

Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
ННІ «Інститут геології»  
Кафедра геоінформатики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА  
спеціальність 103 – Науки про Землю  
освітня програма «Геоінформатика»

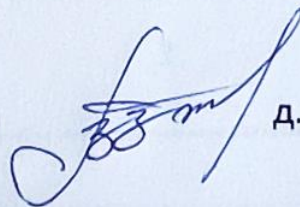
ТЕМА: «ТЕХНОЛОГІЇ ГІС ТА ДЗЗ В ЗАДАЧАХ МОНІТОРИНГУ ЗЕМЛЕТРУСІВ»

Виконала  студентка 4-го курсу  
Кафедри геоінформатики Савеко Аліна Дмитрівна

Науковий керівник  д.т.н., професор Зацерковний В.І.

Робота рекомендується до захисту (протокол № 14 номер протоколу)  
засідання кафедри геоінформатики від 05.06.2023 року 05.06.23р

Завідувач кафедри



д.т.н., професор Зацерковний В.І.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП .....</b>	<b>6</b>
<b>РОЗДІЛ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛЕТРУСІВ .....</b>	<b>10</b>
1.1. Загальні відомості про землетруси і збитки про них .....	10
1.2. Характеристики землетрусів .....	16
1.3. Шкали для виміру вили землетрусів .....	22
1.4. Хронологія розвитку прогнозування землетрусів .....	25
<b>РОЗДІЛ 2. ОЦІНКА СЕЙСМІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ТА СЕЙСМІЧНОГО ЗАХИСТУ</b>	
<b>ТЕРИТОРІЙ .....</b>	<b>39</b>
2.1. Аналіз сейсмічної небезпеки територій України .....	40
2.2. Перелік населених пунктів України, розташованих у сейсмічно небезпечних районах.....	46
2.3. Карти загального сейсмічного районування (ЗСР) території України .....	49
2.4. Забезпечення моніторингу сейсмологічної небезпеки техногенного походження .....	53
2.5. Локальна сейсмічність української частини Східноєвропейської платформи .....	59
2.6. Методика прогнозування кількісних параметрів сейсмічної небезпеки за геофізичними даними .....	62
<b>РОЗДІЛ 3. ПРОГНОЗУВАННЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ.....</b>	<b>65</b>
3.1. Провісники землетрусів.....	65
3.2. Визначення проблем прогнозування землетрусів .....	66
3.3. Аналіз вирішення проблеми прогнозування землетрусів у світі .....	74
<b>РОЗДІЛ 4. ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ГІС ТА ДЗЗ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ НАСЛІДКІВ ЗАВДАНИХ ЗЕМЛЕТРУСАМИ .....</b>	<b>76</b>
4.1. Вибір об'єкта дослідження .....	76
4.2. Підготовчий етап робіт .....	78
4.3. Створенні інтерферограм.....	88

<b>4.4. Експортування знімків.....</b>	<b>98</b>
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>102</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>104</b>

**Перелік умовних позначень, символів, одиниць вимірювання,  
скорочень**

ГІС – геоінформаційні системи.

ГІТ – геоінформаційні технології.

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі.

НС - надзвичайні ситуації.

ЦМР – цифрові моделі рельєфу.

LIDAR – Light Detection and Ranging, технологія вимірювання відстаней шляхом випромінювання світла (лазер) та виміру часу повернення цього відбитого світла на приймач.

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission, радіолокаційна топографічна місія.

QGIS – («Quantum GIS») вільна крос-платформна ГІС.

Реферат

кваліфікаційної роботи бакалавра

Савеко Аліни Дмитрівни

на тему: «Застосування технологій ГІС ТА ДЗЗ в моніторингу землетрусів»

Кваліфікаційна робота бакалавра, [ ] с., [ ] рис., [ ] табл., [ ] джерел.

**Об'єкт дослідження** – методи прогнозування землетрусів та їх аналіз.

**Предмет дослідження** – прогнозування та моніторинг землетрусів.

**Мета дипломної роботи** – встановлення можливості прогнозування землетрусів за допомогою технологій ГІС та ДЗЗ, оцінки наслідків їх виникнення.

**Методи дослідження:** метод крупномасштабного еколого-географічного картографування (створення цифрової карти); порівняльно-географічний; класифікаційний; комп'ютерні методи побудови карт (ArcGis 10.5, QGIS); графічні методи (візуалізація та аналіз картографічних творів);

**Наукова новизна** полягає в оцінці можливості прогнозування землетрусів та оцінки їх наслідків за допомогою матеріалів.

**Практичне значення** – доведення отриманих наукових результатів до конкретних технологій, методик, алгоритмів та програмних продуктів.

**Ключові слова:** геоінформаційні системи, геоінформаційні технології, цифрові карти, цифрові моделі рельєфу, моделювання, прогнозування, бази геопросторових даних, землетрус, магнітуда, зсув, повінь, цунамі, сель, вулкан, катастрофа.

## ВСТУП

Сучасне життя на нашій планеті стає все більш непрогнозованим. У надрах Землі регулярно відбуваються внутрішні процеси, які постійно, здебільшого повільно, змінюють її будову. При цьому одні ділянки земної поверхні піднімаються, інші опускаються. Не залишаються незмінними навіть відстані між континентами. Але часом внутрішні процеси протікають настільки бурхливо, що виникають землетруси, які руйнують селища, міста і навіть цілі райони. Під загрозою землетрусів перебувають великі території, багатолюдні області і навіть країни, наприклад Індонезія, Японія та ряд інших. Основна небезпека землетрусів полягає в їх раптовості і невідворотності.

Термін «землетрус» означає сильні коливання земної кори, викликані тектонічними причинами (різке зміщення літосферних плит), які призводять до руйнування споруд, пожеж та людських жертв. З грецької землетрус це «seismos», тобто, сейсмічні явища які пов'язані з землетрусами та сейсмічними хвилями. Запис (фіксація) сейсмограм здійснюється спеціальними приладами – сейсмографами, що розташовуються на сейсмічних станціях.

Якщо природні катаклізми – землетруси, повені, лісові пожежі супроводжували людство в усі часи, то останніми роками до них додалися ще надзвичайні ситуації природного походження (техногенні катастрофи). Майже щодоби надходить інформація про прорив гребель і дамб, аварій на АЕС, газо- і нафтопроводах, що спричиняють викид в атмосферу ядовитих газів і розливу тонн нафти тощо. Все це відбувається через найменші порушення технологій виготовлення, експлуатації або недбалості, врешті-решт, через горезвісний «людський фактор».

Сьогодні людина знає багато про інші планети, але сили природи власної планети людством не підкорені і навряд чи це можна буде очікувати найближчим часом. У наш цивілізований, технічно розвинений час людство

залишається залежним від природних явищ, які досить часто мають катастрофічний характер.

За оцінками експертів, щорічні збитки внаслідок стихійних лих у світі становлять понад 30 млрд. доларів США. Найбільші збитки з усіх стихійних лих спричиняють повені, у тому числі викликані цунами (40%), на другому місці – тропічні циклони (20%), на третьому і четвертому місцях (по 15%) – землетруси та посухи. Але найбільш людських смертей спричиняють саме урагани та землетруси (*Безпека життєдіяльності та основи охорони праці, 2016*).

Щорічно на нашій планеті вчені фіксують близько 1 млн. сейсмічних і мікросейсмічних коливань, 100 тис. з яких відчуються людьми та близько 1000 спричиняють значні збитки. Такі землетруси несуть за собою катастрофічні наслідки (*Безпека життєдіяльності та основи охорони праці, 2016*).

На додачу до землетрусів, відчутну шкоду наносять явища, спричинені сейсмічною активністю (цунами, виверження вулканів тощо). Прогнозування подібних явищ дозволяє зменшити їх наслідки в рази. Ще недавно про майбутні підземні поштовхи можна було дізнатись тільки за допомогою спеціальних приладів – сейсмографів. Однак у сучасному світі можливості щодо прогнозування землетрусів значно розширились. Наприклад, з'явилась можливість моніторити сейсмічний стан навколишнього середовища за допомогою дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Взагалі кажучи, наукові досягнення останніх років дають надію не тільки завбачати землетруси, а й впливати на їх хід та прогнозувати їх. Залежно від досягнутого рівня знань про землетруси та конкретних цілей прогнозування виділяють різні типи прогнозу:

- сейсморайонування (оцінка сейсмічності на десятиліття – століття);
- прогнозування (довгострокове – на роки – десятиліття; середньострокове (на місяці – роки); короткострокові (2-3 доби – години, за місцем 30-50 км); оперативний (години – хвилини).

Особливо актуальним є короткостроковий прогноз: саме він є підставою для конкретних попереджень про майбутню катастрофу та невідкладні дії щодо зменшення шкоди від цієї дії, оскільки ціна помилки тут дуже велика. Ці помилки бувають двох типів:

1. «Помилкова тривога», коли були вжиті всі заходи щодо мінімізації кількості людських жертв і матеріальних втрат, а передбачуваний землетрус не відбувся. У цьому випадку збитки, викликані порушенням ритму життя населення, можуть бути дуже великими.

2. «Пропуск цілі», коли землетрус, що відбувся, не передбачався. Ці помилки реально бувають найчастішими, оскільки практично всі катастрофічні землетруси виявляються раптовими і несподіваними. У цьому випадку наслідки загрожують не тільки матеріальними збитками а й великими людськими жертвами.

Як наслідок, в обох випадках відповідальність сейсмологів за невірний прогноз є надзвичайно великою. Це змушує їх бути дуже обережними при видачі (або невидачі) владі офіційних попереджень про можливу небезпеку.

З іншого боку, місцеві органи влади, усвідомлюючи величезні труднощі та важкі наслідки функціонування певного заселеного району або міста хоча б один-два дні, аж ніяк не поспішають дотримуватись рекомендацій численних, здебільшого «самодіяльних» неофіційних прогнозистів, які декларують 90% і навіть 100% своїх передбачень (<https://srcaltufevo.ru/uk/kak-mozhno-predugadat-zemletryasenie-mozhno-li-predskazat-zemletryasenie-mozhno.html>).

Проблемами прогнозування землетрусів присвячені праці Кендзери О. В., Ніконова А. А., Ейбі Дж. А., Викулина А. В., Семенець Н. В., Широкова В. А., Полякова С. В., Дж. Гіра. Х. Шаха, І. Г. Кіссіна та ряду інших.

**Мета роботи** – встановлення можливості прогнозування землетрусів за допомогою технологій ГІС та ДЗЗ, оцінки наслідків їх виникнення.

**Об'єкт дослідження** – методи прогнозування землетрусів та їх аналіз.

**Предметом** дослідження – прогнозування та моніторинг землетрусів.

**Наукова новизна** полягає в оцінці можливості прогнозування землетрусів та оцінки їх наслідків за допомогою матеріалів.

**Практичне значення** – доведення отриманих наукових результатів до конкретних технологій, методик, алгоритмів та програмних продуктів.

**Ключові слова:** геоінформаційні системи, геоінформаційні технології, цифрові карти, цифрові моделі рельєфу, моделювання, прогнозування, бази геопросторових даних, землетрус, магнітуда, зсув, повінь, цунамі, сель, вулкан, катастрофа.

## РОЗДІЛ 1

### КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛЕТРУСІВ

#### 1.1. Загальні відомості про землетруси і збитки про них

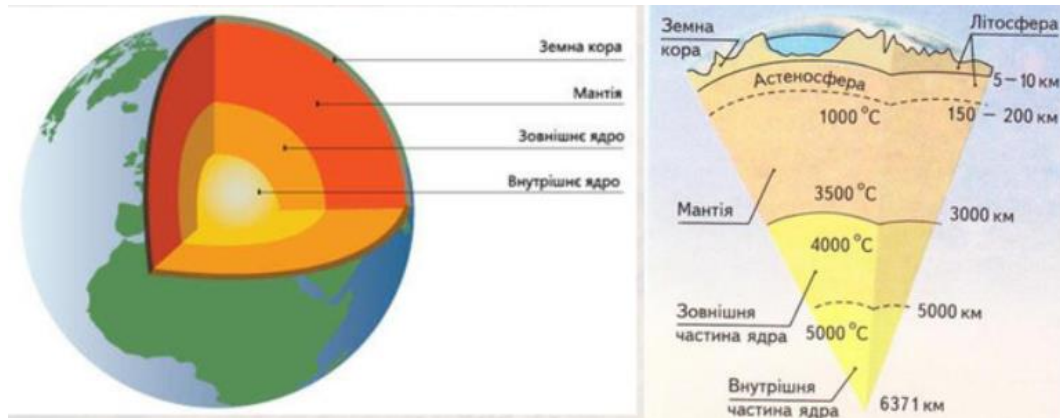
Не проходить і року, щоб у засобах масової інформації не з'являлась інформація про виникнення десь на Землі щонайменше одного катастрофічного землетрусу з тотальними руйнуваннями і людськими жертвами, кількість яких часом досягає десятків і сотень тисяч осіб. Крім цього небезпечні явища додатково посилюють цунамі – аномально високі океанічні хвилі, що змивають на низьких пологих берегах селища і міста разом із мешканцями.

Земля, як найбільш розвинена планета Сонячної системи, характеризується складною будовою, вираженою в наявності декількох оболонок або геосфер, які відрізняються своїм складом, фізичними властивостями та станом речовини. Серед них розрізняють зовнішні геосфери (атмосфера, гідросфера), які доступні для безпосереднього вивчення, і внутрішні геосфери (земна кора, мантія, ядро), дослідження яких проводиться шляхом застосування непрямих геологічних, геофізичних та геохімічних методів. Всі оболонки Землі перебувають у складній взаємодії.

Тверда оболонка Землі безпосередньо вивчена до глибини 10-15 км методами надглибоких свердловин. Про стан і будову глибших шарів її надр існують лише припущення на основі даних, одержаних геофізичними методами. Ці дані дають підстави для виділення таких оболонок (геосфер) Землі: ядра, мантії, літосфери.

Внутрішня будова Землі представлена на рис. 1.1. В центрі розташоване ядро Землі з радіусом 1250 км, яке в основному складається із заліза та нікелю. Далі йде рідка частина ядра Землі (яка складається в основному із заліза) з

товщиною близько 2200 км. Потім 2900 км в'язкої мантії, що складається з силікатів та оксидів, а зверху доволі тонка, тверда земна кора.



*Рис. 1.1. Внутрішня будова Землі*

Самою верхньою оболонкою Землі є літосфера, яка складається з твердої земної кори. Під океанами має глибину 5–10 км, на материках поширюється на глибину до 70 км, у середньому 35 км і становить 1% від маси Землі. Вона поділяється на ряд плит, що називаються літосферними (<https://www.nkj.ru/archive/articles/21828/>).

Нижче розташовується також тверда верхня мантія, точніше, її верхня частина. Ці геосфери складаються з різних гірських порід та мають високу міцність. Але в товщі верхньої мантії на різних глибинах розташовується шар, названий астеносферним (від грецького астенос – слабкий), що має меншу в'язкість порівняно з породами мантії, що лежать вище або нижче. Вважається, що астеносфера є тією «змазкою», по якій можуть переміщуватись літосферні плити і частини верхньої мантії (<https://www.nkj.ru/archive/articles/21828/>).

Під час руху плити в одних місцях зіштовхуються, утворюючи величезні горно-складчасті ланцюги, в інших, навпаки, розколюються з утворенням океанів, кора яких важче кори континентів і здатна занурюватись під них. Ці взаємодії плит викликають колосальні напруги в гірських породах, стискаючи або навпаки, розтягуючи їх. Коли напруги перевищують межу міцності гірських порід, відбувається їх дуже швидке, практично миттєве, зміщення, розрив. Момент

цього зміщення і представляє собою землетрус. Якщо потрібно його передбачити, то потрібно дати прогноз місця, часу і потужності.

Класифікація землетрусів (<https://www.nkj.ru/archive/articles/21828/>) представлена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

## Класифікація землетрусів

Тип землетрусу	Відсоток від загального числа	Діапазон магнітуд
Тектонічні	Близько 95%	до 9
Вулканічні	до 5%	до 8
Обвальні (денудаційні)	менше 1%	не більше 5
Техногенні	менш 0.1%	відомі до 5

Залежно від причини виникнення землетруси поділяють на:

- тектонічні, пов'язані з утворенням у земній корі розломів і рухами по них брил земної кори (95%);
- вулканічні, які виникають у зв'язку з рухом магми в жерлі вулкана й вибуховими викидами вулканічних газів;
- обвальні, які відбуваються в разі обвалу в підземних порожнинах;
- техногенні (штучні), наприклад під час заповнення водою нових водосховищ, проведення підземних ядерних вибухів.

Серед усіх стихійних лих, за даними ЮНЕСКО, землетруси займають перше місце у світі за заподіяними економічними збитками і кількістю загиблих (<https://uk.wikipedia.org/wiki/Землетрус>).

Землетрус – короткотривалий, раптовий струс земної кори, викликаний змінним переміщенням мас гірських порід у надрах Землі, чому сприяє порушення розтяжності осередка гірських порід і виникнення сейсмічних хвиль.

Під час землетрусів на поверхні Землі часто виникають щілини, скиди, зсуви, цунамі. Доволі часто землетруси спричинюють великі руйнування інфраструктури. Щорічно вчені фіксують близько и 1 млн. сейсмічних і

мікросейсмічних коливань, приблизно 100 тисяч з яких відчуваються людьми та близько 1000 спричинюють збитки.

На пам'яті людства нараховуються десятки катастрофічних землетрусів, які забрали мільйони людських життів, наприклад:

– Лісабонський 1755 р. (знищив португальську столицю Лісабон та багато прибережних поселень, забрав життя понад 90 тисяч осіб за 6 хвилин. Після сейсмічних поштовхів виникла пожежа і цунамі, які збільшили масштаб катастрофи);

– Японський 1891 р. (кількість жертв якого склала приблизно 7 273, а кількість постраждалих – 17 175, було зруйновано понад 140 тисяч будівель);

– Ассамський (Індія) 1897 р. (смертність склала близько 1542 жертв, але майнова шкода була дуже великою. Пошкодження від землетрусу поширилися на м. Калькутта де десятки будівель були сильно пошкоджені або частково обвалені);

– Сан-Франциско 1906 р. (загинуло до 3000 осіб, 225000-300000 залишилося без даху над головою, 80 % будівель зруйновано);

– Мессінський (Сицилія та Реджіо-Калабрія 1908 р. (загибель понад 100 тис. чоловік);

– Китайський 1920 р. (загальна кількість жертв землетрусу склала від 200000 до 240000 чоловік, при цьому, близько 20 000 людей померли від холоду, після того, як втратили своє житло);

– Японський 1923 р. (від руйнувань, пожеж і цунамі загинуло 91 344 особи, пропало без вісти 13 275 осіб, важких поранень зазнали 16 514 особи, легких поранень – 35 560 осіб. Загалом постраждало близько 3,4 мільйонів осіб, кілька тисяч з них (в основному корейців та китайців) загинуло під час погромів. Було зруйновано землетрусом або згоріло близько півмільйона будівель і 360 мостів. Загальні втрати вчетверо перевищували річний бюджет Японії;

– Ашхабадський, Туркменська РСР, 1948 р. (масштаби жертв сягали від 10 до 110 тисяч);

- Чилійський 1960 р. (кількість жертв склала близько 6 тис. чоловік, більшість людей загинула від цунамі);
- Агадірський (Марокко) 1960 р. (понад 13 000 смертей),
- землетрус на Алясці, 1964 р. (площа, яка постраждала від землетрусу, становила приблизно 130 000 квадратних кілометрів, але завдяки невеликій густоті в цих місцях загинуло всього 9 осіб);
- Таншанський, Китай, 1976 р. (кількість жертв склала 242419 чоловік, але за іншими джерелами загинуло близько 800 000 жителів. Від землетрусу також постраждали населені пункти, що знаходились на відстані 150 кілометрів від епіцентру, серед них Тяньцзінь і Пекін, більш 5000000 будинків були повністю зруйновані);
- Спітакський (Вірменія) 1988 р. (унаслідок землетрусу було повністю зруйновано місто Спітак і 58 сіл. Частково зруйновано було міста Ленінакан, Кіровакан і ще понад 300 населених пунктів, загинуло щонайменше 25 тисяч осіб, ще близько 140 тисяч стали інвалідами, 514 тисяч людей залишилися без даху над головою. Загалом землетрус охопив близько 40% території Вірменії);
- Бамський (Іран), 2003 р. (забрав життя від 31 824 до 43 000 людей);
- землетрус в Індійському океані, 2004 р. (який стався під водою, але спричинене ним цунамі вбило від 230 до 280 тисяч людей. Висота хвиль досягала до 30 метрів. Найбільше жертв нарахували в Індонезії, Шрі Ланці, Індії і Таїланді);
- Кашмірський, 2005 рік (кількість загиблих склала 87 351 людину);
- Гаїті, 2010 р. (через низьку якість будівель кількість руйнувань та жертв була дуже великою, кількість загиблих складала від 220 000 до 316 000. Проте наведені цифри вважалися умисно роздутими з метою отримання якомога більшої міжнародної допомоги. Незалежні спостерігачі наводили цифру від 100 000 до 160 000 загиблих);
- Японський 2011 р. (стихія зруйнувала три атомних реактора, з-за чого стався сильний радіоактивний викид в атмосферу, кількість загиблих перевищила 15 тис. осіб, близько 3 тис. вважаються зниклими без вісті);

– Непальський 2015 р. (за даними уряду країни підтверджена загибель 4 тис. осіб, збитки 5 млрд. дол. США).

Наведене свідчить, що під загрозою землетрусів перебувають обширні території, найчастіше більш густонаселені. Найбільша небезпека землетрусів полягає в їх неочікуваності і невідворотності.

На сьогодні є два засоби уникнення великих збитків (втрат) від землетрусів: антисейсмічне будівництво та завчасне оповіщення про можливий землетрус. Але обидва способи, на жаль, залишаються неефективними. Не завжди антисейсмічне будівництво адекватне тим коливанням, які викликаються землетрусами. Є дивні випадки незрозумілого руйнування залізобетону, як це було в Кобе, Японія. Структура бетону порушується настільки, що бетон розсипається в місцях опоків стоячих хвиль у пил. Відбуваються обертання будівель, як це спостерігалось в Спітаку, Ленінакані, в Румунії (<https://liveps.ru/uk/na-chem-osnovan-princip-deistviya-seismografa-izmeritelnye/>).

