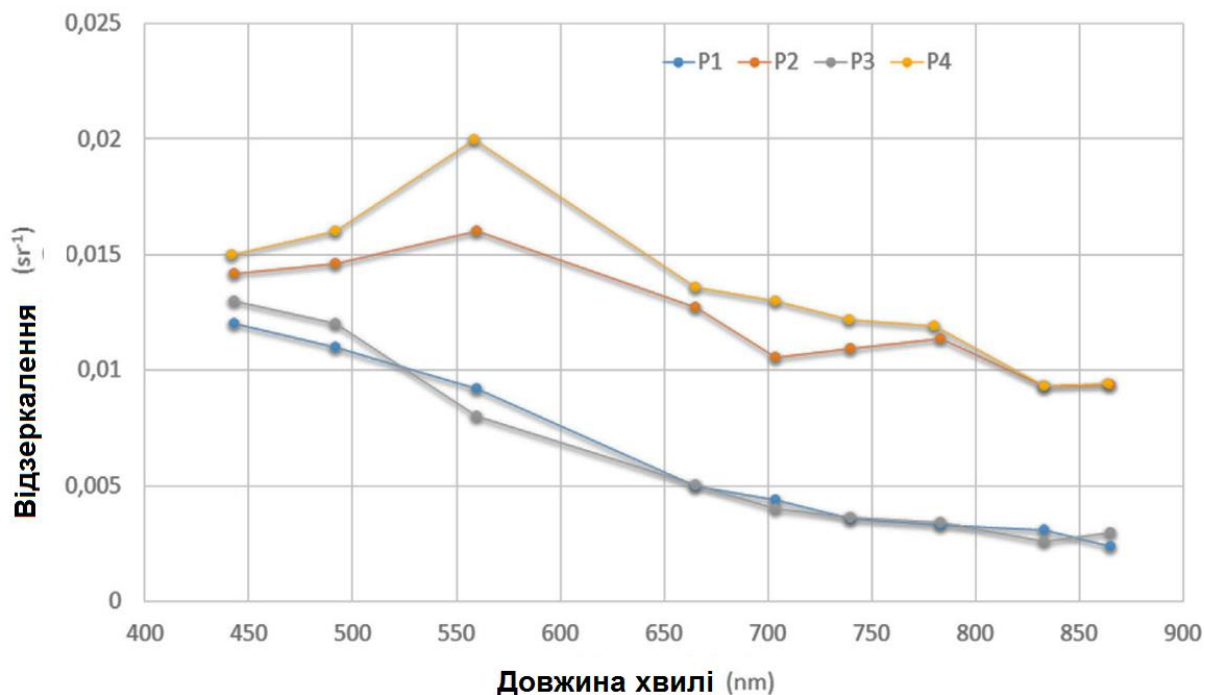


Рисунок 3.11 – Спектральна характеристика знімків супутника Sentinel-2

### 3.3 Висновки до третього розділу

У третьому розділі проведено аналіз і інтерпретацію даних, отриманих в результаті моніторингу вулканічної активності на острові Ла-Пальма з використанням супутникових знімків Sentinel-2. Результати свідчать про видимі зміни в каламутності поверхневої морської води, спричинені виверженням вулкана. Підвищений рівень каламутності спостерігався після утворення лавової дельти та поширення лавового шлейфу. Вулканічні шлейфи, містять в собі матеріали зі змінним хімічним складом, які можуть впливати на хімічний склад океану та водоростеві спільноти.

Такий аналіз важливий для розуміння впливу вулканічної активності на морське середовище та навколишню екосистему. Ці дані можуть бути корисні для дослідження впливу вулканічних вивержень на океанічний екосистеми і хімічний склад води.

## ВИСНОВКИ

Було розроблено інформаційну технологію моніторингу вулканічної активності в Ла-Пальмі з використанням даних дистанційного зондування, отриманих з супутників серії Sentinel-2. Виверження вулкану Ла-Пальма у вересні-грудні 2021 року було складною для ефективного відстеження. Тим не менш, використання високороздільних супутникових знімків було важливим для відстеження розвитку нової лавової дельти та вимірювання впливу виверження на якість води, зокрема на каламутність та концентрацію хлору, які не підлягали регулярному моніторингу.

Аналіз даних показав, що після утворення лавової дельти спостерігався підвищений рівень каламутності в прибережній зоні. Водні шлейфи, які виникли після виверження, мали значний вплив на фізико-хімічні властивості води, особливо в прибережних областях. Виверження вулкану призвело до розподілу різних хімічних елементів в океані, і ця технологія надає можливість детально аналізувати ці зміни. Зокрема, ця інформація може бути корисною для профілактики і безпеки, а також для дослідження впливу вулканічних вивержень на морські екосистеми.

З врахуванням постійного розвитку супутникових технологій та методів аналізу даних, доступ до інформації з високою роздільною здатністю буде зростати, дозволяючи ще більш повно та репрезентативно вивчати прибережні і внутрішні водні середовища, особливо під час надзвичайних ситуацій і катастроф. Ця робота демонструє важливість використання супутникових технологій для моніторингу вулканічної активності та її впливу на прибережні води та екологічну безпеку.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Байрак Г. Географічна інтерпретація аерокосмічної інформації. Вулканічний рельєф / Г. Байрак, Б. Муха // Дистанційні дослідження Землі: навч. посібник. – Львів: ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2010. – С. 500-503.
2. Лазарева І.І. Вулканологія: електронний навч. посібник / І.І. Лазарева. – Київ, 2015. Електронний ресурс ННІ “Інститут геології”.
3. Miller T.P., Casadevall T.J. Volcanic ash hazards to aviation II Encyclopedia of Volcanoes. Academic Press, San Diego, California. 2000. P. 915-930.
4. Lundgren, P, P. Berardino, M. Coltelli, G, Fornaro, R. Lanari, G. Puglisi, E. Sansosti, and M. Tesauero. Coupled magma chamber inflation and sector collapse slip observed with synthetic aperture radar interferometry on Mt. Etna volcano// J. Geophys. Res., 2003.108(B5), 2247, doi: 10.1029/2001JB000657.
5. Sparks, R.S. J., Aspinall, W.P., Crosweller, H.S., and Hincks, T.K. (2013). Risk and uncertainty assessment of volcanic hazards. Cambridge University Press. 364–397. DOI: 10.1017/CBO9781139047562.012..
6. Brown, S.K., Sparks, R.S.J., Mee, K., Vye-Brown, C., Ilyinskaya, E., Jenkins, S.F., and Loughlin, S.C. (2017). Country and regional profiles of volcanic hazard and risk. Global Volcanic Hazards and Risk. Cambridge University Press, Cambridge.
7. Cappello, A.; Zanon, V.; Del Negro, C.; Ferreira, T.J.L.; Queiroz, M.G.P.S. Exploring lava-flow hazards at Pico Island, Azores Archipelago (Portugal). Terra Nova 2015, 27, 156–161.
8. Carr, B.B.; Clarke, A.B.; Arrowsmith, J.R.; Vanderkluysen, L.; Dhanu, B.E. The emplacement of the active lava flow at Sinabung Volcano, Sumatra, Indonesia, documented by structure-from-motion photogrammetry. J. Volcanol. Geotherm. Res. 2018.
9. Huang, H.; Long, J.; Yi, W.; Yi, Q.; Zhang, G.; Lei, B. A method for using unmanned aerial vehicles for emergency investigation of single geo-hazards

and sample applications of this method. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2017, 17, 1961–1979.

10. Ganci, G.; Cappello, A.; Bilotta, G.; Hérault, A.; Zago, V.; Del Negro, C. Mapping Volcanic Deposits of the 2011–2015 Etna Eruptive Events Using Satellite Remote Sensing. *Front. Earth Sci.* 2018, 6, 83.

11. Ganci, G.; Cappello, A.; Zago, V.; Bilotta, G.; Hérault, A.; Del Negro, C. 3D Lava flow mapping of the Etna eruption using tri-stereo optical satellite data. *Ann. Geophys.* 2018.

12. Corradino, C.; Ganci, G.; Bilotta, G.; Cappello, A.; Del Negro, C.; Fortuna, L. Smart Decision Support Systems for Volcanic Applications. *Energies* 2019, 12, 1216.

13. Dietterich, H.R.; Downs, D.T.; Stelten, M.E.; Zahran, H. Reconstructing lava flow emplacement histories with rheological and morphological analyses: The Harrat Rahat volcanic field, Kingdom of Saudi Arabia. *Bull. Volcanol.* 2018, 80, 85.

14. Bonny, E.; Thordarson, T.; Wright, R.; Höskuldsson, A.; Jónsdóttir, I. The volume of lava erupted during the 2014 to 2015 eruption at Holuhraun, Iceland: A comparison between satellite- and ground-based measurements. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 2018, 123, 5412–5426.

15. Anantrasirichai, N.; Biggs, J.; Albino, F.; Hill, P.; Bull, D. Application of Machine Learning to Classification of Volcanic Deformation in Routinely Generated InSAR Data. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 2018, 123, 6592–6606.