На сьогодні вдале прогнозування землетрусів бажає кращого, оскільки відбувається не дуже часто. Проте перспектива цього прогнозування настільки приваблива, що сьогодні сотні вчених у різних країнах зайняті проблемою прогнозування землетрусів.

Прогнозування землетрусів є винятково важливою і актуальною проблемою, оскільки можуть бути врятовані тисячі людських життів, якщо прогноз виявляється точним. З іншого боку цілі населені пункти, міста і навіть райони можуть бути евакуйовані безпідставно, влада зазнає неймовірних втрат, якщо прогноз виявиться помилковим.

Підставою для ефективного прогнозування можуть слугувати:

- 1) статистичні методи;
- 2) виокремлення сейсмічно активних зон, які довго не зазнавали землетрусу;
- 3) вивчення зсувів земної кори;
- 4) вивчення змін співвідношень швидкості поздовжніх і поперечних хвиль;

- 5) оцінку змін магнітного поля і електропровідності гірських порід;
- 6) аналіз зміни складу газів, що надходять з глибин;
- 7) реєстрацію «форшоків»;
- 8) дослідження розподілу вогнищ в часі і просторі;
- 9) застосування технологій ГІС та ДЗЗ.

## 1.2. Характеристики землетрусів

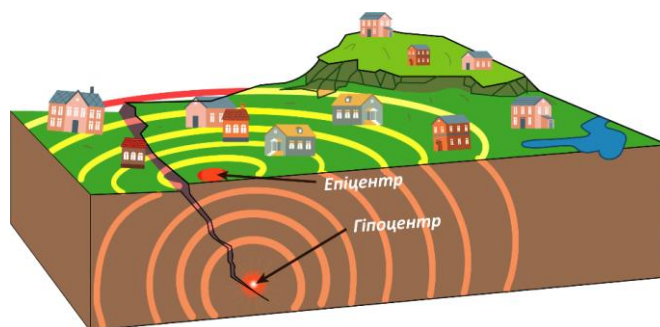
Будь-який землетрус являє собою процес, що йде з деякою кінцевою швидкістю, з утворенням й оновленням безлічі різномасштабних розривів, розпорюванням кожного з них із вивільненням та перерозподілом енергії. При цьому потрібно чітко розуміти, що гірські породи являють собою не суцільний однорідний масив. У ньому є тріщини, структурно послаблені зони, які істотно зменшують його сумарну міцність.

Швидкість розповсюдження розриву або розривів досягає кількох кілометрів у секунду, процес руйнування охоплює деякий об'єм порід.

Основними характеристиками землетрусів слугують:

- глибина гіпоцентра;
- магнітуда;
- інтенсивність енергії на поверхні землі.

**Гіпоцентр** (осередок, джерело, вогнище, фокус) землетрусу – місце, де зсуваються гірські породи (рис. 1.2).



**Рис. 1.2.** Графічна ілюстрація землетрусу

Гіпоцентри розташовуються на різних глибинах. Найбільш глибокі – до 700 км, але частіше набагато менше. Зазвичай глибина гіпоцентра (осередка) землетрусу становить від 10 до 30 км. Чим глибше знаходиться вогнище, тим менші коливання відбуваються на земній поверхні.

**Епіцентр** – це проекція гіпоцентра на поверхню Землі (рис. 1.2).

**Магнітуда** характеризує загальну енергію землетрусу і є логарифмом максимальної амплітуди зміщення ґрунту в мікронах, яка вимірюється за сейсмограмою на відстані 100 км від епіцентру ([https://uk.wikipedia.org/wiki/Магнітуда\\_землетрусу](https://uk.wikipedia.org/wiki/Магнітуда_землетрусу)):

$$M_w = \frac{2}{3}(lgE - 11,8).$$

де  $E$  – енергія землетрусу в джоулях.

Максимальна магнітуда землетрусу становить близько 9,5, що відповідає енергії  $10^{19}$  Дж.

Магнітуда (від англ. *Magnitude – величина,  $M_w$* ) – безрозмірна величина, була запропонована професором Каліфорнійського технологічного інституту Ч. Ф. Ріхтером, і відбиває кількість вивільненої загальної енергії пружних коливань.

**Інтенсивність** – це показник наслідків землетрусів, що характеризує розмір збитків, кількість жертв та характер сприйняття людьми психогенного впливу.

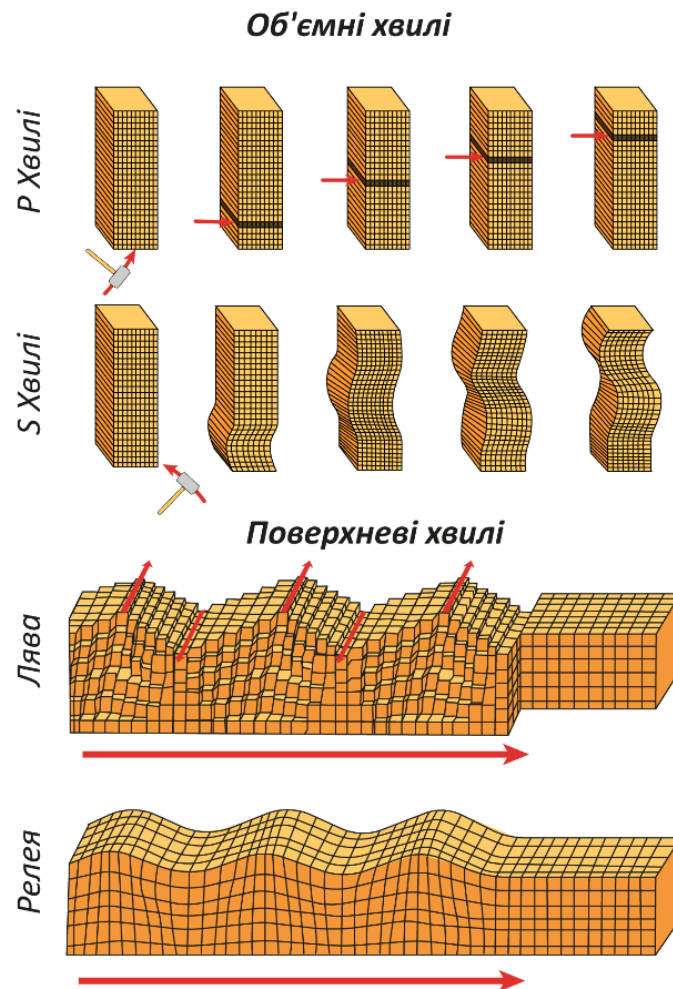
Землетруси переважно відбуваються у вигляді серії поштовхів, головний з яких має найбільшу магнітуду. Сила, кількість та тривалість поштовхів суто індивідуальні для кожного землетрусу. Тривалість поштовхів переважно досягає декількох секунд. Помітний струс поверхні землі від головного поштовху триває від 30 до 60 с, або навіть до 3 – 4 хв. Більш слабкі поштовхи можуть тривати з інтервалами в декілька діб, тижнів, місяців та навіть років.

Бальність землетрусів визначається за зовнішніми характеристиками впливу коливань на людину, тварин, дерева, типові будівлі, меблі, посуд тощо. Існують різні шкали бальності.

Коливання земної кори передається сейсмічними хвилями. Найсильніші вони в *гіпоцентрі*. З віддаленням від нього хвилі слабшають.

Коливання земної кори при землетрусі передається чотирма сейсмічними типами хвиль, які класифікуються за:

1) **типом деформацій** – об'ємні (повздовжні ( $V_p$ ), поперечні  $V_s$ ) і поверхневі (Лява, Релея) хвилі (рис. 1.3);



**Рис. 1.3.** Об'ємні (повздовжні –  $V_p$ , поперечні –  $V_s$ ) та поверхневі (Лява, Релея) хвилі

Повздовжні хвилі (Р-хвилі) або хвилі стиснення змушують частинки середовища коливатись подібно спиральній пружині. Вони викликають коливання вздовж напрямку розповсюдження хвилі, шляхом чередування ділянок стиснення і розріження. Завдяки цій властивості Р-хвилі спроможні розповсюджуватись майже у будь-яких середовищах. У денної поверхні

швидкість Р-хвиль в середньому складає 6 км/с, а на великій глибині близько 13 км/с.

Поперечні сейсмічні хвилі (S-хвилі) або хвилі зсуву змушують частинки середовища коливатись перпендикулярно напрямку розповсюдження хвилі (подібно гітарній струні, яка вибрирує).

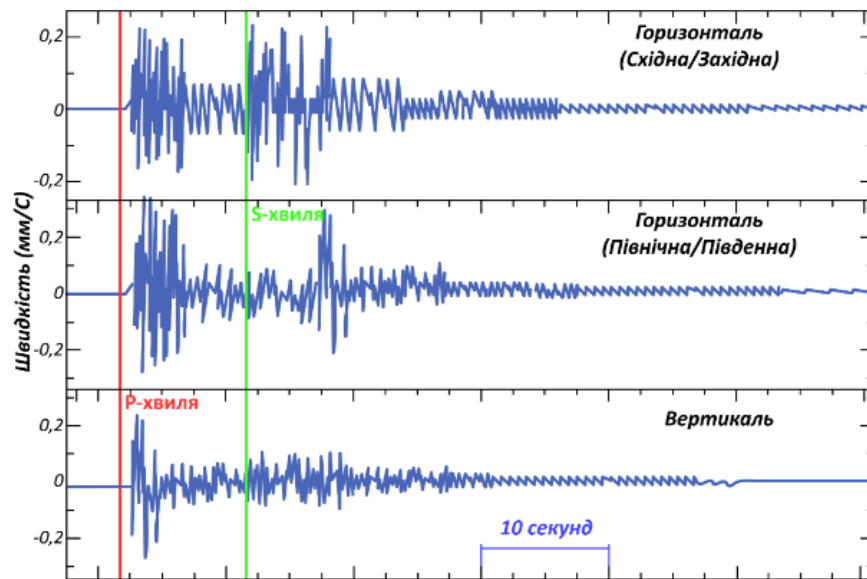
S-хвилі розповсюджуються тільки через мпружний матеріал, тому вони неспроможні проходити через «рідинне» ядро Землі., рідинні і газоподібні середовища. Їх швидкість залежить від опру матеріалу середовища зсуву, і становить приблизно  $7/12$  від швидкості Р-хвиль.

Повздовжні хвилі (Р-хвилі) або хвилі стиснення змушують частинки середовища коливатись подібно спіральній пружині. Вони викликають коливання вздовж напрямку розповсюдження хвилі, шляхом чередування ділянок стиснення і розріження. Завдяки цій властивості Р-хвилі спроможні розповсюджуватись майже у будь-яких середовищах. У денної поверхні швидкість Р-хвиль в середньому складає 6 км/с, а на великій глибині близько 13 км/с.

Поперечні сейсмічні хвилі (S-хвилі) або хвилі зсуву змушують частинки середовища коливатись перпендикулярно напрямку розповсюдження хвилі (подібно гітарній струні, яка вибрирує). S-хвилі розповсюджуються тільки через мпружний матеріал, тому вони неспроможні проходити через «рідинне» ядро Землі., рідинні і газоподібні середовища. Їх швидкість залежить від опру матеріалу середовища зсуву, і становить приблизно  $7/12$  від швидкості Р-хвиль.

Через те, що Р-хвилі біля вогнища землетрусу мають більшу швидкість, на відміну від S-хвилі, вони реєструються першими, звідси пішла їх назва «Primary». Поперечні S-хвилі розповсюджуються з меншою швидкістю, тому їх відповідно і назвали «Secondary». Чим далі від вогнища землетрусу знаходиться сейсмічна станція, тим більший інтервал між моментами вступу на сейсограмі Р і S хвиль. Ця властивість використовується для визначення дистанції від вогнища землетрусу до станції.

Повздовжні і поперечні хвилі на сейсмограмі сейсмографа представлені на рис. 1.4.



**Рис. 1.4.** Повздовжні і поперечні хвилі на сейсмограмі сейсмографа

Через неоднорідність надр на сейсмограмі відображується широкий спектр сейсмічних хвиль різного типу. Крім P і S хвиль до основних відносяться поверхневі хвилі Релея і Лява (R і L). Вони отримали назву по прізвищах учених, що розробили математичну теорію їх розповсюдження.

При проходженні хвиль Релея частинки середовища описують вертикальні еліпси вздовж напрямку розповсюдження.

У поверхневих хвилях Лява частинки середовища коливаються перпендикулярно напрямку свого розповсюдження. Ці типи хвиль розповсюджуються по земній поверхні подібно хвилям у водоймах зі швидкістю 3,2 – 4,4 км/с;

2) **характером розповсюдження** – прямі, відбиті, заломлені, рефраговані, дифраговані та обмінні;

3) **часом розповсюдження** – регулярні та нерегулярні;

4) **використанням у сейсмозвідці** – корисні та завади.

Швидкість розповсюдження сейсмічних хвиль залежить від їх типу (повздовжні швидші ніж поперечні) та середовища поширення. В рідинах і газах

поперечні хвилі не розповсюджуються. Швидкість поперечних хвиль в товщах порід земної кори змінюється від 200 м/с до 1000 м/с, повздовжніх – від 1500 м/с (вода), 2000-2500 м/с (суглинки, глини) до 5-7000 м/с (кристалічні породи). Закономірності проходження сейсмічних хвиль використовуються при вивченні внутрішньої будови Землі, в гідрогеології, при сейсмостійкому будівництві тощо.

Найсильніші хвилі в гіпоцентрі. По мірі віддалення від нього, хвилі слабшають.

### 1.3. Шкали для виміру сили землетрусів

До 30-х рр. ХХ ст. силу землетрусів вимірювали за спричиненими збитками – за так званою шкалою 12 бальною шкалою Меркаллі. Сьогодні для визначення сили землетрусу користуються 9 бальною шкалою Ч. Ріхтера (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

#### Опис руйнувань під час землетрусу і їх відповідність балам по шкалах Меркаллі та Ріхтера

<i>Опис руйнувань під час землетрусу та його вплив на людину</i>	<i>Шкала Меркаллі</i>	<i>Шкала Ріхтера</i>
<i>Не відчувається людьми</i>	1	-
<i>Відчувається людьми на верхніх поверхах будівель</i>	2	2
<i>Відчувається в будівлях: підвішені предмети розхитуються</i>	3	2,5-3
<i>Рухаються двері та вікна, дзвінять шибки</i>	4	3,5
<i>Відчувається зовні, з'являється бриж на поверхні рідини</i>	5	4-4,5
<i>Люди в русі, відчують втрату рівноваги; розбиваються шибки, тріскається штукатурка</i>	6	5
<i>Людині важко встояти на ногах; самаються меблі, починають руйнуватися низькоякісні споруди</i>	7	5,5-6
<i>Часткове руйнування споруд, падіння труб карнизів, пам'ятників і т.д.; поява тріщин в землі</i>	8	6-6,5
<i>Значні руйнування споруд, прориви трубопроводів під землею, значні тріщини в землі</i>	9	7
<i>Руйнування більшої частини споруд, великі зсуви, колії незначно відхиляються</i>	10	7,5-8
<i>Колії сильно відхиляються, будівлі майже зруйновані, підземні трубопроводи повністю виходять з ладу</i>	11	8-8,5
<i>Майже повне руйнування споруд, рух великих мас скельних порід</i>	12	9

Нульова позначка на сейсмографі означає абсолютний спокій ґрунту, один бал вказує на слабкий підземний поштовх, кожний наступний бал позначає поштовх у 10 разів сильніший за попередній. Так 9-бальний землетрус у 10 разів сильніший за 8-бальний, в 100 разів перевищує 7-бальний і, нарешті, в 100 мільйонів разів сильніший за коливання земної кори силою в один бал.

Так, найсильніший із відомих землетрусів, що відбувся у 1960 р. в Чилі, мав магнітуду 9,5, що еквівалентно енергії 180 млн атомних бомб, скинутих на Хіросіму. Для порівняння, енергія найбільшого ядерного вибуху, здійсненого колишнім СРСР на Новій Землі в 1961 р., була еквівалентна землетрусу з магнітудою 8,2. Енергія землетрусу магнітудою 1 еквівалентна вибуху 2 кг тротилу. До 1998 р. в Європі і в Україні для оцінки землетрусу використовувалась 12-бальна шкала (MSK-64), яка була розроблена в 1964 р. Медведєвим (СРСР), Шпонхойером (НДР) і Карником (Чехословаччина).

З 1998 року в країнах ЄС використовується більш сучасна макросейсмічна шкала EMS-98. Умовно землетруси за цією шкалою поділяються на:

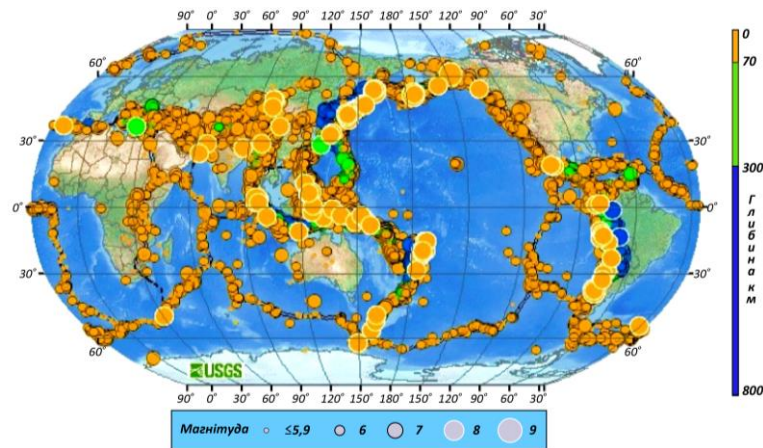
- слабкі – 1-3 бали;
- помірні – 4 бали;
- достатньо сильні – 5 балів;
- дуже сильні – 7 балів;
- руйнуючі – 8 балів;
- спустошуючі – 9 балів;
- знищуючі – 10 балів;
- катастрофічні – 11 балів;
- дуже катастрофічні – 12 балів.

Шкалу магнітуд часто плутають зі шкалою інтенсивності (мірою руйнування), яка вимірюється за шкалою MSK-64 в балах від 1 до 12 на підставі зовнішніх проявів підземного поштовху (вплив на людей, предмети, будівлі, природні об'єкти). Наприклад, сильний землетрус, що відбувся далеко від місць проживання людей, не відчувається і не приводить ні до яких впливів на будівлі.

Тому магнітуда такого землетрусу велика, а інтенсивність – мінімальна. І навпаки, відносно «слабкий» землетрус, що відбувся близько до земної поверхні і безпосередньо під якимось населеним пунктом, може привести до певних руйнувань будівель зданий. У цьому випадку магнітуда землетрусу буде відносно маленькою, а інтенсивність руйнувань населеного пункту – відносно великою.

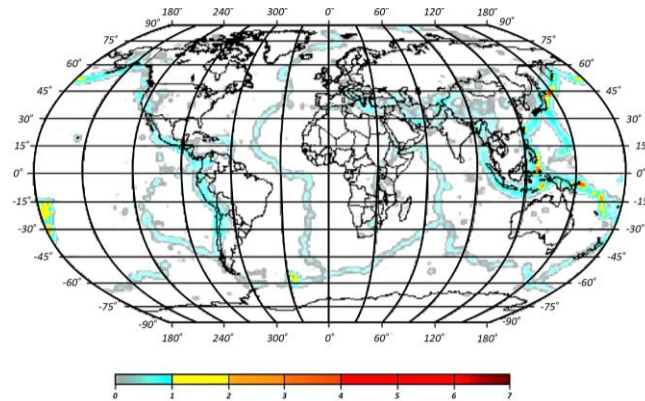
Найслабші землетруси, що відчуваються починаються з магнітуди 2 і тільки на відстанях, що не перевищують кількох кілометрів. Приповерхневі землетруси з магнітудою 4,5 можуть приводити до незначних руйнувань. Починаючи з магнітуди 6 землетруси можуть спричинювати істотні руйнування і людські жертви. Землетруси з магнітудами близькими до 7, що відбуваються у безпосередній близькості від великих міст, можуть спричинювати катастрофічні наслідки, як приклад, землетрус на Гаїті в 2010 р. Найбільші, або «мегаземлетруси», з магнітудою 9 і вище можуть викликати катастрофічні цунамі і руйнування в обширних районах. За період інструментальних спостережень було зареєстровано всього п'ять таких подій. Одна з них відбулась в Курило-Камчатській зоні субдукції в 1952 р. Більш свіжі приклади – мегаземлетрус на Суматрі в 2004 р. і в Японії в 2011 р.

Розподіл землетрусів по магнітудах і глибинах у світі представлений на рис. 1.5.



**Рис. 1.5.** Розподіл землетрусів по магнітудах і глибині у світі

Середня кількість землетрусів у світі за рік з магнітудою 5 і більше представлена на рис. 1.6.



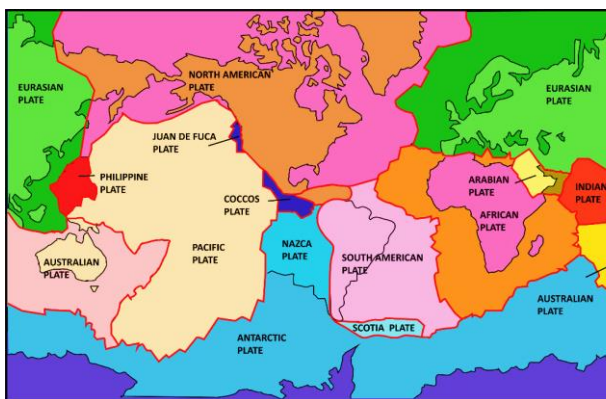
**Рис. 1.6.** Середня кількість землетрусів у світі за рік з магнітудою 5 і більше

#### 1.4. Прогнозування землетрусів

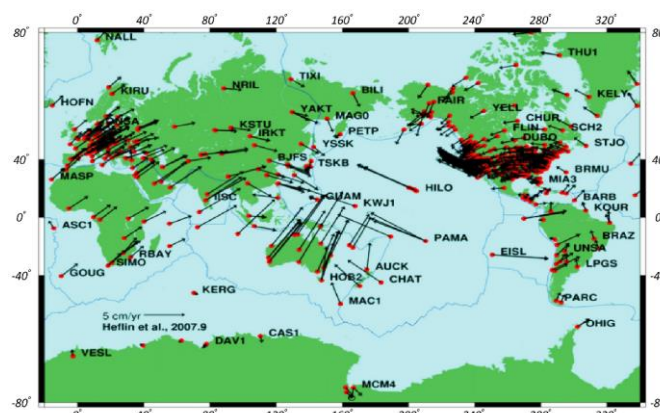
*Сейсмічність Землі* – здатність надр Землі породжувати осередки землетрусів. Сейсмічність характеризується територіальним розподілом епіцентрів землетрусів, їх інтенсивністю, тривалістю тощо.

Осередок землетрусів – область літосфери, де відбуваються швидке переміщення мас уздовж тектонічного розриву (рис. 1.7), який утворюється або розвивається, де виникають пружні коливання і вивільнення накопиченої енергії.

Рух поверхні Землі за даними GPS представлений на рис. 1.8.

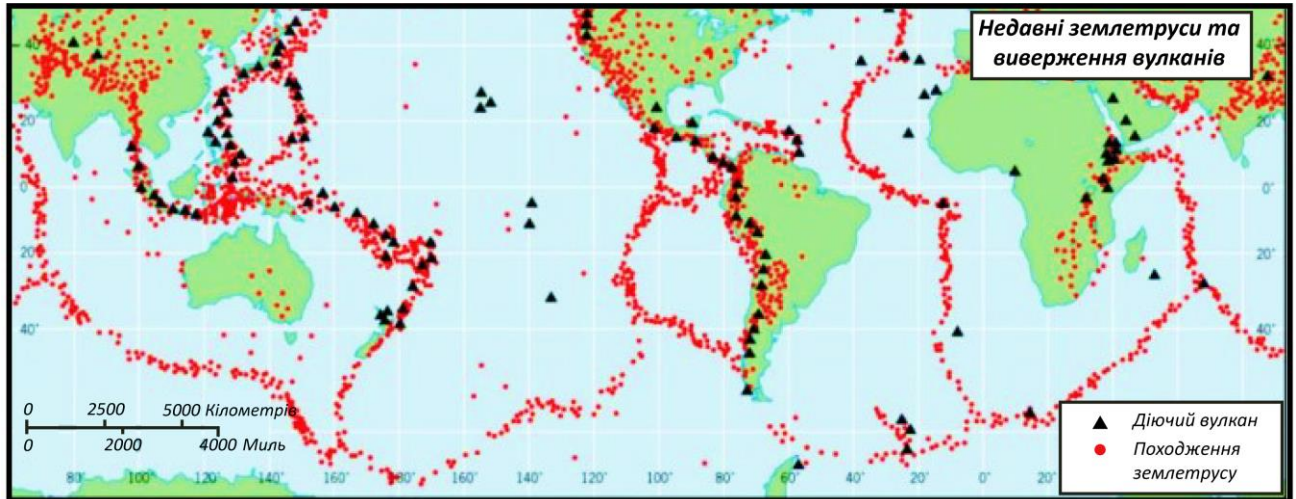


**Рис. 1.7.** Границі тектонічних плит



**Рис. 1.8.** Рух поверхні Землі за даними GPS

На сьогодні у всьому світі встановлені тисячі високоякісних сейсмографів, які записують дані в безперервному режимі і передають їх в режимі реального часу в центри обробки і збереження даних, основні з яких знаходяться в США, Європі та Японії. Прилади світової сейсмологічної мережі реєструють понад 200 тис. землетрусів на рік (рис. 1.10).



**Рис. 1.10.** Карта розподілу крупних землетрусів (кружки) і активних вулканів (трикутники) у світі

На щастя, переважна більшість цих сейсмічних подій не відчуваються на поверхні Землі і можуть бути записані тільки дуже чутливими сейсмографами.

Дані, що збираються в світових центрах дані передаються в реальному часі в служби, що займаються моніторингом землетрусів. Природно, що їх найважливішою задачею є швидке визначення параметрів найбільших землетрусів, які представляють потенційну небезпеку для населення і економіки.

Результати такого моніторингу, що одержуються майже в реальному часі, використовуюється в системах швидкого оповіщення та попередження цунамі.

В той же час іншою важливою задачею є найбільш повне вивчення всіх землетрусів, включаючи найслабкіші. Це необхідно для детального дослідження тектонічної активності нашої планети і розробки імовірнісних моделей сейсмічної небезпеки. На їх основі будуються карти сейсмічного районування і розробляються норми сейсмостійкого будівництва.

Ще одним важливим практичним застосуванням сейсмології є моніторинг вулканів. Виникнення великої кількості слабких землетрусів під вулканами є одним з основних ознак їх активізації і провісників майбутніх вивержень. При цьому якщо врахувати, що найчастіше через складні метеоумови візуальне або супутникове спостереження вулканів буває недоступним (а для підводних вулканів взагалі це неможливо), то стає зрозумілим, що сейсмологічні спостереження – це єдиний спосіб відстежування за станом вулканів у безперервному режимі.

Сейсмологічні дані також мають величезне значення для фундаментальної науки. Сейсмічні хвилі, що розповсюджуються через глибинні шари Землі, містять унікальну інформацію про її будову.

Сейсмологія традиційно відома як наука про землетруси. Але останніми десятиліттями в ній виникла зовсім інша парадигма. На основі аналізу цифрових сейсмічних даних із застосуванням сучасних комп'ютерних технологій було показано, що сейсмічні записи містять величезну кількість інформації крім землетрусів.

Одним з найважливіших відкриттів стало виявлення так званих тектонічних треморів – дуже слабких сигналів, що виникають при повільному прослизанні тектонічних плит в періоди між землетрусами. У вчених є надія, що систематичний аналіз такого роду треморів дозволить відстежувати процеси, які відбуваються в сейсмічних розломах і вулканічних системах у ті інтервали часу, які попередньо вважались цілком «спокійними» і, таким чином, спричинять розробку принципово нових методів моніторингу.

Іншим важливим відкриттям стало переосмислення так званого сейсмічного шуму – сигналів, що записуються сейсмографами при відсутності тектонічної і вулканічної активності (і які складають понад 90% наявних сейсмологічних даних). Цей «шум» головним чином викликаний активністю Світового океану. Відносно швидкі варіації тиску стовпця води на океанічне дно спричинює виникнення сейсмічних хвиль. Таким чином, виникає хвильове поле,

що генерується джерелами, неоднорідно розподіленими по поверхні Землі, і відповідні сигнали на перший погляд абсолютно випадкові. Але при використанні записів сучасних дуже чутливих сейсмографів і відповідних математичних методів ці сигнали вдалось «розшифрувати» і добути з них інформацію, з одного боку про їх джерела, а з іншого, про будову Землі на ділянках між цими джерелами і приладами запису. В підсумку виникли відразу два принципово нових напрямки в сейсмології:

- використання сейсмічних записів для моніторингу активності океану і атмосфери (та інших поверхневих процесів);

- «шумова сейсмічна томографія».

Нову парадигму можна охарактеризувати як «тотальну сейсмологію», основним принципом якої є те, що кожен біт сейсмічних записів містить корисну інформацію про внутрішню будову Землі і про динамічні процеси, що відбуваються в її глибинах або на поверхні. Задача сейсмологів – «розшифрувати» наявні дані, щоб за можливістю максимально добути цю інформацію і її використати для моніторингу і наукових досліджень.

Таким чином, сучасна сейсмологія – це високотехнологічна сфера знань, яка активно розвивається в усьому світі у сукупності з багатьма передовими науковими напрямками в технологічну революцію великих даних.

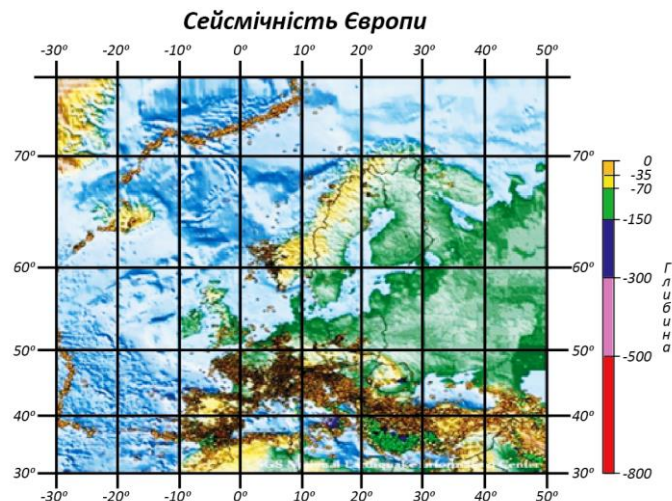
Успішний розвиток сейсмології потребує спільних зусиль величезної кількості вчених та інженерно-технічного персоналу, необхідних для підтримки і розвитку систем сейсмологічних спостережень і збору даних та для розробки нових методів їх аналізу із залученням найсучасніших комп'ютерних технологій і ресурсів. Крім чисто кількісного розвитку (збільшення числа станцій і об'єму аналізованих даних), світове сейсмологічне співтовариство знаходиться в постійному пошуку нових технологій і концепцій.

На порядку денному стоїть створення нового покоління «оптичних» сейсмографів з використанням інтерференції лазерних променів у оптичних

волокнах. Очікується, що застосування такого підходу дозволить істотно збільшити щільність покриття сейсмічними спостереженнями.

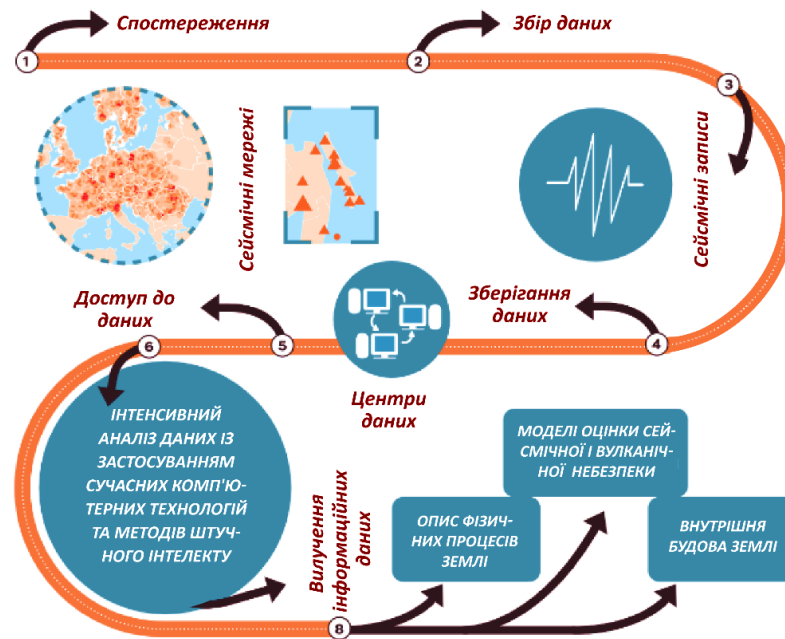
Інший важливий напрямок – це розвиток різноманітних протоколів і засобів передачі великих об'ємів даних, щоб зв'язати окремі центри даних в єдину світову інформаційну систему і пре доставити швидкий і ефективний доступ максимальній кількості користувачів – індивідуальних вчених і організацій, що займаються моніторингом. Одну з передових ролей у цьому напрямку відіграє центр даних IRIS, який регулярно надає оновлені способи доступу до даних, адаптовані під нові методи аналізу і оптимізовані у відповідності з останніми комп'ютерними і мережевими технологіями. В результаті, сучасні сейсмологи мають можливість ефективно аналізувати дані, записані тисячами сейсмографів у різних частинах Землі, не виходячи із свого кабінету, а у викладачів університетів – використовувати найактуальніші дані в навчальних програмах і лабораторних роботах по геофізиці, геоінформатиці тощо.

Оцінка сейсмічності Європи представлена на рис. 1.11.



**Рис. 1.11.** Карта сейсмічності Європи

Концептуальна схема збору – збереження – аналізу даних у сучасній сейсмології представлена на рис. 1.12.



**Рис. 1.12.** Концептуальна схема збору – збереження – аналізу даних у сучасній сейсмології

Завдяки такому ефективному доступу до величезної кількості даних останніми роками у сейсмологів з'явилась можливість, додатково до «традиційних» методів аналізу даних, використовувати концепції машинного навчання і штучного інтелекту.

Більшість провідних учених очікують, що поєднання таких підходів з вищеописаними ідеями «тотальної сейсмології» приведе до нових проривів і наукових відкриттів у найближчі десятиліття.

Над розвитком передових методів і технологій в сейсмології працюють наукові групи провідних університетів і наукових організацій в США, Європі і Японії. Останніми роками на лідируючі позиції виходять також учені Китаю і Сінгапуру (<https://www.kommersant.ru/doc/4501972>).

## РОЗДІЛ 2

### ОЦІНКА СЕЙСМІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ І СЕЙСМІЧНОГО ЗАХИСТУ ТЕРИТОРІЙ

До 70-х років ХХ ст. помилково вважалося, що більша частина території України, яка розташована на давній Східноєвропейській тектонічній платформі, не може зазнавати значних землетрусів. Тому, з огляду на це, більшість будинків і споруд на цій території будували без сейсмічного захисту (*Кендзера О.В., 2015*). Проте, нині з'ясовано, що сейсмічна небезпека території України, яка описує рівень загрози виникнення на ній сильних землетрусів, визначається тісним сусідством її західних, південно-західних і південних областей з потужним сейсмоактивним поясом планети, який утворився внаслідок колізії Африканської, Арабської та Євразійської материкових плит.

Більшість пружної енергії, яка виділяється в поясі, реалізується у вигляді землетрусів різної інтенсивності безпосередньо в ньому, але значна частина пружної енергії передається в тектонічні структури відносно спокійної Східноєвропейської платформи. В цих структурах можуть виникати небезпечні місцеві землетруси (*Кендзера О.В., 2015*). Світовий досвід показує, що внутрішньоплитові землетруси відбувалися в межах усіх давніх тектонічних платформ світу, хоча і набагато рідше, ніж в сейсмоактивних поясах (*Kagan Y.Y., 1999*). На жаль, землетруси на відносно стабільних тектонічних платформах призводять до значних економічних втрат через невідповідність будинків і споруд до їх впливів.

В Україні сейсмічно небезпечними районами є Карпати та гірський Крим. У минулому тут відбувалися руйнівні землетруси силою 6 – 8 балів (наприклад, Ялтинський землетрус 1927 р.). Центральні райони України належать до сейсмічно спокійних, хоча й тут інколи реєструються підземні поштовхи, що докочуються з районів Карпат і гір Вранча (Румунія). Так, 1977 р. під час

землетрусу у східній частині Карпат (епіцентр знаходився в Румунії) сейсмічні хвилі доспіли Львова, Рівного, Києва і Москви.

Першість за кількістю землетрусів утримують Японія та Чилі: понад 1000 в рік, або 3 на день.

## **2.1. Аналіз сейсмічної небезпеки територій України**

Сейсмічна небезпека залежить від природних умов ділянки: відстані до вогнищевих зон, параметрів максимальних землетрусів, здатних реалізуватися в цих зонах, їх повторюваності в часі, місцевих ґрунтових умов, рельєфу, наявності розломних тектонічних структур, спектрального складу коливань тощо. Знання параметрів сейсмічної небезпеки необхідне для ефективної організації сейсмічного захисту.

Рівень сейсмічної небезпеки є об'єктивною характеристикою території і визначається за допомогою комплексу робіт (<https://vse.energy/docs/OEW-kendzera.pdf>):

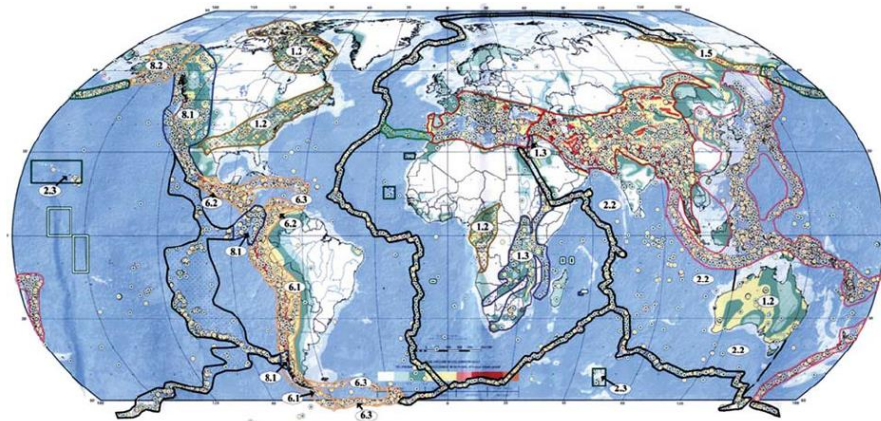
- загального сейсмічного районування (ЗСР) території країни;
- детального сейсмічного районування (ДСР) окремих її районів;
- сейсмічного мікрорайонування (СМР) майданчиків розміщення об'єктів.

По всій території України відчуваються сильні підкорові землетруси зони Вранча (Румунія). Останні сильні землетруси відбулися у 1940, 1977, 1986 і 1990 роках. Загалом до 40% території України можуть бути охоплені безпосереднім впливом небезпечних сейсмічних подій і до 70% – спільним впливом землетрусів із підтопленням, зсувами, просадками та іншими інженерно-геологічними процесами, які негативно впливають на стійкість споруд (*Практичні питання динаміки будівель, 2013*).

Сейсмонебезпечні райони України, з прогнозованою інтенсивністю сейсмічних струшувань 6-9 балів, займають близько 20% території ( $\approx 120$  тис. км<sup>2</sup>), на якій проживає понад 10 млн людей. Райони з інтенсивністю 7-9 балів

займають біля 12% території і включають близько 80 населених пунктів, в яких проживає понад 7 млн людей (*Практичні питання динаміки будівель, 2013*).

Сейсмічна небезпека на території України пов'язана з тим, що багато мільйонів років тому зіткнулися Євразійська, Африканська, Арабська і Індійська літосферні плити, їхній рух назустріч одна одній триває й досі, і на стику цих плит утворився потужний сейсмоактивний пояс. Сейсмічність території Східно-Європейської платформи в межах України пов'язують із впливом сусіднього потужного Азорсько-Середземноморсько-Альпійсько-Трансазійського сейсмоактивного поясу планети (рис. 2.1) і з великомасштабними місцевими геологічними процесами в земній корі та верхній мантії (*Кендзера О.В., 2016*).



**Рис. 2.1.** Сейсмічні пояси Землі. Територія України розташована на окраїні потужного Азорсько-Середземноморсько-Альпійсько-Трансазійського сейсмоактивного поясу планети (*Кендзера О.В., 2016*)

Платформні регіони України (Український щит та Дніпровсько-Донецький палеорифт) не є асейсмічними, як припускалося раніше. Сейсмічність таких слабоактивних регіонів може бути не лише відлунням активних тектонічних процесів у сусідніх регіонах, а й спричинятися великомасштабними місцевими геологічними процесами в земній корі та верхній мантії (*Сейсмічність і сейсмічна небезпека території України <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0244550-08#Text>*).

Сейсмічність території України визначається місцевими землетрусами і сильними підкоровими землетрусами унікальної зони Вранча (Румунія) —

унікальної, тому що таких високоактивних зон з потужними глибокими землетрусами на нашій планеті є лише три: Вранча, Гіндукуш і острови Тонга.

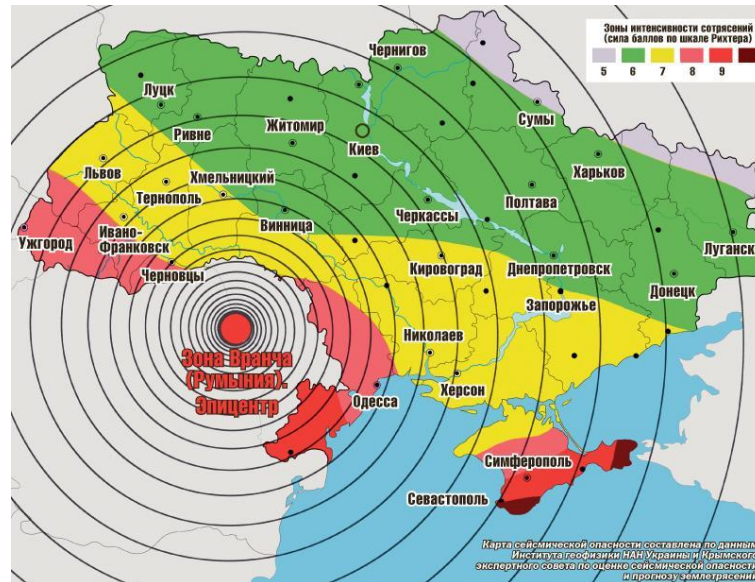
Інтенсивність сейсмічних струшувань від землетрусів зони Вранча з  $M > 7$  на території України становить від 3 до 8 балів за шкалою MSK-64. Найсильніші струшування були спричинені румунськими землетрусами 1230, 1790, 1802, 1838, 1908, 1940, 1977, 1986 і 1990 років. На платформній частині території України в останні роки відчутні землетруси спостерігалися поблизу Тернополя (03.01.2002,  $M=3,2$ ); у Луганській області (11.05.2004,  $M=3,2$  і 19.04.2006,  $M=3,0$ ); у Житомирській області (12.03.2006,  $M=3,6$ ); в районі Кривого Рогу (25.12.2007,  $M=3,6$  і 23.06.2013,  $M=4,6$ ); на межі Сумської і Полтавської областей (02.03.2015,  $M=4,6$ ) (Кендзера О.В., 2016).

Найбільшу небезпеку для населення, промисловості, інфраструктури практично на всій території України становлять підкорові землетруси сейсмоактивної зони Вранча, але не менш загрозливими є локальні неглибокі землетруси Криму, Закарпаття і Передкарпаття. Щороку фіксується близько 70–100 таких подій. Райони з прогнозованою інтенсивністю сейсмічних впливів 6–9 балів охоплюють близько 20% території України (понад 120 тис. км<sup>2</sup>), на якій проживає понад 10 млн чоловік, райони з інтенсивністю 7 – 9 балів – приблизно 12% території з населенням більш як 7 млн чоловік. До сейсмічно небезпечних належать території Кримського півострова, Карпатського регіону, частина Одеської, Миколаївської, Херсонської, Запорізької, Кіровоградської, Дніпропетровської, Вінницької, Львівської, Тернопільської, Чернівецької областей і кілька районів Донбасу (Кендзера О.В., 2016).