16. Jeppesen, J.H.; Jacobsen, R.H.; Inceoglu, F.; Toftegaard, T.S. A cloud detection algorithm for satellite imagery based on deep learning. *Remote Sens. Environ.* 2019, 229, 247–259.

17. Kadavi, P.R.; Lee, C.W. Land cover classification analysis of volcanic island in Aleutian Arc using an artificial neural network (ANN) and a support vector machine (SVM) from Landsat imagery. *Geosci. J.* 2018, 22, 653–665.

18. Chen, Y.; Fan, R.; Bilal, M.; Yang, X.; Wang, J.; Li, W. Multilevel cloud detection for high-resolution remote sensing imagery using multiple convolutional neural networks. *ISPRS Int. J. Geo Inf.* 2018, 7, 181.
19. Wang X., Yan F., Su F. (2021). Changes in coastline and coastal reclamation in the three most developed areas of China, 1980–2018. *Ocean Coast. Manage.* 204, 105542. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105542.
20. Wiles E., Loureiro C., Cawthra H. (2022). Shoreline variability and coastal vulnerability: Mossel Bay, South Africa. *Estuarine Coast. Shelf Sci.* 268, 107789. doi: 10.1016/j.ecss.2022.107789.
21. Pouliot D., Alavi N., Wilson S., Duffe J., Pasher J., Davidson A., et al. (2021). Assessment of landsat based deep-learning membership analysis for development of from-to change time series in the prairie region of Canada from 1984 to 2018. *Remote Sens.* 13, 634. doi: 10.3390/rs13040634

## Додаток А.

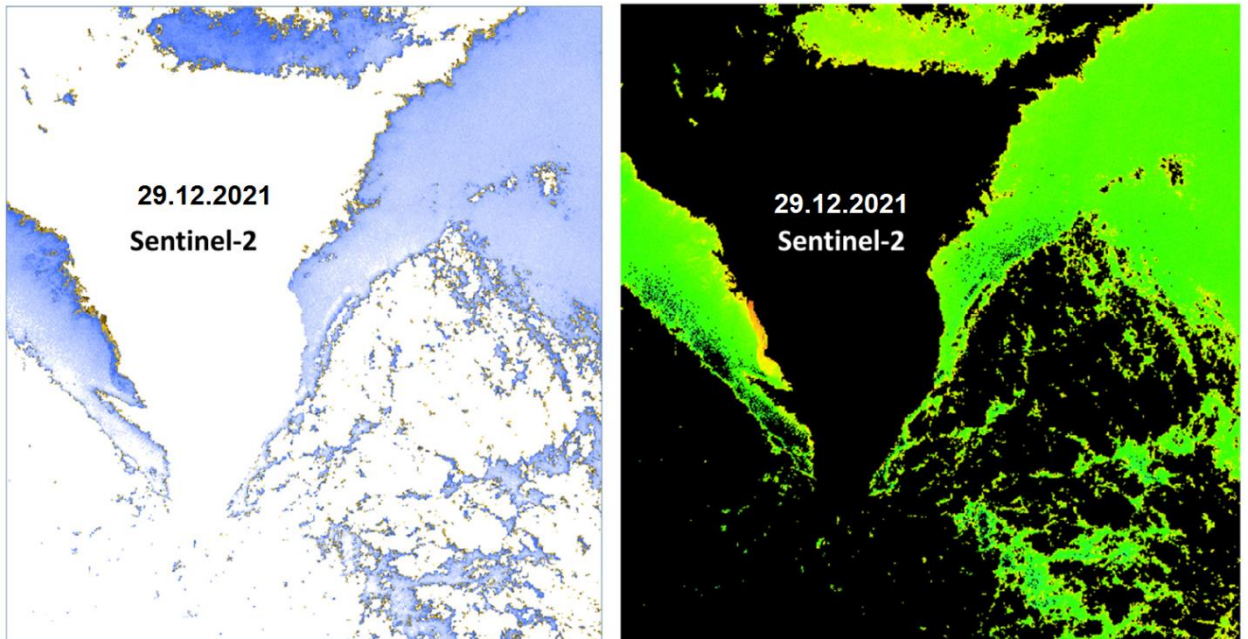


Рисунок А.1 – Карти поверхневої каламутності морської води (FNU) та концентрації хлорофілу-а