За останні 10 років територія України зазнавала впливу 30 сейсмічних випадків з магнітудами від 2,0 до 4,9. З них 15 випадків сталися на території нашої держави, інші – на територіях Туреччини, Угорщини, Румунії і Росії. Основними джерелами сейсмічних впливів для нас є зона Вранча в Карпатах та Чорне море, геологічні структури яких генерують землетруси (<https://day.kyiv.ua/uk/>

*blog/suspilstvo/zemletrusy-ta-seysmichna-bezpeka-vyzhyvannya-u-sviti-neliniynyh-zagroz).*

Відповідальною за більшість наших землетрусів сейсмоактивна є зона Вранча, що розташована на ділянці стику Південних (румунських) та Східних (українських) Карпат (рис. 2.2).



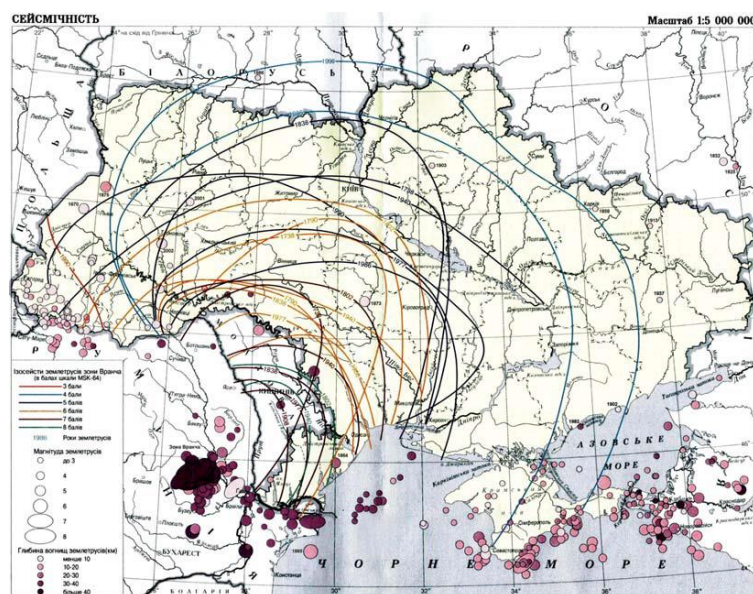
**Рис. 2.2.** Карта сейсмічної небезпеки, складена за даними Інституту геофізики НАН України та Кримської експертної ради з оцінки сейсмічної небезпеки і прогнозу землетрусів

В її межах осередки землетрусів розташовані в консолідованій корі, а також у верхній мантії на глибинах 80-160 км. Найбільшу небезпеку становлять ті, що виникають на великих глибинах. Вони спричиняють землетруси потужністю до 8-9 з епіцентрами в Румунії, Болгарії та Молдові. Велика глибина цих землетрусів обумовлює їхнє відносно слабе затухання з відстанню, і таким чином прилегла частина України потрапляє в 4-6-бальну ділянку впливу цієї зони.

За останні 100 років в зоні Вранча сталося більше 50 землетрусів з магнітудою більше 6, а катастрофічні землетруси 1940 та 1977 мали магнітуду більше 7. На думку вітчизняних геофізиків, південно-західна частина України, що підпадає під безпосередній вплив зони Вранча, потенційно може бути віднесена до 8-бальної зони (<https://day.kyiv.ua/uk/blog/suspilstvo/zemletrusy-ta-seysmichna-bezpeka-vyzhyvannya-u-sviti-neliniynyh-zagroz>).

Серед приморських територій варто відокремити Одесу, яка знаходиться під впливом кількох сейсмонебезпечних зон. Лише за останні 10 років навколо Одеси було зафіксовано 3 землетруси з потужністю від 3,7 до 4,9. Також і Крим традиційно належить до регіонів з високою сейсмічною небезпекою. На території Кримського півострова останніми роками зафіксовано понад 30 землетрусів потужністю від 4 до 7. Водночас, Південно-Азовська сейсмоактивна зона виділена відносно недавно. У 80-90-х рр. ХХ ст. тут було зафіксовано кілька землетрусів інтенсивністю 5-5,9. Але за палеосеймотектонічними та археологічними даними встановлено сліди давніх землетрусів інтенсивністю до 9 балів з періодичністю близько 1000 років. Також, у платформній частині України виділено ряд потенційно сеймотектонічних зон з інтенсивністю від 4 до 5,5 балів.

Отже, зонами традиційного сейсмічного впливу в Україні є Закарпаття, Крим, Прикарпаття (Чернівці, Львів, Івано-Франківськ і Тернопіль), Одеська та Кропивницька області, Хмельницька, Донецька та Вінницька області. Також поодинокі сейсмічні випадки були зареєстровані в Полтавській та Дніпровській областях. Загалом, до зони сейсмічного ризику відноситься більше 20% території України, на якій мешкає близько 22% наших співгромадян (рис. 2.3).



**Рис. 2.3.** Сейсмічність України і розподіл інтенсивності сейсмічних струшувань від землетрусів зони Вранча (Румунія) (Кендзера О.В., 2016)

Світовий досвід у цій галузі переконливо свідчить, що основною концепцією сейсмічного захисту має бути впровадження сейсмостійкого проектування і будівництва житла, інфраструктури, а також промислових об'єктів, яке ґрунтується на об'єктивних знаннях і кількісних параметрах реальної сейсмічної небезпеки в районах їх розташування (Кендзера О.В., 2016).

## 2.2. Перелік населених пунктів України, розташованих у сейсмічно небезпечних районах

У табл. 2.1 наведено перелік населених пунктів України, розташованих у сейсмічно небезпечних районах із зазначенням фонові сейсмічної інтенсивності в балах за шкалою (ДСТУ Б В.1.1-28:2010) для середніх ґрунтових умов (II категорія за сейсмічними властивостями) і трьох рівнів небезпеки: 10 % – карта ЗСР-2004-А; 5 % – карта ЗСР-2004-В і 1 % – карта ЗСР-2004-С протягом 50 років.

Таблиця 2.1

### Перелік населених пунктів України, розташованих у сейсмічно небезпечних районах

Назва населених пунктів України	Карти ЗСР-2004			Назва населених пунктів України	Карти ЗСР-2004		
	А	В	С		А	В	С
<b>Автономна Республіка Крим</b>							
Азовське	7	7	8	Мирний	7	7	8
Алупка	8	9	10	Молодіжне	7	8	9
Алушта	8	9	10	Научний	8	8	9
Армянськ	6	6	7	Нижньогірський	7	7	8
Багерове	8	9	9	Новоозерне	7	7	8
Бахчисарай	8	8	9	Новоселівське	6	7	7
Білогірськ	8	8	9	Ореанда	8	9	10
Владиславівка	8	8	9	Орджонікідзе	8	8	9
Вільне	7	7	8	Паркове	8	9	10
Гаспра	8 <sup>*)</sup>	9	10	Партеніт	8	9	10
Гвардійське	6	7	7	Первомайське	6	7	7
Голуба Затока	8	9	10	Планерське	8	8	9
Горностаївка	8	9	9	Понизівка	8 <sup>*)</sup>	9	10
Гурзуф	8	9	10	Поштове	8	8	9
Джанкой	6	7	7	Приморський	8	8	9
Євпаторія	7	7	8	Роздольне	6	6	7
Заозерне	7	7	8	Саки	7	7	8
Зуя	7 <sup>*)</sup>	8	8	Санаторне	8	9	10
Керч	8	9	9	Сімеїз	8 <sup>*)</sup>	9	10
Кіровське	8	8	9	Сімферополь	7 <sup>*)</sup>	8	8
Комсомольське	7	8	9	Советський	7	8	8
Кореїз	8 <sup>*)</sup>	9	10	Старий Крим	8	8	9
Красногвардійське	7	7	8	Судак	8	9	9
Краснокам'янка	8	9	10	Феодосія	8	8	9
Красноперекопськ	6	6	7	Форос	8 <sup>*)</sup>	9	10
Куйбишеве	8	8 <sup>*)</sup>	9	Чорноморське	6	6	7
Леніне	8	8	9	Щебетівка	8	8	9
Лівадія	8 <sup>*)</sup>	9	10	Щолкіне	8	8	9
Масандра	8 <sup>*)</sup>	9	10	Яковенкове	8	9	9
Миколаївка	7	8	8	Ялта	8 <sup>*)</sup>	9	10

<b>Вінницька область</b>							
Вінниця	–	–	6	Ладижин	6	6	7
Гайсин	–	6	6	Могилів-Подільський	6	6	7
Жмеринка	6	6	6	Хмільник	–	–	6
Калинівка	–	–	6	Ямпіль	6	7	7
Козятин	–	–	6				
<b>Волинська область</b>							
Володимир-Волинський	–	6	6	Луцьк	–	–	6
Горохів	–	6	7	Любомль	–	–	6
Камінь-Каширський	–	–	6	Нововолинськ	–	6	7
Ківерці	–	–	6	Рожище	–	–	6
Ковель	–	–	6				
<b>Дніпропетровська область</b>							
Вільногірськ	–	–	6	Новомосковськ	–	–	6
Кам'янське	–	–	6	Покров	–	6	7
Дніпро	–	–	6	П'ятихатки	–	–	6
Жовті Води	–	–	6	Павлоград	–	–	6
Інгулець	–	6	7	Першотравенськ	–	–	6
Кривий Ріг	–	6	7	Синельникове	–	–	6
Марганець	–	6	7	Тернівка	–	–	6
Нікополь	–	6	7				
<b>Донецька область</b>							
Бахмут	–	–	6	Покровськ	–	–	6
Горлівка	–	–	6	Макіївка	–	–	6
Мирноград	–	–	6	Маріуполь	–	6	7
Донецьк	–	–	6	Слов'янськ	–	–	6
Дружківка	–	–	6	Сніжне	–	–	6
Єнакієве	–	–	6	Торез	–	–	6
Костянтинівка	–	–	6	Харцизьк	–	–	6
Краматорськ	–	–	6	Шахтарськ	–	–	6
<b>Житомирська область</b>							
Бердичів	–	–	6	Коростишів	–	–	6
Житомир	–	–	6	Малин	–	–	6
Коростень	–	–	6	Новоград-Волинський	–	–	6
<b>Закарпатська область</b>							
Берегове	7	7	8	Рахів	7	7	8
Виноградів	7	7	8	Свалява	7	7	8
Вишкове	7	7	8	Солотвино	7	7	8
Дубове	7	7	8	Тячів	7	7	8
Іршава	7	7	8	Хуст	7	7	8
Міжгір'я	7	7	8	Чоп	7	7	8
Мукачеве	7	7	8	Ужгород	7	7	8
<b>Запорізька область</b>							
Бердянськ	–	6	7	Мелітополь	–	6	7
Дніпрорудне	–	6	7	Оріхів	–	6	7
Енергодар	–	6	7	Пологи	–	6	7
Запоріжжя	–	–	6	Токмак	–	6	7
<b>Івано-Франківська область</b>							
Болехів	6	7	8	Косів	6	7	8
Бурштин	6	6	7	Надвірна	6	7	8
Городенка	6	7	7	Перегінське	6	7	8
Долина	6	7	8	Снятин	6	7	7
Івано-Франківськ	6	7	7	Тисмениця	6	7	7
Калуш	6	7	7	Тлумач	6	7	7
Коломия	6	7	7	Яремче	6	7	8
<b>м. Київ</b>							
Київ	–	–	6				
<b>Київська область</b>							
Біла Церква	–	–	6	Вишневе	–	–	6
Бориспіль	–	–	6	Ірпінь	–	–	6
Боярка	–	–	6	Обухів	–	–	6
Бровари	–	–	6	Переяслав-Хмельницький	–	–	6
Буча	–	–	6	Славутич	–	–	6
Васильків	–	–	6	Фастів	–	–	6
Вишгород	–	–	6	Яготин	–	–	6
<b>Кіровоградська область</b>							
Долинська	–	6	7	Новоукраїнка	–	6	7
Знам'янка	–	–	6	Олександрія	–	–	6
Кропивницький	–	–	6	Світловодськ	–	–	6
<b>Луганська область</b>							
Алчевськ	–	–	6	Луганськ	–	–	6
Антрацит	–	–	6	Ровеньки	–	–	6
Брянка	–	–	6	Рубіжне	–	–	6
Хрустальний	–	–	6	Довжанськ	–	–	6

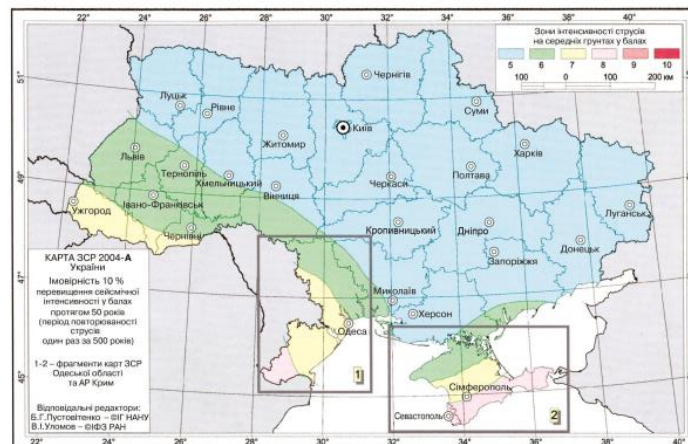
Сорокине	–	–	6	Сєвєродонецьк	–	–	6
Лисичанськ	–	–	6	Кадївка	–	–	6
<b>Львівська область</b>							
Борислав	6	7	8	Сколе	6	7	8
Броди	–	6	7	Сокаль	–	6	7
Дрогобич	6	7	7	Старий Самбір	6	7	8
Золочів	6	6	7	Стебник	6	7	7
Львів	6	6	7	Стрий	6	6	7
Новий Розділ	6	6	7	Трускавець	6	7	7
Новояворівськ	6	6	7	Турка	6	7	8
Самбір	6	6	7	Червоноград	–	6	7
<b>Миколаївська область</b>							
Баштанка	–	6	7	Миколаїв	–	6	7
Вознесенськ	–	6	7	Очаків	6	7	7
Врадївка	6	6	7	Первомайськ	–	6	7
Новий Буг	–	6	7	Снігурівка	–	6	7
Нова Одеса	–	6	7	Южноукраїнськ	–	6	7
<b>Одеська область</b>							
Ананїв	6	7	8	Окни	6	7	8
Арциз	7	8	9	Лиманське	7	8	8
Балта	6	6*)	8	Любашівка	6	6	7
Березино	7	8	9	Миколаївка	6	6	7
Березівка	6	7	7	Нові Білярі	6	7	8
Білгород-Дністровський	7	7*)	8	Овідіополь	7	7	8
Біляївка	7	7	8	Одеса	7*)	7	8
Болград	8	9	9	Радісне	6	7	8
Бородино	7	8	9	Рені	8	9	10
Велика Михайлівка	7	7	8	Роздільна	7	7	8
Великодолинське	7	7	8	Саврань	6	6	7
Вилкове	7	8	9	Сарата	7	8	9
Затишшя	6	7	8	Серпневе	7	8	9
Затока	7	7	8	Слобідка	6	7	8
Зеленогирське	6	6	7	Суворове	8	8	9
Іванівка	6	7	8	Таїрове	7	7	8
Ізмаїл**)	8	9	9	Тарутине	7	8	9
Чорноморськ	7	7	8	Татарбунари	7	8	9
Кілія	8*)	8	9	Теплодар	7	7	8
Кодима	6	6	7	Захарівка	7	7	8
Доброслав	6	7	8	Ширяєве	6	7	8
Подільськ	6	7	8	Южне	6	7	8
<b>Полтавська область</b>							
Гадяч	–	–	6	Лубни	–	–	6
Карлівка	–	–	6	Миргород	–	–	6
Горішні Плавні	–	–	6	Полтава	–	–	6
Кременчук	–	–	6				
<b>Рівненська область</b>							
Дубно	–	–	6	Вараш	–	–	6
Здолбунів	–	–	6	Рівне	–	–	6
Костопіль	–	–	6	Сарни	–	–	6
<b>Севастополь (загальнодержавного підпорядкування)</b>							
Балаклава	8	9	9	Любимівка	8	8	9
Верхньосадове	8	8	9	Кача	8	8	9
Інкерман	8	9*)	9	Севастополь	8	9*)	9*)
<b>Сумська область</b>							
Конотоп	–	–	6	Ромни	–	–	6
Лебедин	–	–	6	Тростянець	–	–	6
Охтирка	–	–	6				
<b>Тернопільська область</b>							
Бережани	6	6	7	Кременець	–	6	7
Борщів	6	6	7	Теребовля	6	6	7
Бучач	6	6	7	Тернопіль	6	6	7
Заліщики	6	7	7	Чортків	6	6	7
Збараж	6	6	7				
<b>Харківська область</b>							
Балаклея	–	–	6	Лозова	–	–	6
Дергачі	–	–	6	Люботин	–	–	6
Ізюм	–	–	6	Мерефа	–	–	6
Ківшарівка	–	–	6	Первомайський	–	–	6
Красноград	–	–	6	Харків	–	–	6
Куп'янськ	–	–	6	Чугуїв	–	–	6
<b>Херсонська область</b>							
Генічеськ	6	6	7	Скадовськ	–	6	7
Каховка	–	6	7	Херсон	–	6	7
Нова Каховка	–	6	7	Олешки	–	6	7
<b>Хмельницька область</b>							
Волочиськ	6	6	7	Славута	–	–	6
Кам'янець-Подільський	6	6	7	Старокостянтинів	–	–	6
Красилів	–	–	6	Хмельницький	–	6	7
Нетішин	–	–	6	Шепетівка	–	–	6
Полонне	–	–	6				
<b>Черкаська область</b>							
Ватутіно	–	–	6	Сміла	–	–	6
Звенигородка	–	–	6	Умань	–	6	7
Золотоноша	–	–	6	Черкаси	–	–	6
Канів	–	–	6	Шпола	–	–	6
Корсунь-Шевченківський	–	–	6				
<b>Чернівецька область</b>							

Вашківці	6	7	7	Новоселиця	6	7	7
Вижниця	6	7	8	Сокіряни	6	6	7
Герца	6	7	8	Сторожинець	6	7	8
Заставна	6	7	7	Хотин	6	7	7
Кіцмань	6	7	7	Чернівці	6***)	7	7
Новодністровськ	6	6	7				
<b>Чернігівська область</b>							
Бахмач	–	–	6	Прилуки	–	–	6
Ніжин	–	–	6	Чернігів	–	–	6
*)Пункт знаходиться в зоні зміни фонові сейсмічності;							
**) Нормативна бальність (м. Ізмаїл) відноситься до ґрунтів III категорії за сейсмічними властивостями;							
***) З урахуванням типу ґрунтів для м.Чернівці приймати сейсмічність 7 балів.							

Сейсмічність у балах для населених пунктів України, які не згадуються у табл.2.1, визначається безпосередньо за вказаними картами ЗСР-2004–А0, А, В, С або уточнюється розробниками карт (*прДБН В.1.1-12:202Х*).

### 2.3. Карти загального сейсмічного районування (ЗСР) території України

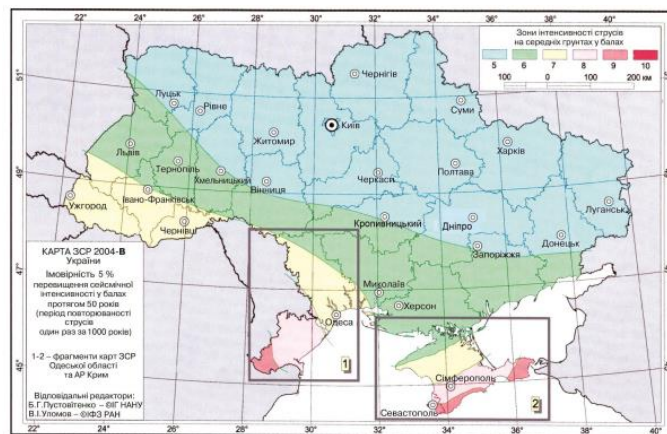
Карти загального сейсмічного районування (ЗСР) території України з візкою карт Автономної Республіки Крим та Одеської області за даними (*прДБН В.1.1-12:202Х*) представлені з періодами повторюваності один раз на 500 років (карта ЗСР-2004- А на рис. 2.4), 1000 років (карта ЗСР-2004-В, на рис. 2.5) і 5000 років (карта ЗСР-2004-С, на рис. 2.6) для середніх ґрунтових умов і ймовірності перевищення розрахункової інтенсивності протягом 50 років 10 %, 5 % і 1 %, відповідно .



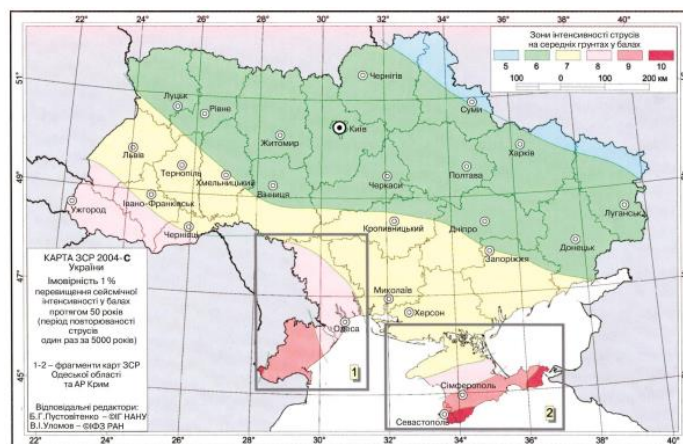
**Рис. 2.4.** Карта загального сейсмічного районування ЗСР-2004-А території України

Врізки карт ЗСР території АР Крим та Одеської області, крім карт А, В, С, доповнені картами ЗСР-2004-А0 і представлені на рис. 2.7 – рис. 2.14 для середнього періоду повторюваності 100 років і ймовірності перевищення заданих інтенсивностей 39 % протягом 50 років (*прДБН В.1.1-12:202X*).

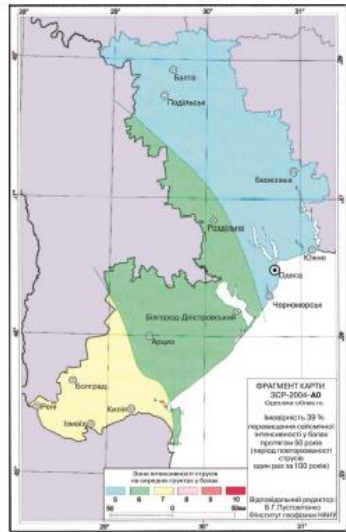
Зазначені на картах ЗСР-2004 бали відповідають балам шкали сейсмічної інтенсивності (*ДСТУ Б В.1.1-28:2010*).



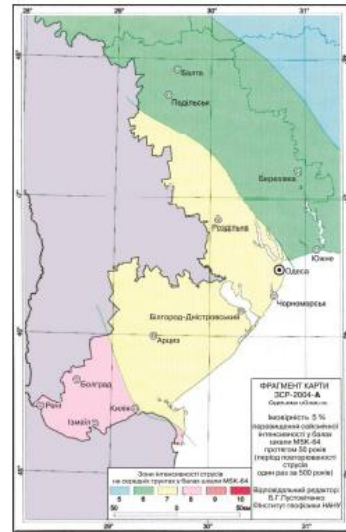
**Рис. 2.5.** Карта загального сейсмічного районування ЗСР-2004-В території України



**Рис. 2.6.** Карта загального сейсмічного районування ЗСР-2004-С території України



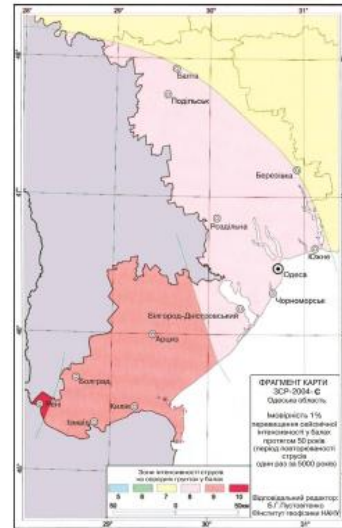
**Рис. 2.7.** Фрагмент карти ЗСР-2004-А0. Одеська область



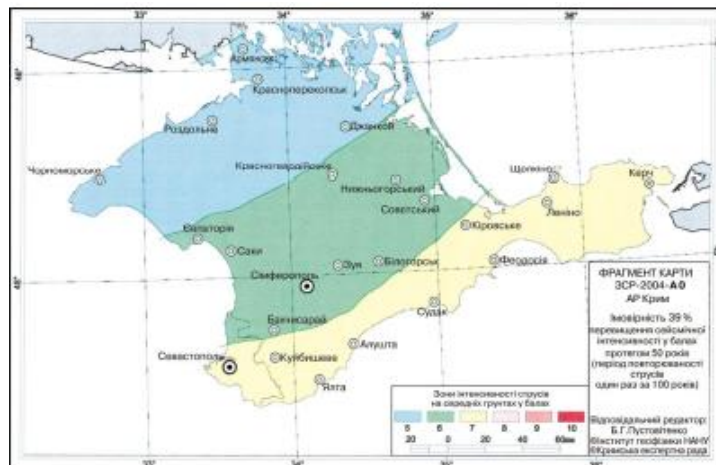
**Рис. 2.8.** Фрагмент карти ЗСР-2004-А. Одеська області



**Рис. 2.9.** Фрагмент карти ЗСР-2004-В. Одеська область



**Рис. 2.10.** Фрагмент карти ЗСР-2004-С. Одеська області



**Рис. 2.11.** Фрагмент карти ЗСР-2004-А0. Автономна республіка Крим

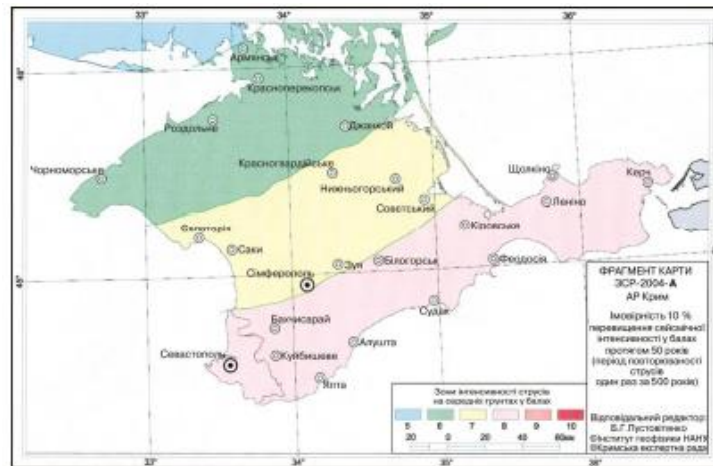


Рис. 2.12. Фрагмент карты ЗСР-2004-А. Автономная республика Крым

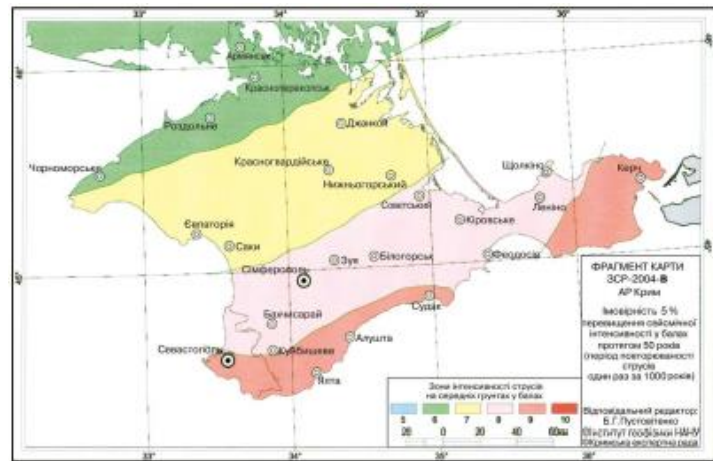


Рис. 2.13. Фрагмент карты ЗСР-2004-В. Автономная республика Крым

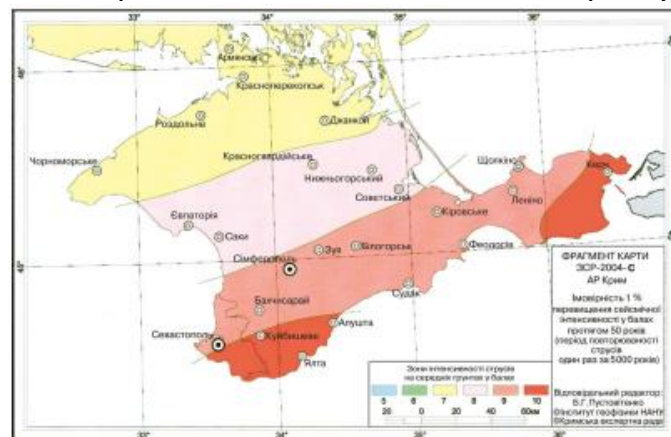


Рис. 2.14. Фрагмент карты ЗСР-2004-С. Автономная республика Крым

## 2.4. Забезпечення моніторингу сейсмологічної небезпеки техногенного походження

За інженерно-сейсмічними оцінками, в більшості районів України від 30 до 50% забудови не відповідають сучасному визначенню рівня сейсмічного ризику. Це і є основний чинник ризику, разом з необізнаністю населення у питаннях поведінки під час землетрусів (<https://day.kyiv.ua/uk/blog/suspilstvo/zemletrusy-ta-seysmichna-bezpeka-vyzhyvannya-u-sviti-neliniynyh-zagroz>).

Окремою актуальною проблемою для нашої країни є сейсмічна активність техногенного походження. В умовах активних багаторічних гірничодобувних робіт, що проводяться в складних геологічних умовах протягом багатьох десятиліть з використанням різноманітних, в тому числі і небезпечних технологій, небезпека виникнення техногенних землетрусів істотно і нелінійно зростає. Будівництво і наявність великих водосховищ також спричинює посилення тектонічної активності, виникнення обвальних та штучних землетрусів (<https://day.kyiv.ua/uk/blog/suspilstvo/zemletrusy-ta-seysmichna-bezpeka-vyzhyvannya-u-sviti-neliniynyh-zagroz>).

Для довгострокового соціально-економічного планування, раціонального землекористування, прийняття адміністративних і технічних рішень щодо забезпечення стабільної експлуатації існуючих споруд і розміщення нових (ГЕС, АЕС, трубопроводів тощо) використовуються імовірнісні карти загального сейсмічного районування, які регламентують проектно-пошукові і будівельні роботи в сейсмічних районах. Вони є складовою частиною державних будівельних норм (*Сейсмічність і сейсмічна небезпека території України* <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0244550-08#Text>).

Об'єктивні дані для сейсмологічних досліджень, на основі яких формуються науково обґрунтовані прогностичні значення сейсмічної небезпеки, отримують на сейсмічних станціях. На 2020 рік до складу Головного центру спеціального контролю входять «Городок», «Малин», «Кам'яний Брід»,

«Любар», «Підлуби», «Зелениця», сейсмічна станція PS-45, «Балта» (Одеська область), «Кам'янець-Подільський» (Хмельницька область), «Ужгород», «Київ» «Харків», «Полтава».

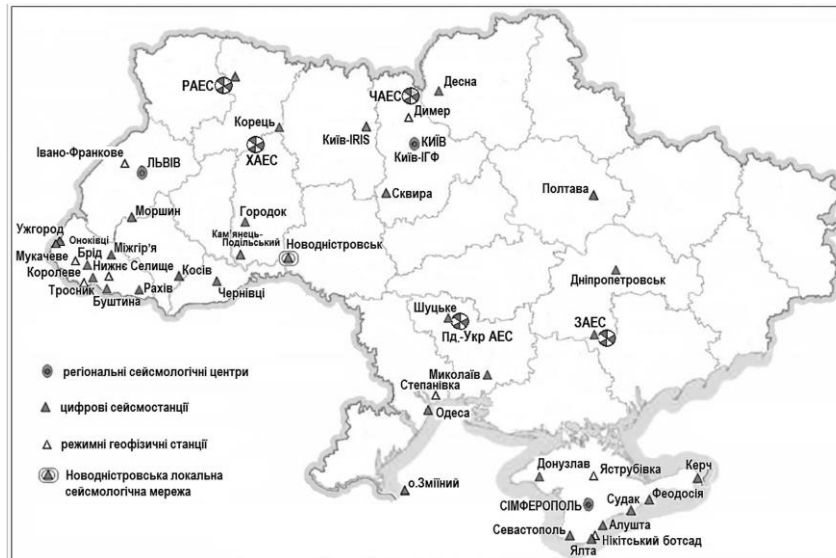
До 2014 р. р. два пункти розташовувалися у Євпаторії та Севастополі, але до анексії Криму обладнання встигли вивезти і розгорнути аналогічні у Харкові та Полтаві ([https://uk.wikipedia.org/wiki/Головний\\_центр\\_спеціального\\_контролю\\_ДКАУ](https://uk.wikipedia.org/wiki/Головний_центр_спеціального_контролю_ДКАУ)).

Отже, незважаючи на те, що Україна знаходиться у відносно безпечній зоні, планувати міське господарство, розташування критичної інфраструктури та будівництво слід з урахуванням найвищих рівнів оцінюваної небезпеки (<https://day.kyiv.ua/uk/blog/suspilstvo/zemletrusy-ta-seysmichna-bezpeka-vyzhyvannya-u-sviti-neliniynyh-zagroz>).

Саме тому, з метою підвищення безпеки проживання населення та експлуатації виробничих фондів у сейсмонебезпечних регіонах країни, координації діяльності органів виконавчої влади Постановою Кабінету Міністрів України від 11 вересня 1995 р. № 728 було утворено Національну систему сейсмічних спостережень та підвищення безпеки проживання населення у сейсмонебезпечних регіонах.

В Україні сформульовано, обґрунтовано і впроваджено в практику оптимальну для нашої території стратегію сейсмічного захисту. В ній враховано, що складовими сейсмічного ризику є сейсмічна небезпека і сейсмічна вразливість (Кендзера О.В., 2016).

На сьогодні мережа сейсмологічних спостережень НАН України налічує 38 сейсмологічних станцій (рис. 2.15) (Кендзера О.В., 2015). Усі вони цифрові і можуть працювати в онлайн-режимі. Крім того, ІГФ НАН України забезпечує роботу станції Київ-IRIS, яка експлуатується спільно з Альбукеркською сейсмологічною лабораторією Геологічної служби США і вважається однією з найкращих у системі IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology).



**Рис. 2.15.** Мережа сейсмічних спостережень НАН України

Мережа постачає уніфіковані дані про сейсмічні прояви на території України і в прилеглих районах, на основі яких визначають науково обґрунтовані прогностні значення сейсмічної небезпеки, необхідні для довгострокового соціально-економічного планування, раціонального землекористування, прийняття адміністративних і технічних рішень щодо забезпечення стабільної експлуатації наявних і будівництва нових споруд (Кендзера О.В., 2016).

На постійній основі в он-лайн-режимі працюють 4 сейсмічні станції НАН України: «Київ-IRIS», «Львів», «Ужгород», «Сімферополь», які передають дані до таких центрів міжнародних сейсмологічних мереж, як IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology), EMSC (European-Mediterranean Seismological Center) та Міжнародний сейсмологічний центр в Обнінську. Однак усі сейсмічні станції НАН України приєднано до Інтернету і в разі потреби до них можна звернутися. Їхні IP-адреси відомі світовим сейсмологічним центрам, так само, як українським фахівцям відомі адреси зарубіжних сейсмічних станцій. Якщо, наприклад, стався землетрус, то з метою підвищення точності визначення параметрів його вогнища сейсмологи будь-якої країни можуть зчитати необхідну інформацію з сейсмостанції, до зони контролю якої входить район, де відбулася ця сейсмічна подія (прДБН В.1.1-12:202Х).

На базі Головного центру спеціального контролю (ГЦСК) створено Національний центр даних системи, який здійснює оперативне та методичне керівництво роботою сил і засобів, приймання, редагування, накопичення, обробку геофізичних даних у реальному масштабі часу та забезпечення результатами обробки споживачів інформації.

Регулярний моніторинг сейсмонебезпечних регіонів, який здійснюється різними організаціями, призводить до накопичення величезних масивів розрізнених даних. Проте, вони не дозволяють здійснювати їх комплексний аналіз в процесі прийняття оперативних управлінських рішень з питань забезпечення безпеки, оскільки на сьогодні не існує однозначного методу визначення характеристик можливого землетрусу, а саме дати, місця розташування і магнітуди.

Вирішення проблеми можливе на думку фахівців за рахунок використання матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС), оскільки ці технології забезпечують здійснення оперативного збору актуальних даних, аналіз ознак передвісників землетрусів, оцінку потенційних загроз їх прояву в просторово-часовому масштабі.

Космічні системи моніторингу відкрили можливість безперервно і оперативно спостерігати за сейсмонебезпечними регіонами і аномаліями, що виникають в них. Ці аномалії проявляються в усіх середовищах – літосфері, атмосфері і магнітосфері Землі. На сьогодні відомо понад 200 провісників землетрусів, але жоден з них не є абсолютно надійним, хоча комплексне використання класів провісників іноді дозволяє розв'язати задачу прогнозу – визначити місце, час і магнітуду землетрусу.

## **2.5. Локальна сейсмічність української частини Східноєвропейської платформи**

На платформній частині України відомо кілька відчутних місцевих землетрусів. Їх вогнища знаходилися у межах земної кори, внаслідок чого

сейсмічний ефект мав локальний характер. Інтенсивність сейсмічних струшувань в епіцентральної зоні досягала 6 – 7 балів за шкалою MSK-64.

За історичними даними, наведеними в (*Новодарьевское землетрясение , 2010, Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР*), такі землетруси проявилися на межі Кіровоградської та Черкаської областей – 7 балів (1873 р.); у Донецькій області (район Костянтинівки) –  $6 \pm 1$  бал (1937 р.); Харківській – 5-6 балів (1858 і 1913 рр.); Чернігівській –  $5 \pm 1$  бал (1905 р.); Тернопільській – 6 балів (2002 р.) і в інших місцях. Рідкісні сейсмічні події природного характеру в умовах давньої платформи викликають підвищений інтерес сейсмологів навіть у разі невеликої магнітуди, особливо якщо їх відчувало населення (*Кендзера О.В., 2015*).

Наприклад, 3 лютого 2015 в 05 год. 56 хв. за Гринвічем на межі Сумської та Полтавської областей відбувся землетрус з магнітудою  $m_b=4,6$ . Він був зареєстрований усіма сейсмологічними станціями країни та десятками станцій глобальної сейсмічної мережі. За історичними даними безпосередньо в цій частині України ще не спостерігалися землетруси такої величини. Епіцентр землетрусу знаходився в зоні, де з ймовірністю не перевищення 95% за найближчих 50 років можливі землетруси з інтенсивністю струшувань 5 балів, а з ймовірністю не перевищення 99% – 6 балів (*ДБН В. 1.1-12:2006*). Епіцентр землетрусу знаходився в зоні зчленування двох великих структурних елементів Східно- європейської платформи – північного крила Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) і південного 12 схилу Воронезького кристалічного масиву (ВКМ).

Для вивчення сейсмічних проявів співробітники ІГФ НАН України провели макросейсмічне обстеження його наслідків. За даними візуального спостереження та обробки інформації, отриманої шляхом опитування населення в районах, де відчувався землетрус, побудовано картосхему його макросейсмічних проявів. Показано, що в епіцентральної зоні землетрусу на ґрунтах 2-ї категорії за сейсмічними властивостями спостерігалися 6-ти бальні сейсмічні ефекти. На відкритій місцевості відчувалися два потужні поштовхи, в

будинках падали незакріплені предмети, пересувалися і падали меблі, в резервуарах сильно коливалася вода. В окремих будинках утворилися тріщини в стінах. Землетрус відчувався в радіусі 50 км від макросейсмічною епіцентру (Кендзера О.В., 2015).

За результатами обстежень визначено координати макросейсмічною епіцентру цього землетрусу: широта 50,490N, довгота 34,220E. Максимальні спостережувані сейсмічні ефекти загалом відповідають інтенсивності, показаній на карті загального сейсмічного районування ЗСР-2004-С, яка є складовою частиною Державних будівельних норм ДБН-В.1.1:12-2014 «Будівництво в сейсмічних районах України» (ДБН В. 1.1-12:2006).

**Сейсмічність Криворізького басейну.** Дослідження катастроф у районах інтенсивного видобування корисних копалин засвідчило, що в них відбуваються незворотні зміни в напружено- деформованому стані геологічного середовища, які призводять до активізації небезпечних природно-техногенних процесів (зсуви, обвали порід, підтоплення, землетруси, гірські удари тощо). На даний час, як правило, основні кошти Державного бюджету і місцевих громад спрямовуються виключно на ремонтно-захисні заходи локального характеру при ліквідації наслідків негативних природних і природно-техногенних явищ, а не на їх запобігання. Нові об'єкти проектують, споруджують і експлуатують без урахування реального стану геологічного середовища і процесів, які відбуваються в ньому (Кендзера О.В., 2015).

Зокрема, в районі Кривого Рогу протягом останніх років відбулися декілька землетрусів, причини і природа яких потребують подальшого дослідження. Сучасна активізація тектонічних розломів у цьому районі супроводжується розвитком під- земних порожнин, карстових утворень, зсувних ділянок та іншими загрозливими явищами. Найсильніший з криворізьких землетрусів відбувся 7.05.2008 р. з  $M=4,9$ ;  $h=10$  км, останній з відчутних – 24.06.2013 р. Його інтенсивність в епіцентрі досягала 3 балів за шкалою MSK-64 (Кендзера О.В., 2015).

На території платформної частини України створено і включено в режимну роботу нову сейсмологічну станцію ІГФ НАН України «Кривий Ріг», яка забезпечує можливість краще вивчати сучасну сейсмічність західної частини Східноєвропейської платформи в межах території центральної і східної України та суміжних з нею районів.

На основі вивчення записів місцевих сейсмічних подій в районі м. Кривий Ріг, які відбулися в 2006 - 2015 рр. і були зареєстровані мережею сейсмологічних станцій ІГФ НАН України, та узагальнення геолого-геофізичних даних про будову земної кори в досліджуваному районі і, зокрема, про будову шовної зони на межі Інгульського та Середньопридніпровського мегаблоків Українського щита, було встановлено основні параметри вогнищ криворізьких землетрусів і висунуто гіпотезу про їх природно-техногенне походження. Встановлено, що при масштабних розробках покладів корисних копалин із застосуванням потужних вибухів у шахтах (на глибинах 440 – 1300 м), в районі Криворізької залізничної структури не можна виключати виникнення землетрусів з магнітудою вищою 5,0.

**Вплив землетрусів зони Вранча.** На значній частині території України проявляються сильні підкорові землетруси зони Вранча (*ДБН В.1.1-12:2014, 2014, Національний атлас України, 2007, Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР, 1977*).

Зона розташована на крутому згині гірської дуги в місці зчленування Східних і Південних Карпат, на території Румунії. Вона є частиною Середньоморсько-Альпійсько-Гімалайського сейсмоактивного поясу планети. Під значним впливом землетрусів зони Вранча перебувають південний захід (аж до Буковини включно) і центр України. Останні сильні землетруси в зоні Вранча відбувалися в 1940, 1977, 1986 і 1990 роках. У Румунії й сусідній Молдові вони спричинили значні руйнування, а події 1940 і 1977 років – навіть людські жертви (*Кендзера О.В., 2015*).

Особливістю сильних землетрусів Вранча є значна глибина вогнищ (70 – 190 км). Встановлена тенденція до заглиблення вогнищ із збільшенням

магнітуди землетрусів. Основна частина підкорових землетрусів виникає в локальній області об'ємом 75 x 50 x 25 км. Більшість землетрусів мають ізосейсти, витягнуті на північний схід від зони Вранча. Істотні відмінності в їх конфігурації зумовлені особливостями будови середовища на шляхах поширення сейсмічних хвиль і механізмів вогнищ (діаграмами випромінювання сейсмічної енергії). Для зони Вранча характерним є підкидо-зсувний тип переміщення у вогнищах землетрусів при діагональній орієнтації головних стискуючих напружень (Кендзера О.В., 2015).

Завдяки великим магнітудам і значним глибинам вогнищ землетруси зони Вранча відчуються населенням на величезній території: від Греції на півдні – до Фінляндії на півночі і від європейської частини Росії на сході до Німеччини на заході. Сильні підкорові землетруси зони Вранча відчуються практично на всій території України. Побудовані в результаті макросейсмічних обстежень карти ізосейст підкорових землетрусів зони Вранча показують, що інтенсивність сейсмічних струшувань на території південно-західного регіону Східноєвропейської платформи плавно змінюється від 7-8 балів на південному заході Одеської області до 3-4 балів у північно-східних районах України (Кендзера О.В., 2015).