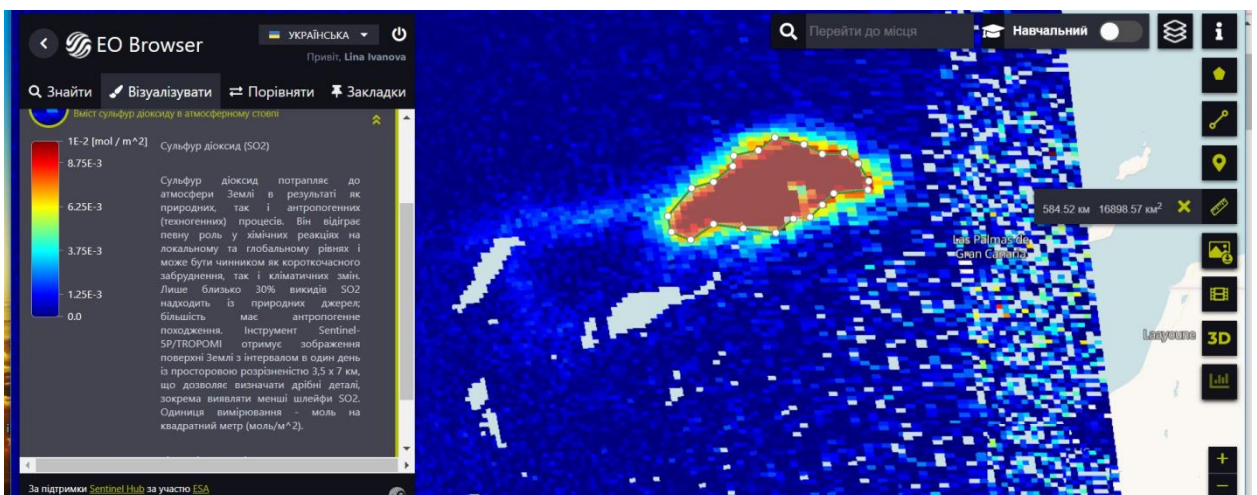


Рисунок А.2 – Карти концентрації SO<sub>2</sub> 30.10.2021 року

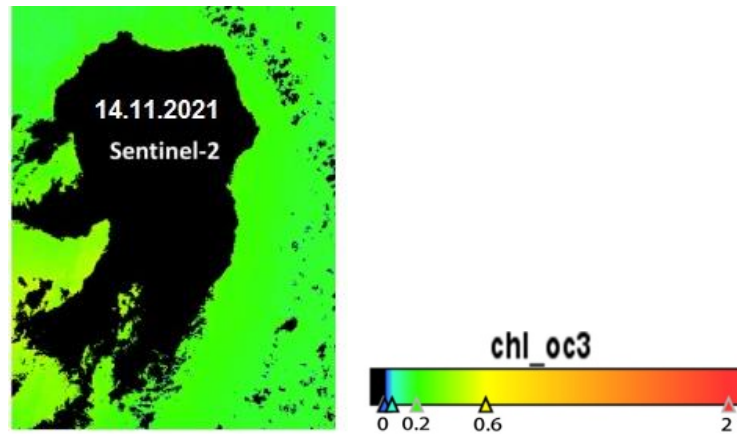


Рисунок А.3 – – Карти концентрації хлорофілу-а у поверхневій морській воді

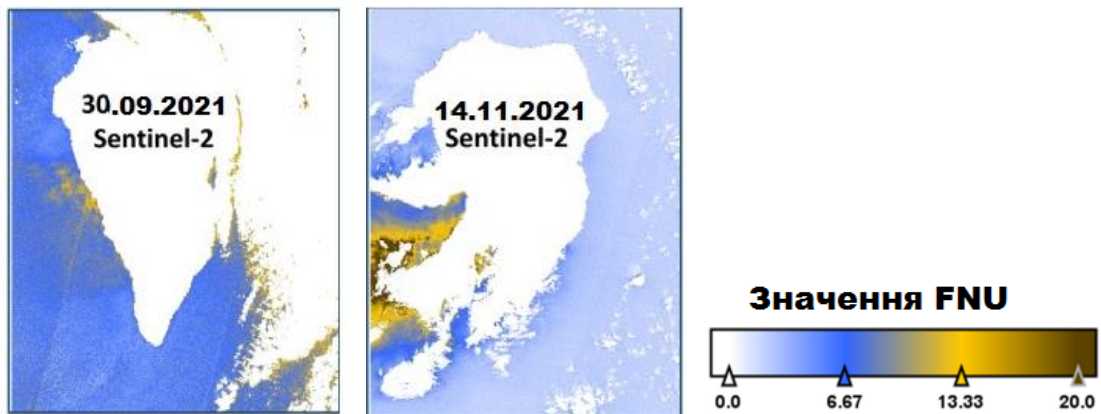


Рисунок А.4 – Карти поверхневої каламутності морської води (FNU)