## **2.6. Методика прогнозування кількісних параметрів сейсмічної небезпеки за геофізичними даними**

За матеріалами обробки сейсмологічних записів постійно поповнюється комп'ютерна база даних про світові землетруси та сейсмічні події, які відбулися в ближній зоні та безпосередньо на території України (Кендзера О.В., 2015). Поповнюються бази цифрових сейсмограм сейсмічних подій і мікросейсмічних коливань, спостережених на сейсмічних станціях. Дані про параметри сейсмічності й сейсмічної небезпеки території України, результати оперативного визначення параметрів вогнищ землетрусів з  $M > 6$  на планеті та з  $M > 3$  на

території України й інформація про їх макросейсмічні прояви надаються Державній службі надзвичайних ситуацій, Мінрегіонбуду, Мінприроди, обласним держадміністраціям, прокуратурі, слідчим МВС України, засобам масової інформації та іншим зацікавленим установам для використання в їх діяльності. Сейсмологічні дані публікуються в щорічних «Сейсмологічних бюлетенях України», у фахових журналах і міжнародних збірниках (*Кендзера О.В., 2015*).

В ІГФ НАН України розроблено і впроваджено в практику методику прогнозування кількісних параметрів сейсмічної небезпеки для потреб сейсмічного захисту, яка базується на результатах аналізу сейсмологічних спостережень, виконуваних мережею сейсмічних станцій НАН України та локальними сейсмологічними мережами, на сучасних методах обробки цифрових сейсмічних записів та нових апаратурно-програмних засобах контролю метрологічних параметрів реєструючих сейсмологічних трактів (*Кендзера О.В., 2015*).

Оцінку сейсмостійкості важливих споруд та їх окремих конструкцій проектувальники сейсмостійких об'єктів здійснюють з використанням розрахункових акселерограм і спектрів реакції (на акселерограми) систем одиничних осциляторів із різними періодами власних коливань і різними значеннями загасання (*ДБН В.1.1-12:2014, ДБН В. 1.1-12:2006, Guide No. SSG-9, 2010*).

Розрахункові акселерограми є функціями часу, які моделюють компоненти вектора прискорень в прогнозованих сейсмічних рухах поверхні ґрунту на будівельному (експлуатаційному) майданчику при землетрусах, які можуть реалізуватися на ньому один раз на 1000 років для проектного землетрусу (ПЗ) і один раз на 10000 років для максимального розрахункового землетрусу (МРЗ).

Особлива увага має приділятися сейсмостійкості таких об'єктів як АЕС та ГЕС, в районах розташування яких необхідна організації локальних мереж сейсмічних станцій (*Кендзера О.В., 2015*).

В ІГФ НАН України розроблено методика побудови розрахункових акселерограм, яка відповідає вимогам МАГАТЕ (*Guide No. SSG-9, 2010*) і базується на максимальному використанні інформації, що міститься в зареєстрованих сейсмічних подіях з небезпечних для об'єкта сейсмоактивних зон. Для генерування розрахункових акселерограм застосовується напівемпіричний підхід, який базується на використанні емпіричних аналогів функції Гріна, у вигляді записів слабких землетрусів (вибухів), зареєстрованих безпосередньо на майданчику, і на регіональних закономірностях формування амплітудних спектрів сейсмічних коливань (*Кендзера А.В., 1996, О возможности использования эмпирических передаточных функций..., 1989, О некоторых аспектах сейсмического районирования слабоактивных территорий, 1989, Развитие методів прогнозування кількісних характеристик сейсмічних впливів для території України, 1997, Guide No. SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, 2010, Ohsaki Y., 1979*).

Мінпаливенерго України разом з ДП НАЕК «Енергоатом» прийняли «План заходів з оцінки сейсмічної небезпеки і перевірки сейсмостійкості діючих АЕС», затверджений Постановою Колегії Державного комітету з ядерного регулювання України №7 від 19.02.2009 р. На реалізацію цього плану ІГФ НАН України розробив проекти локальних мереж для моніторингу сейсмічної ситуації навколо всіх українських АЕС (*Кендзера О.В., 2015*).

Основні завдання локальних мереж сейсмологічних спостережень навколо важливих об'єктів:

– отримання об'єктивної інформації про наявність (або відсутність) зміни геодинамічної ситуації в районі розташування об'єкта шляхом реєстрації слабких землетрусів, які виникають на активізованих тектонічних структурах;

– отримання даних про резонансні властивості ґрунтів на майданчику, які дозволяють ефективно (відносно дешево) захищатись від майбутніх максимальних землетрусів шляхом внесення змін у власні періоди коливань об'єктів і відповідальних конструкцій для уникнення резонансних ефектів;

– визначення кількісних параметрів проектного (ПЗ) і максимального розрахункового (МРЗ) землетрусів із місцевих і віддалених сейсмоактивних зон для побудови розрахункових акселерограм і спектрів реакції;

– отримання об'єктивної інформації про параметри сейсмічних впливів на будівлі та відповідальні конструкції при реалізації сильних місцевих і віддалених землетрусів, необхідної для прийняття рішень про необхідність (або відсутність необхідності) додаткової перевірки надійності споруд і обладнання, яке зазнало сейсмічних впливів;

– отримання інформації, необхідної для оптимального налагодження параметрів датчиків вібраційного захисту (*Кендзера О.В., 2015*).

## РОЗДІЛ 3

### ПРОГНОЗУВАННЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ

Вчені, ще в 80-х рр. ХХ ст. помітили, що перед потужними землетрусами над районами, де повинно було відбутись стихійне лихо, спостерігались незвичні аномалії (іоносферні, теплові, геофізичні тощо). Причому, виникали вони за кілька днів до поштовхів.

#### 3.1. Провісники землетрусів

Про можливе виникнення землетрусів можна судити за появою провісників землетрусів, кількість яких сьогодні складає близько 200. Це перед усім:

– швидке зростання частоти слабких поштовхів (форшоків) – помірних землетрусів, що передують сильному. Висока форшокова активність у поєднанні з іншими явищами може служити оперативними передвісником. Так, наприклад, Китайське сейсмологічне бюро на цій підставі почало евакуацію мільйона чоловік за день до сильного землетрусу в Хайченге в 1975 р.

Хоча половині великих землетрусів передують форшоки, із загального числа землетрусів форшоки є лише для 5-10% землетрусів. Це часто породжує хибні попередження;

– деформації земної кори, що визначається спостереженнями із супутників або зйомкою на поверхні землі за допомогою лазерних джерел світла;

– зміна відношення швидкостей розповсюдження поздовжніх і поперечних хвиль напередодні землетрусу;

– зміна рівня ґрунтових вод у свердловинах;

– зміна вмісту радону в воді та ряд інших.

***Ознаками близького землетрусу можуть також слугувати:***

– запах газу, де раніше цього не відзначалось;

- тривога птахів та домашніх тварин;
- іскри між близько розташованими електричними дротами;
- блакитне освітлення внутрішньої поверхні будинків.

Землетруси можуть супроводжуватись також іншими явищами, наприклад світінням атмосфери, порушенням радіозв'язку і не менш страшним явищем – цунамі, морських хвиль, які іноді виникають, коли гіпоцентр (осередок) землетрусу знаходиться в глибоководному жолобі світового океану. Так було в Лісабоні, на Алясці, в Індонезії.

Особливо цунамі небезпечні тим, що практично раптово хвилі з'являються на березі, на островах. Приклад – Гавайські острови. Хвиля від Камчатського землетрусу 1952 р. прийшла несподівано через 22 години.

Хвиля цунамі непомітна у відкритому морі, але з виходом на берег вона набуває крутизну переднього фронту, зменшується швидкість руху хвилі і відбувається нагін води, що призводить до зростання хвилі іноді до 30 м залежно від сили землетрусу і рельєфу берега.

Так був начисто змитий пізньої осені 1952 р. м. Північно-Курильськ, який знаходився на березі протоки між о. Парамушир і о. Шумшу. Сила удару хвилі і її руху назад були настільки сильними, що танки, які перебували в порту, просто були змиті і зникли "в невідомому напрямку" (<https://liveps.ru/uk/na-chem-osnovan-princip-deistviya-seismografa-izmeritelnye/>).

Але всі відомі на сьогодні провісники землетрусів не є надійними, тому на сьогодні вести мову про ефективне прогнозування землетрусів та їх наслідків зарано.

### **3.2. Визначення проблем прогнозування землетрусів**

Важливість вивчення і прогнозування землетрусів та виверження вулканів, як одних з найбільш значимих для людства природних катастроф, сьогодні усвідомлена людством, науковим співтовариством, владою регіонів, окремо взятих держав і міжнародними організаціями.

Щоб оцінити можливість і практичну користь ефективного прогнозу землетрусів потрібно чітко визначити, а яким критеріям він повинен відповідати. Це в жодному разі не вгадування, не тривіальне передбачення наперед регулярних подій. Прогноз – це науково обґрунтоване судження про місце, час і стан явища, закономірності його виникнення, поширення та зміни якого невідомі чи неясні (<https://srcaltufevo.ru/uk/kak-mozhno-predugadat-zemletryasenie-mozhno-li-predskazat-zemletryasenie-mozhno.html>). Це припущення про те, що землетрус певної магнітуди відбудеться в певному місці в певний час (або в певному діапазоні часу). Принципова можливість прогнозу сейсмічних катастроф довгі роки не викликала жодних сумнівів. Віра в безмежний передбачуваний потенціал науки підкріплювалася, здавалося б, цілком переконливими аргументами. Сейсмічні події з виділенням величезної енергії не можуть відбуватись у надрах Землі без певної підготовки, яка повинна включати перебудови структури та геофізичних полів, тим більші, чим більш інтенсивним буде очікуваний землетрус. Проява таких перебудов – аномальні зміни тих чи інших параметрів геологічного середовища – виявляються методами геолого-геофізичного та геодезичного моніторингу. Завдання полягало в тому, щоб маючи необхідні методики та апаратуру, вчасно зафіксувати виникнення та розвиток таких аномалій (<https://srcaltufevo.ru/uk/kak-mozhno-predugadat-zemletryasenie-mozhno-li-predskazat-zemletryasenie-mozhno.html>).

Однак виявилось, що навіть у районах, де ведуться безперервні ретельні сейсмічні спостереження, наприклад у Каліфорнії (США) та Японії, – найсильніші землетруси щоразу трапляються несподівано. Причину цього вважали просто в недостатній вивченості механізму досліджуваного процесу.

Отже, сейсмічний процес априорі вважався в принципі прогнозованим, а якщо механізми, фактичні дані та необхідні методики на даному етапі є незрозумілими або недостатніми то в майбутньому вони будуть доповнені і вдосконалені. Тобто, будь-яких принципово непереборних перешкод прогнозуванню не існує. Успадковані від класичної науки постулати безмежних

можливостей наукового пізнання, передбачення і прогнозування процесів, що цікавлять людство, були до відносного часу вихідними принципами будь-якого природно-наукового дослідження (<https://srcaltufevo.ru/uk/kak-mozhno-predugadat-zemletryasenie-mozhno-li-predskazat-zemletryasenie-mozhno.html>).

Зараз ситуація трохи змінилась. Сьогодні, навіть без проведення спеціальних досліджень можна впевнено «прогнозувати» наприклад, у високосейсмічній зоні переходу від азіатського континенту до Тихого океану в найближчі 1000 років сильний землетрус. Так само «обґрунтовано» можна стверджувати, що в районі острова Ітуруп Курильської гряди завтра о 14-00 відбудеться землетрус з магнітудою 5,5. Однак ціна таким прогнозам – ламаний гріш. Чому? Першій із прогнозів цілком достовірний, але нікому не потрібний через його вкрай малу точність, другий доволі точний, але також марний, бо його достовірність близька до нуля (<https://srcaltufevo.ru/uk/kak-mozhno-predugadat-zemletryasenie-mozhno-li-predskazat-zemletryasenie-mozhno.html>).

З цього зрозуміло, що:

- а) за будь-якого певного рівня вивченості підвищення достовірності прогнозу тягне за собою зниження його точності, і навпаки;
- б) при недостатній точності прогнозу будь-яких параметрів(наприклад, місця та магнітуди землетрусу) навіть точне передбачення третього параметру (часу) втрачає практичний зміст.

Таким чином, головне завдання та головні труднощі прогнозування землетрусу полягають в тому, щоб передбачення його місця, часу та енергії чи інтенсивності задовольняли вимогам практики одночасно і точності, і достовірності (<https://srcaltufevo.ru/uk/kak-mozhno-predugadat-zemletryasenie-mozhno-li-predskazat-zemletryasenie-mozhno.html>).

Катастрофічні землетруси 11 березня 2011 р. в Японії, 12 листопада 2017 р. в Ірані та ряді інших країн, сильні виверження вулканів та викликані ними руйнування і людські жертви свідчать, яку загрозу таять небезпечні пробіли в даних про сейсмічну і вулканічну активність. Зараз близько 800 мільйонів людей

живуть у радіусі 100 кілометрів від діючих вулканів – тобто в умовах високого рівня вулканічної небезпеки. Серед них близько 200 млн людей проживають в Індонезії (<https://www.bbc.com/ukrainian/features-44287718>). Тому, тільки повна і достовірна інформація про геодинамічні події, що відбуваються в Землі дозволяє сподіватись на зменшення негативних наслідків природних катастроф.

За всю історію існування людства було зроблено безліч спроб прогнозу землетрусів, але, як це не прикро, так і не було знайдено точного вирішення цієї проблеми. Розподіл провісників землетрусів мозаїчний. Навіть одночасна реалізація всіх відомих передвісників землетрусів свідчить лише про активізацію тектонічних процесів, але чи призведе вона до землетрусу, чи буде він сильним, чи енергія виділиться одномоментно, чи реалізується у вигляді багатьох невеличких землетрусів, сумарна енергія яких відповідатиме одному сильному, – невідомо. Відсутність науково обґрунтованих відповідей на ці питання поки що не дозволяє достатньо надійно прогнозувати землетруси з метою раннього попередження про них (Кендзера О.В., 2016).

Незважаючи на значні зусилля сейсмологів в дослідженнях, поки неможливо дати такий прогноз з точністю до дня чи місяця. Зв'язок із землетрусом певного геофізичного параметра до сьогодення не встановлений. Проблема прогнозу не вийшла за рамки наукового пошуку, залишаються невирішеними всі її основні складові.

Таким чином, при всьому розмаїтті проведених і проаналізованих спостережень, місце, час і магнітуда майбутніх руйнівних землетрусів, навіть у добре вивчених регіонах, як і раніше залишаються неочікуваними. Тобто, на сьогодні достатньо точно для практичного використання прогнозування часу виникнення сильних землетрусів, на жаль, неможливе. Тому всі існуючі методи прогнозу землетрусів (шляхом проведення спеціальних науково-дослідних робіт, за допомогою конструкторських технічних засобів, а також передвісників, що побічно вказують на наближення землетрусів), є якби доповнюючими один одного.

З іншого боку, геодинамічні процеси порівняно з людським життям доволі повільні, тобто у більшості випадків вони проявляють «квазістаціонарність» розвитку. Це дозволяє на основі статистичного аналізу «потоків» землетрусів у сейсмоактивних зонах отримати параметри повторюваності сейсмічних подій і використовувати їх як одну з «ознак» можливого виникнення землетрусів. На жаль, відомо також, що сильні землетруси можуть настільки перебудувати геологічне середовище в сейсмічних зонах, що це призводить до порушення стаціонарності процесів підготовки до наступних землетрусів. Наприклад, у минулому столітті сильні підкорові землетруси в зоні Вранча відбулися в 1940, 1977, 1986 та 1990 роках. Відтоді сильних землетрусів там не було. З огляду на те, що середню періодичність уже перевищено, можна зробити висновок, що сильний землетрус у зоні Вранча може відбутися в будь-який момент (*Кендзера О.В., 2016*).

У зв'язку з цим, потребують найшвидшого вирішення проблеми:

- завчасного прогнозування;
- виправдовуваності прогнозів;
- раннього попередження про землетрус або виверження.

Вчені досі не знають у повній мірі всіх деталей фізичних процесів, пов'язаних із землетрусами, та методів, якими їх можна точно передбачати. Ряд явищ розглядаються зараз як можливі провісники землетрусів:

- зміни в іоносфері;
- різні типи електромагнітних індикаторів, включаючи інфрачервоні і радіохвилі;
- викиди радону;
- дивну поведінку тварин.

Серед методів прогнозування землетрусів особливе місце займає сейморозвідувальний метод, оскільки проходження в гірських породах сейсмічних хвиль залежать від наростання тектонічних напруг в гірських породах. Спостереженнями за швидкостями сейсмічних хвиль, наприклад на

геодинамічних полігонах обраних для спостережень в Середній Азії, засвідчили, що перед початком сильного землетрусу швидкості пружних хвиль стають аномальними ([https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення\\_землетрусів.html](https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення_землетрусів.html)). Причому в напружених породах заміряють співвідношення розповсюдження швидкостей поперечних ( $V_p$ ) і поздовжніх ( $V_s$ ) хвиль у порівнянні з співвідношенням  $V_p/V_s$  в ненапружених породах. Але сейсмічний метод потребує постійного протягом десятків років проведення спеціальних сейсмозвідувальних робіт, шляхом постійного провокування сейсмічних хвиль в земній корі штучними вибухами з послідовною їх реєстрацією пересувними і стаціонарними сейсмічними станціями, що як правило, проводяться дуже рідко ([https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення\\_землетрусів.html](https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення_землетрусів.html)).

На думку Сейсмологічного співтовариства Америки, метод прогнозу, який би був підтверджений як вірний, повинен забезпечити очікувану магнітуду з певним припустимим відхиленням, окреслювати певну зону епіцентру, діапазон часу, в якому відбудеться ця подія, і ймовірність того, що землетрус дійсно відбудеться. Дані, на яких заснований прогноз, повинні піддаватися перевірці і результат їх обробки повинен бути відтворений ([https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення\\_землетрусів.html](https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення_землетрусів.html)). При цьому, досягнення успіху у довгострокових прогнозах (на роки чи десятиліття) набагато вірогідніше досягнення прогнозу з точністю до місяця. Точні короткострокові прогнози (від годин до дня) сьогодні неможливі ([https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення\\_землетрусів.html](https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення_землетрусів.html)).

Метою прогнозування є завчасне одержання якісної і кількісної інформації про можливий час і місце виникнення землетрусу або виверження вулкану, характеру і ступеню пов'язаних з ними небезпек для населення і територій та оцінка можливих масштабів і збитків від їх впливу.

Задачі оперативного прогнозування представлені на рис. 3.1.

Але, які б не були перспективи прогнозу або моніторингу, цілком очевидно, що кількість жертв при землетрусах і економічні втрати можуть бути

істотно зменшені, якщо фахівці спрямують свою винахідливість і працю в першу чергу на розробку більш надійних будівельних нормативів і створення більш досконалих будівельних конструкцій. Кожен землетрус є певного роду як уроком, так і іспитом для сейсмологів, геоінформатиків, проектувальників, землевпорядників і будівельників.

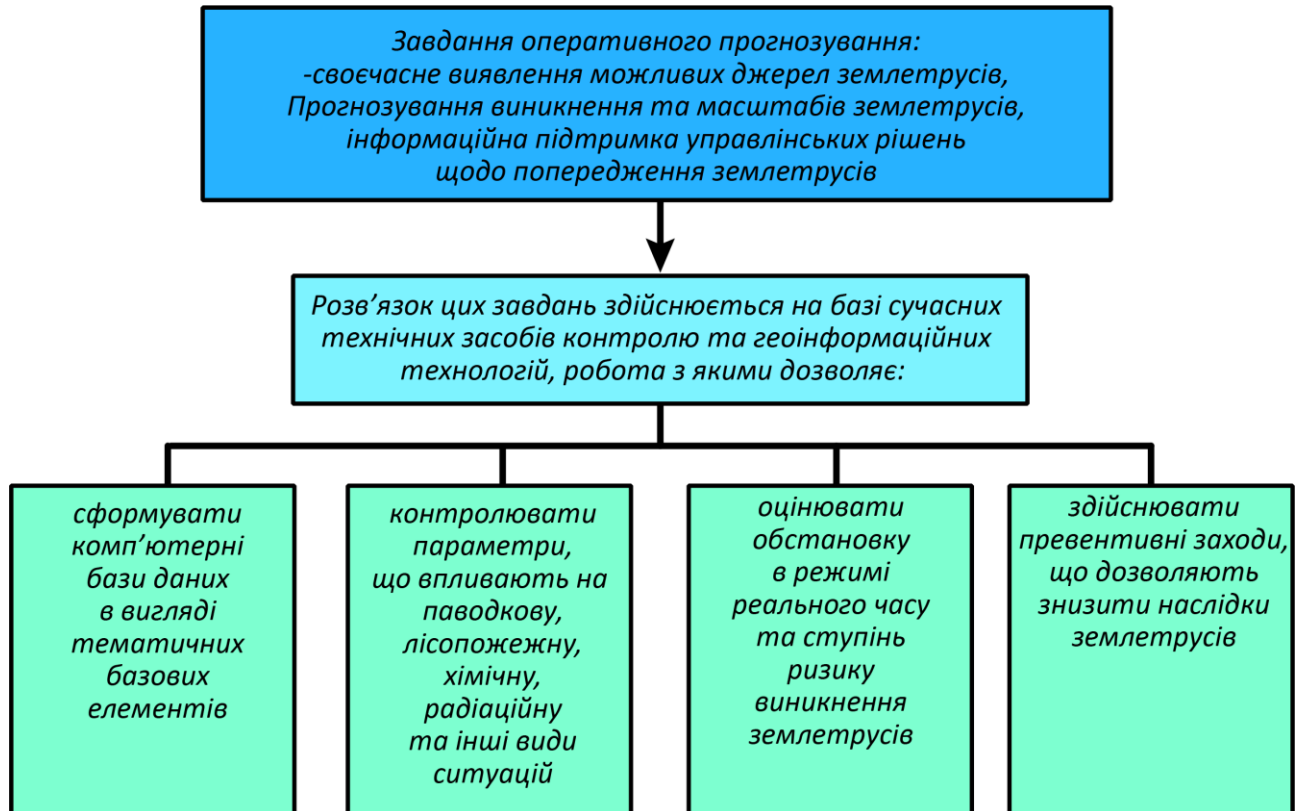


Рис. 3.1. Задачі оперативного прогнозування землетрусів

При організації моніторингу і прогнозуванні землетрусів, виверження вулканів, необхідно враховувати такі основні особливості:

- ризик визначається великою кількістю факторів локального, регіонального, глобального та космічного характеру;
- сумарний ефект взаємодії визначальних факторів характеризується тим, що їх дія істотно перевищує ефект окремих факторів у вигляді їх простої суми, тобто у явному вигляді спостерігається явище складно прогнозованого синергізму;

- прогнозовані небезпечні явища мають велику кількість провісників, які необхідно дослідити, проте більшість з них не є специфічними для конкретного природного явища, що прогнозується;

- існує проблема виправдовуваності прогнозів, які повинні бути довгостроковими.

При прогнозуванні виникнення землетрусів, виверження вулканів повинні вирішуватись такі завдання:

- виявлення і ідентифікація потенційно небезпечних зон з можливими джерелами, вогнищами, епіцентрами тощо;

- розробка можливих варіантів виникнення і розвитку сценаріїв подій, моделювання їх розвитку;

- оцінка ймовірності (частоти) виникнення надзвичайної ситуації за різними сценаріями;

- прогнозування та оцінка можливого збитку від події;

- оцінка показників ризику та побудова карт (полів) ризику.

Строки прогнозів складають: для довгострокового прогнозу – роки, для середньострокового – місяці, для короткострокового – дні, години.

Прогнозування здійснюється на підставі результатів дослідження різних видів ситуацій.

В залежності від використовуваних вихідних даних розрізняють імовірнісні, статистичні та детерміновані методи прогнозування.

### **3.3. Аналіз вирішення проблеми прогнозування землетрусів у світі**

В США проблема прогнозу землетрусів була піднята в середині 60-х рр. ХХ ст. Спільно з Японією було проведено ряд конференцій, але ніяких серйозних результатів не було досягнуто аж до створення в 1977 *Національної програми зниження небезпеки землетрусів (англ. National Earthquake Hazards Reduction Program)*. Одним з її завдань стала розробка технік прогнозу землетрусів і систем

раннього попередження. Проте, акценти були зміщені з прогнозу на пом'якшення шкоди в 1990 р. ([https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення\\_землетрусів.html](https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення_землетрусів.html)).

В 1984 р. стартував Паркфільдський експеримент, але йому не вдалося правильно спрогнозувати землетрус на розломі Сан-Андреас. У 1995 р. Національна академія наук провела колоквиум «Прогноз землетрусів: виклик для науки», який не зміг дати ніякої нової інформації для прогнозів.

В Японії програма з прогнозом землетрусів стартувала в 1964 р. з п'ятирічним планом. У 1978 програма зайнялася прогнозом землетрусу магнітудою вище 8 в Токаї, поблизу Токіо, який міг би стати найбільшим лихом в історії Японії і всієї світової економіки. Зараз Японія володіє найкращою у світі системою запису сейсмічних хвиль, виявлення деформацій земної кори, вивчення властивостей ґрунтових вод, електромагнітних змін. Все це – частина величезних зусиль у спробі зрозуміти процеси підготовки землетрусів ([https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення\\_землетрусів.html](https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення_землетрусів.html)).

20 вересня 2011 р. в Італії шість італійських геофізиків-вулканологів постали перед судом за звинуваченням в нездатності передбачити катастрофічні наслідки землетрусу в Л'Акуїлі (2009) ([https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення\\_землетрусів.html](https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення_землетрусів.html)).

У Китаї після серії форшоків місцеве керівництво евакуювало населення. Через деякий час сталося великий землетрус в Хайченге з  $M=7,3$ . І хоча розмови про можливість такого землетрусу на північному сході Китаю були ще кілька років тому, конкретного прогнозу сформульовано не було.

Незважаючи на це, Таншанський землетрус, який за офіційними даними забрав життя 242 тисяч чоловік, передбачити не вдалося. На деякий час це поставило під сумнів дослідження за прогнозом землетрусів ([https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення\\_землетрусів.html](https://www.wiki.uk-ua.nina.az/Передбачення_землетрусів.html)).

У 1892 р. японський уряд заснував Імперський комітет з дослідження землетрусів у відповідь на руйнівний землетрус Нобі (1891) (Міно-Оварі) з  $M 8.0$ .

## РОЗДІЛ 4

### ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГИЙ ГІС ТА ДЗЗ В ОЦІНЦІ НАСЛІДКІВ ЗЕМЛЕТРУСІВ

#### 4.1. Вибір об'єкта дослідження

Для оцінки можливості оцінки руйнувань, що завдаються землетрусами, був обраний землетрус з магнітудою 6.1 гіпоцентр якого був на глибині 71 км. Час події: 2020-12-10 13:19 (UTC). Місце події: 24.782°N 122.024°W, що знаходиться в акваторії острова Тайвань.

Для створення інтерферограм були завантажені 4 знімки. 2 з них були зроблені за рік до події, а саме в серпні 2019 (15.08.2019р., 27.08.2019р.). Третій знімок був завантажений до події (01.12.2020р.), а останній космознімок був взятий буквально на наступний день після даної події (13.12.2020р.) Локалізація землетрусу представлена на рис. 4.1.



**Рис. 4.1.** Локалізація землетрусу

Знімки в програмному продукті SNAP Desktop потрібно обробляти парами. Першою парою знімків були обрані знімки за серпень 2019. У другій парі один знімок взятий до землетрусу, а інший після нього.

Знімки одержані із супутників місії Sentinel-1, яка складається з угруповання з двох супутників на полярній орбіті, що працюють цілодобово, здійснюючи радіолокаційну зйомку в С-діапазоні з синтетичною апертурою (SAR). Це дозволяє отримувати зображення незалежно від погодних умов (*Braun A., Veci L., 2021*).

Супутники даної місії працюють у заздалегідь запрограмованому режимі, що дозволяє створювати послідовний довгостроковий архів даних, для додатків, що базуються на довгих часових рядах (*Braun A., Veci L., 2021*).

Дані супутники на борту мають інтерферометричний радар із синтетичною апертурою (InSAR), який використовує різницю фаз між двома спостереженнями радара SAR, що виконуються з декілька інших позицій датчика. Знімки містять інформацію про Земну поверхню, амплітуду та фазу (*Braun A., Veci L., 2021*).

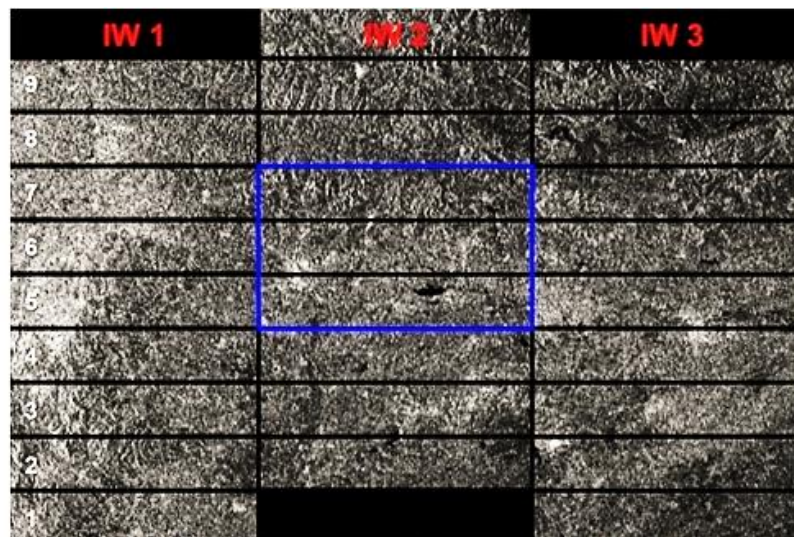
Амплітуда сигналу це сила відповіді радара, а фаза це частка одного повного циклу синусоїдальної хвилі (що по суті є довжиною однієї хвилі SAR). Фаза SAR знімку визначається в основному відстанню між супутниковою антеною та наземною ціллю. Якщо об'єднати фази цих двох зображень після спільної реєстрації, тобто однаковою базовою лінією зйомки, або навіть однією і тією самою орбітою, то можна створити фазу інтерферограми, яка сильно корелює з рельєфом місцевості (*Braun A., Veci L., 2021*).

Інтерферометричний режим широкої смуги (IW) є основним режимом отримання даних над сушею для супутника Sentinel-1. Саме цей режим дає знімок для обробки в InSAR. Даний режим фіксує три підсмуги за допомогою спостереження за місцевістю з прогресивним скануванням SAR (TOPSAR). Зображення кожної підсмуги складається з серії пакетів, де кожен пакет обробляється як окреме зображення SLC. Для того, щоб вирізати окремий пакет потрібно завантажити повний знімок, який є досить об'ємним в SLC (*Braun A., Veci L., 2021*).

Всі 3 підсмуги записуються разом в один архів SLC. В свою чергу продукти 1-го рівня Single Look Complex (SLC) – це знімки в нахиленому діапазоні за

азимутальною площиною зйомки, в площині зображення супутникового знімання. В результаті обробки всіх продуктів SLC створюється єдине зображення в кожному вимірі з використанням всієї доступної смуги пропускання сигналу. Зображення прив'язуються до місцевості за допомогою даних про орбіту і положення супутника (Braun A., Veci L., 2021).

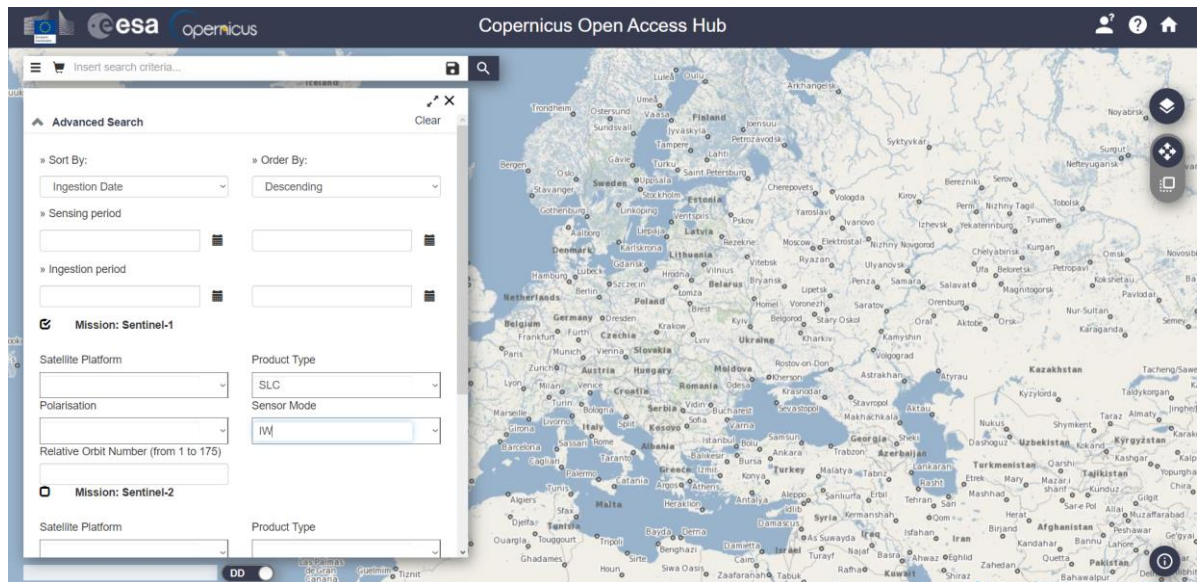
Індивідуально сфокусовані комплексні зображення серій включаються в азимутально-часовому порядку в одне зображення підсмуги з розмежуванням чорною заливкою між ними. Приклад підсмуг та сплахів для одного SLC продукту представлено на рис. 4.2 (Braun A., Veci L., 2021).



**Рис. 4.2.** Приклад зображення підсмуг та сплахів (білі цифри) (Braun A., Veci L., 2021).

#### 4.2. Підготовчий етап робіт

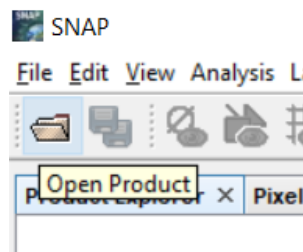
Для створення інтерферометричних знімків потрібно об'єднати два SAR знімки. Для цього потрібно щоб знімання здійснювалося за допомогою IW радару. Отриманий результат представлений в архіві SLC де містяться, як самі зображення смуг, так метадані для них. Також потрібно щоб шлях (pass) який долає супутник був висхідним (descending). Всі ці налаштування можна вказати на сайті Європейської космічної агенції [scihub.copernicus.com](https://scihub.copernicus.com). Загальний вигляд сайту з даними налаштуваннями показано на рис. 4.3.



**Рис. 4.3.** Вигляд сайту [scihub.copernicus.com](http://scihub.copernicus.com) з вказаними налаштуваннями, для завантаження знімки, які потрібно завантажити для створення інтерферометрії

Значна частка роботи буде виконана в програмному продукті SNAP. Дана програма в своїй назві містить аббревіатуру Science Toolbox Exploration Platform. Детальний опис використання функцій буде показано нижче для пари знімків взятих до та після події. Для цього потрібно її завантажити з офіційного сайту Європейського космічного агентства [step.esa.int](http://step.esa.int).

Перед початком роботи потрібно відкрити всі завантажені знімки і перевірити їх метадані. Для цього можна відкрити папку з архівами знімки, і просто їх перетягнути, або натиснути Open Product в лівому верхньому куті так як це вказано на рис. 4.4.

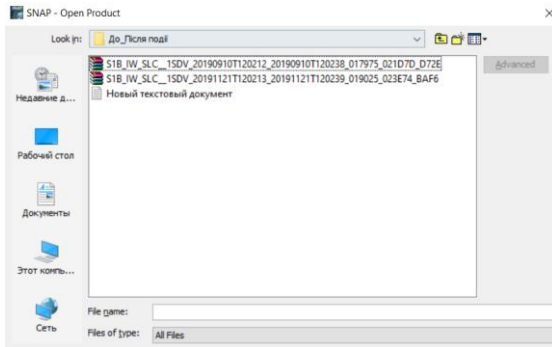


**Рис. 4.4.** Розташування меню завантаження даних

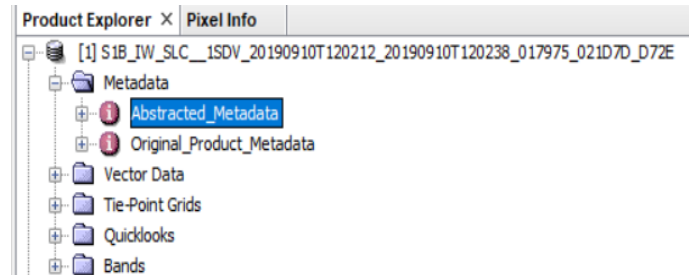
У вікні, що з'явиться необхідно обрати папку де знаходяться архіви зі знімками та натиснути кнопку «Відкрити». Вигляд меню та кнопка показані на рис. 4.5.

У вікні потрібно двічі клікнути на архіви, які потрібно завантажити.

Після завантаження всіх знімків потрібно перевірити їх метадані. Для цього потрібно в програмі SNAP відкрити abstracted metadata Розташування даного файлу показано на рис. 4.6.



**Рис. 4.5.** Вигляд меню завантаження даних



**Рис. 4.6.** Розташування файлу *Abstracted\_Metadata*

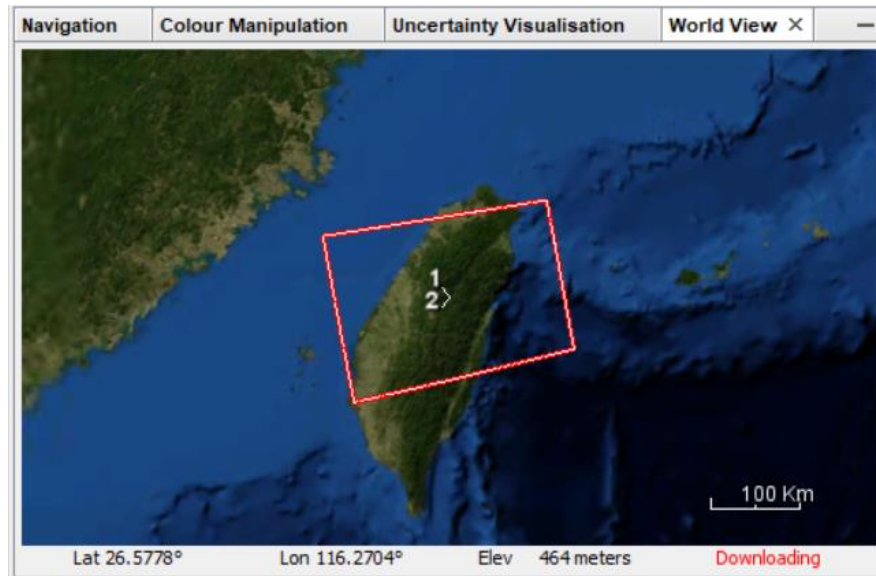
В даному файлі потрібно знайти рядки State\_vector\_time, state\_line time, last line time. У них повинна бути одна дата, оскільки якщо в першому рядку стоїть інша дата все такий знімок обробити не можна для одержання на виході інтерферометрії. Якщо ж дати в цих рядках не збігаються то потрібно шукати інші знімки, або спробувати видалити і знову їх завантажити. Іншого метода перевірки немає. Вигляд даного файлу показано на рис. 4.7.

PRODUCT	S1A_IW_SLC_1SDV_20201201T100118_202012	ascii		Product name
PRODUCT_TYPE	SLC	ascii		Product type
SPH_DESCRIPTOR	Sentinel-1 IW Level-1 SLC Product	ascii		Description
MISSION	SENTINEL-1A	ascii		Satellite mission
ACQUISITION_MODE	IW	ascii		Acquisition mode
antenna_pointing	right	ascii		Right or left facing
BEAMS	[ACQUISITION_MODE]	ascii		Beams used
SWATH	-	ascii		Swath name
PROC_TIME	01-DEC-2020 12:49:50.938096	uint32	utc	Processed time
Processing_system_identifier	ESA Sentinel-1 IPF 003.31	ascii		Processing system identifier
orbit_cycle	217	int32		Cycle
REL_ORBIT	69	int32		Track
ABS_ORBIT	35491	int32		Orbit
STATE_VECTOR_TIME	01-DEC-2020 10:00:17.690119	uint32	utc	Time of orbit state vector
VECTOR_SOURCE	-	ascii		State vector source
incidence_near	99999.0	float64	deg	
incidence_far	99999.0	float64	deg	
slice_num	2	int32		Slice number
data_take_id	271922	int32		Data take identifier
first_line_time	01-DEC-2020 10:01:18.228979	uint32	utc	First zero doppler azimuth time
last_line_time	01-DEC-2020 10:01:46.139322	uint32	utc	Last zero doppler azimuth time

**Рис. 4.7.** Вигляд файлу *abstracted\_metadata*.

Також варто перевірити чи правильно на поверхні Землі лежать завантажені знімки. Всі завантажені в програму дані можна переглянути на предмет розташування у вікні World View або World Map. Дане вікно

розташовується в лівому нижньому куті, щоб побачити розташування на базовій карті (рис. 4.8).



**Рис. 4.8.** Вигляд та розташування меню *World view*

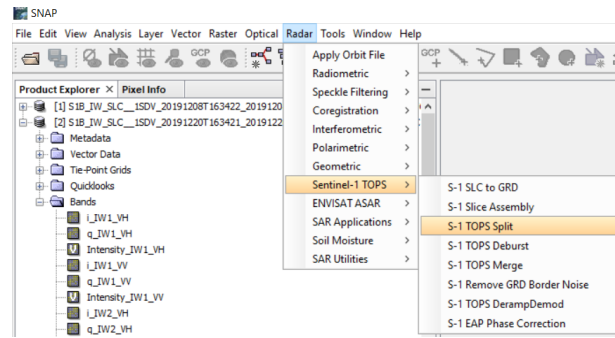
В даному меню чітко видно, що знімки повністю перекривають площу одне одного. Також внизу видно координати розташування маніпулятора «миша».

За допомогою координат можна знайти епіцентр Землетрусу і на основі цієї інформації отримати менш частину знімку.

Останнім підготовчим етапом є підготовка знімку до обробки. Потрібно залишити максимальну близьку площу до епіцентру землетрусу. Для цього потрібно вирізати частину знімка, тому що для виконання повної обробки знімків потрібен доволі потужний комп'ютер, або буде потрібен тривалий час для виконання всіх операції.

Дану операцію можна виконати за допомогою вбудованої функції TOPS Split S-1 TOPS Split. Це дасть можливість обробляти кожну підсмугу окремо, а потім за потреби, об'єднати.

За допомогою даного інструменту можна вирізати окремі спалахи (від 1 до 10) на кожній підсмугі, тобто обробляти зображення по точкам, для витрачання менших ресурсів комп'ютера. Розташування даного інструменту представлено на рис. 4.9.

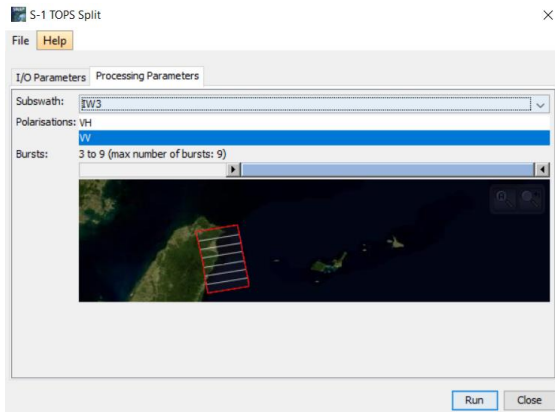


**Рис. 4.9.** Розташування функції Split

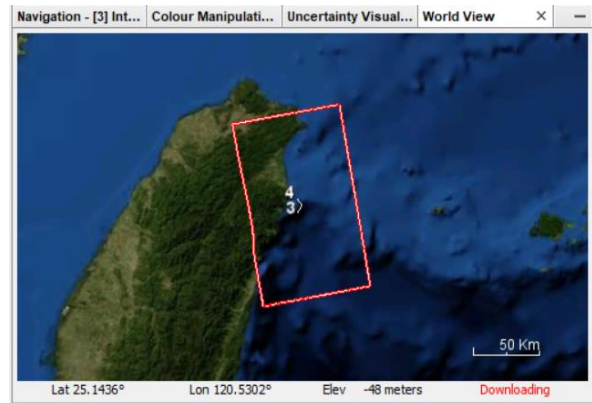
У меню, що з'явиться спочатку потрібно обрати потрібний знімок потім необхідну підсмугу. Для нашого випадку це IW3 (оскільки вона розташовано найближче до епіцентру землетрусу) і поляризацію VV у параметрах обробки. Також потрібно обрати кількість спалахів (bursts), які будуть залишені на знімку, для цього потрібно використовувати попередній перегляд, щоб перевірити розташування обраної області. Для того щоб підтвердити всі налаштування та їх застосувати, потрібно натиснути «Виконати» (Run). Також таку саму операцію потрібно повторити для іншого зображення. Відповідно потрібно вказати дуже схожу область для правильної побудови вихідного зображення. Вікно із вказаними налаштування показано на рис. 4.10.

Після успішного виконання операції, всі знімки, які були обрізані будуть відображені в меню завантажених продуктів, а також відобразяться на карті буде відображатись їх місце розташування, як це представлено на рис. 4.11.

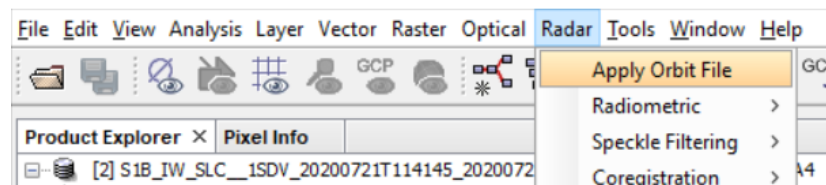
У даному вікні номер на карті співпадає з номером у вікні продуктів. Після виконання цієї операції потрібно ще раз переконавшись, в метаданих у файлі abstracted\_metadata. А саме в рядках State\_vector\_time, state\_line\_time, last\_line\_time, які повинні містити одну й ту саму дату. Далі потрібно додати дані про орбіту супутника (про положення супутника під час отримання SAR даних). Ці дані автоматично завантажуються для продуктів Sentinel-1 в SNAP і додаються до метаданих за допомогою оператора Apply Orbit File (в пункті меню Radar). Розташування даної функції представлено на рис. 4.12.



**Рис. 4.10.** Вікно функції Split з налаштуваннями, які були застосовані

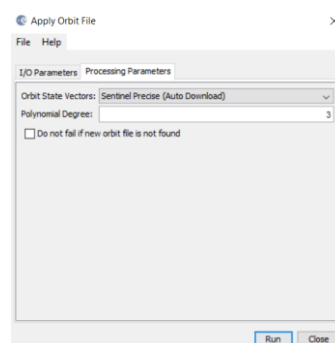


**Рис. 4.11.** Відображення частин знімків



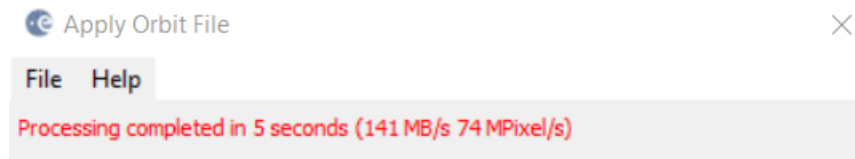
**Рис. 4.12.** Розташування функції Apply Orbit File

Цю операцію також потрібно виконати для обох частин знімків. Служба точного визначення орбіти (POD) для Sentinel-1 надає відновлені файли орбіти та точні файли орбітальних ефемерід (POE). Файли POE охоплюють приблизно 28 годин і містять вектори стану орбіти з інтервалами з інтервалом 10 секунд. Файли генеруються по одному файлу на день і доставляються протягом 20 днів після отримання даних придбання. Всі налаштування потрібно залишити за замовчуванням (Braun A., Veci L., 2021). Приклад даного вікна показано на рис. 4.13.



**Рис. 4.13.** Приклад вікна додавання орбітального файлу

У разі успішного виконання це буде прописано в цьому ж самому вікні, на рис. 4.14.

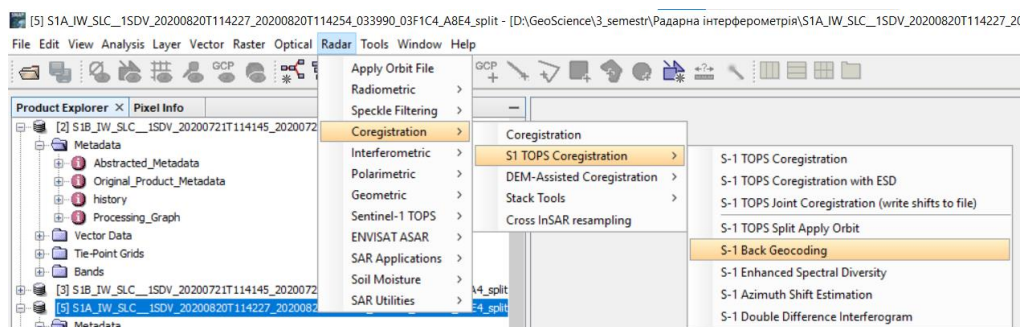


**Рис. 4.14.** Приклад успішного виконання операції

Загалом, успішне виконання будь-якої операції буде супроводжуватися подібними повідомленнями про час та швидкість її виконання.

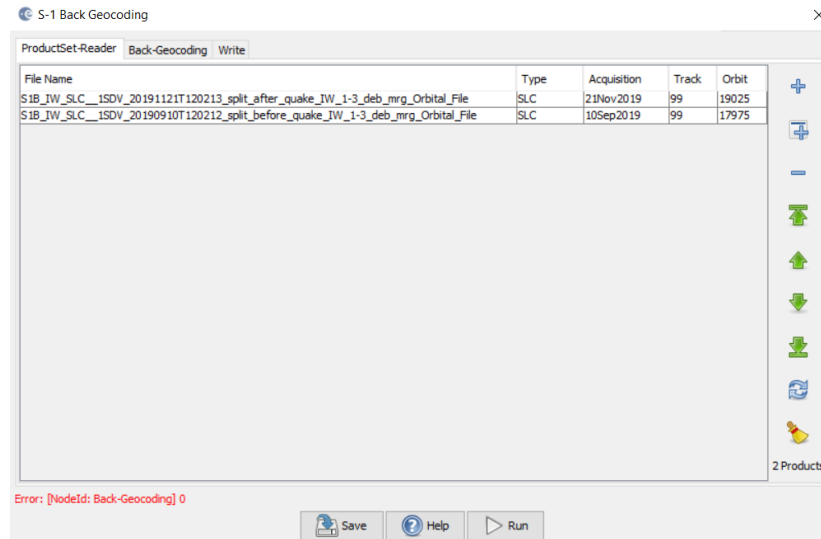
Оскільки Інтерферограма формується шляхом перехресного множення головного зображення з комплексним спряженим підпорядкованого. Амплітуда обох зображень перемножується, а фаза представляє різницю між фазами двох зображень. Відповідно потрібно виділити головне і підпорядковане зображення. Це можна зробити за допомогою функції Back Geocoding

Інтерфейс GeoCoding надає геопросторову інформацію про широту і довготу для заданої X/Y позиції будь-якого (двовимірною) растру. Розташування даної функції показано на рис. 4.15.



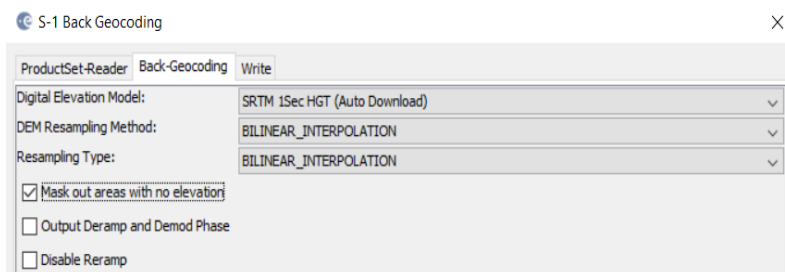
**Рис. 4.15.** Розташування функції Back Geocoding

У вікні, що з'явиться (рис. 4.16) потрібно обов'язково позначити головне зображення, яке було зафіксоване після події. У в нашому випадку, це був землетрус. Даний вибір потрібно виконати стрілочками, що знаходяться праворуч.



**Рис. 4.16.** Вікно Геокодування для додавання даних для обробки

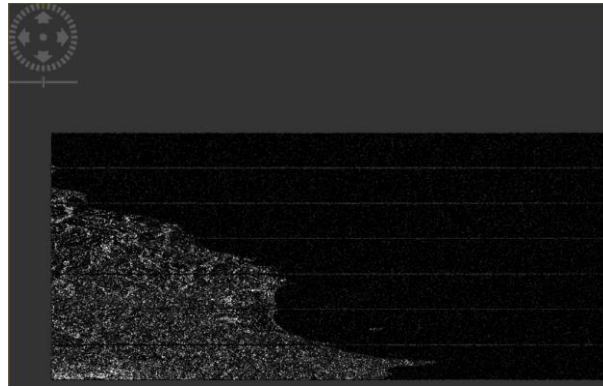
Потім у цьому ж вікні потрібно перейти до вкладки Back-Geocoding і в рядку Digital Elevation Model вибрати SRTM 1SEC HGT (AutoDownload). Потрібно мати на увазі, що SRTM доступний лише від 60° на північ і 54° на південь. Приклад заповнення даного вікна показано на рис. 4.17. Після заповнення цих двох вікон потрібно натиснути RUN.



**Рис. 4.17.** Заповнення вікна Back Geocoding у відповідній функції

В останньому вікні Write потрібно вказати назву вихідного файлу, та його розташування, дане вікно з'являється у багатьох операціях, тому описувати кожного разу його функціонал немає жодної потреби.

Після виконання даної функції отримуємо об'єднаний файл, який в своїх шарах містить обидва фрагменти знімків, одразу з підписами де головне, а де підпорядковане зображення. Приклад одного з них показано на рис. 4.18.



**Рис. 4.18.** Приклад отриманого результату після виконання Геокодування. Головне зображення для IW3

Коліщатком, що розташоване у лівому верхньому куті за потреби можна крутити зображення, переміщуючи його в різні сторони.

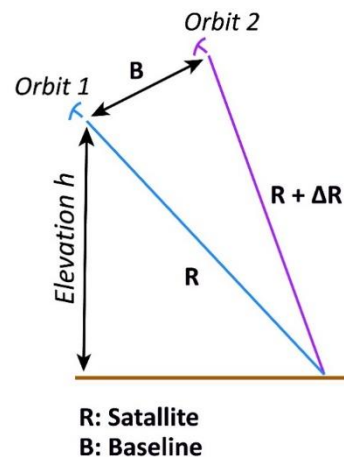
Інтерферометрична фаза кожного пікселя зображення SAR залежить лише від різниці шляхів від кожного з двох датчиків SAR до розглянутої комірки розрізненості (Braun A., Veci L., 2021).

Варіація інтерферометричної фази  $\Delta\phi$  пропорційна  $\Delta R$ , поділений на передану довжину хвилі  $\lambda$ . Це буде мати графічний вигляд, представлений на рис. 4.19 (Braun A., Veci L., 2021).

$$\varphi_1 = \frac{4\pi R}{\lambda}$$

$$\varphi_2 = \frac{4\pi(R + \Delta R)}{\lambda}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda}$$



**Рис.4.19.** Математичний вираз отримання зображення інтерферограми двох знімків (Braun A., Veci L., 2021).

Різниця фаз може мати внески від п'яти різних джерел:

–  $\Delta\varphi_{flat}$  називається фазою плоскої Землі, яка є фазовим внеском, обумовленим кривизною Землі;

- $\Delta\varphi_{\text{elevation}}$  – топографічний внесок до інтерферометричної фази;
- $\Delta\varphi_{\text{displacement}}$  – деформації поверхні в інтерферометричну фазу;
- $\Delta\varphi_{\text{atmosphere}}$  – внесок атмосфери в інтерферометричну фазу. Він вноситься за рахунок зміни атмосферної вологості, температури та тиску між двома зйомками.

- $\Delta\varphi_{\text{noise}}$  – фазовий шум, що вноситься часовою зміною розсіювачів, різним кутом зору та об'ємним розсіюванням (Braun A., Veci L., 2021).

Якщо їх об'єднати формулою та показати, як розрахувати кожен окремий чинник можна отримати наступне (рис. 4.20):

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{flat}} + \Delta\varphi_{\text{elevation}} + \Delta\varphi_{\text{displacement}} + \Delta\varphi_{\text{atmosphere}} + \Delta\varphi_{\text{noise}}$$

$$-\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n s}{R \tan \theta}$$

$$-\frac{\Delta q}{\sin \theta} \cdot \frac{B_n}{R_0} \cdot \frac{4\pi}{\lambda}$$

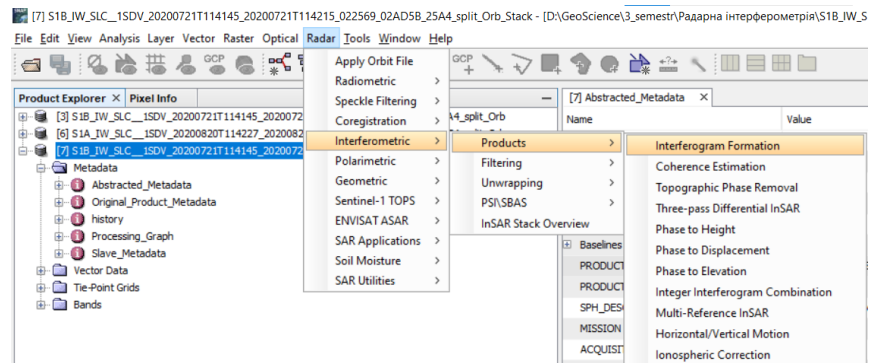
$$+\frac{4\pi}{\lambda} d$$

**Рис. 4.20.** Математичний вираз різниці фаз з поясненням кожного окремого чинника (Braun A., Veci L., 2021)

За допомогою інтерферометричної обробки можна усунути й інші джерела похибки, щоб залишити тільки той внесок, який цікавить дослідника.

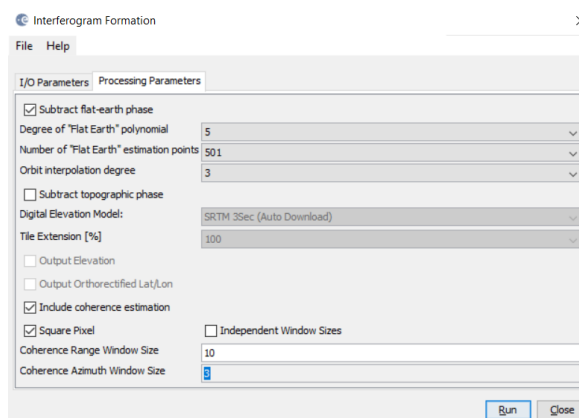
### 4.3. Створення інтерферограм

Для того, щоб отримати інтерферограму потрібно розрахувати  $\Delta\varphi$ , яке з складається з 5 складових. Почнемо з видалення фази плоскої Землі – це фаза, яка присутня в інтерферометричному сигналі через кривизну опорної поверхні. Вона оцінюється за допомогою орбітальної інформації та метаданих і віднімається з комплексної інтерферограми і обраховується за допомогою функції Interferometry formation. Розташування даної функції представлено на рис. 4.21.



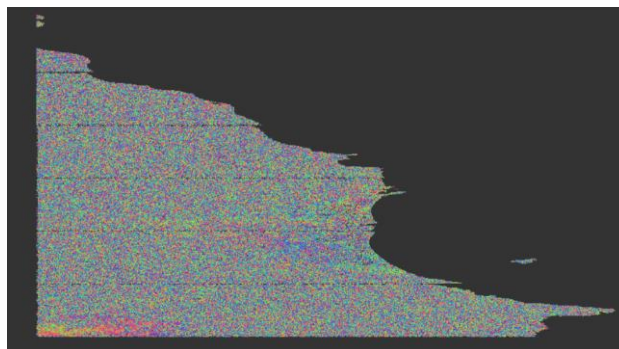
**Рис. 4.21.** Розташування функції інтерферограми.

Налаштування в даній функції потрібно залишити за замовчуванням, як це представлено на рис. 4.22.



**Рис. 4.22.** Вигляд вікна інтерферометричної формації

Отриманий продукт інтерферограми буде містити смугу для інтерферометричної фази. Якщо відкрити смугу інтерферометричної фази, можна побачити демаркаційну зону між двома спалахами. Приклад таких смуг показано на рис. 4.23.

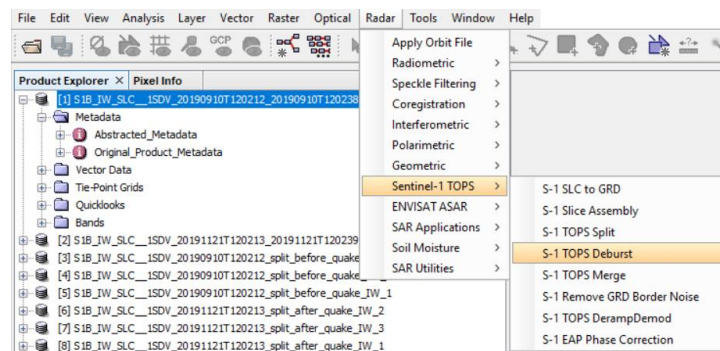


**Рис. 4.23.** Приклад смуг інтерферометричних фаз на знімку інтерферометрії

Інтерферометричні смуги представляють повний  $2\pi$  цикл. Смуги з'являються на інтерферограмі у вигляді циклів довільного кольору, кожен з яких відповідає половині довжини хвилі датчика. Відносне переміщення ґрунту між двома точками можна розрахувати, підрахувавши смуги і помноживши їх на половину довжини хвилі. Чим ближче смуги розташовані одна до одної, тим більше навантаження на ґрунт.

Рівнинна місцевість повинна давати серію рівномірно розташованих, паралельних смуг. Будь-яке відхилення від паралельного розташування смуг може бути інтерпретоване як топографічна варіація.

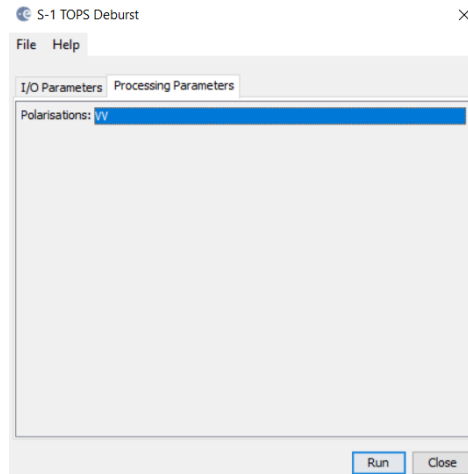
За загальним порядком прийнято і потрібно об'єднувати між собою сплески (bursts) і потім продовжувати обробку. Взагалі дану операцію можна віднести до застосування 5 фази видалення шуму. Для того, щоб це виконати потрібно зайти в наступне меню, так як це показано на рис. 4.24.



**Рис. 4.24.** Розташування меню *Deburst*

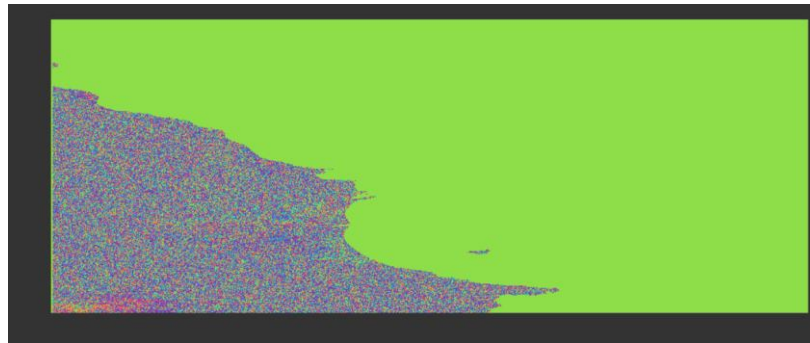
У вікні, що з'явиться необхідно вказати назву файлу, та його розташування потім перейти в друге вікно і активувати поляризацію VV, де знаходиться дана вкладка як це представлено на рис. 4.25. На вхід потрібно подати файл отриманий на попередньому кроці, тобто bursts, які є частиною однієї хвилі.

На вхід подається зображення зі смугами, які розмежовуються bursts між собою в межах одного прольоту.



**Рис. 4.25.** Приклад вікна *Deburst*

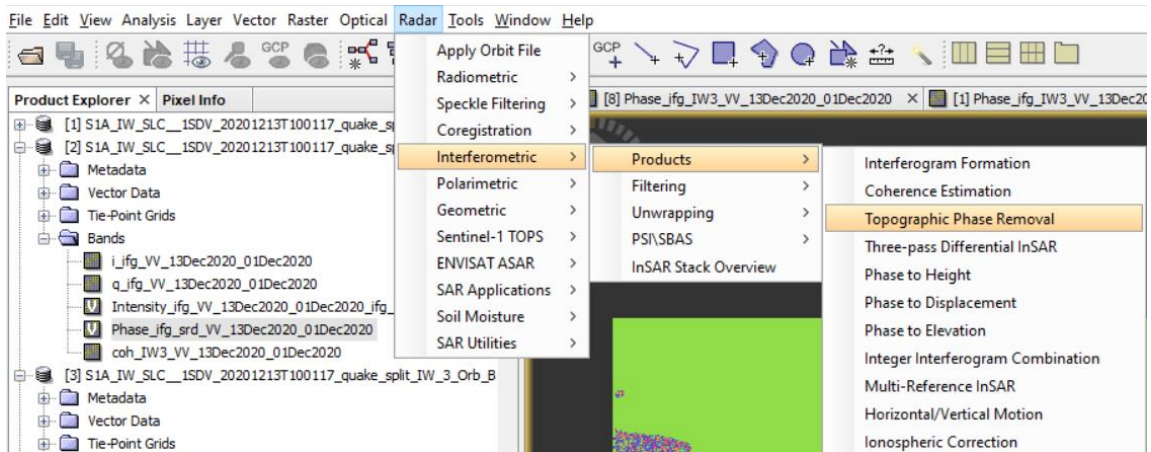
Дана операція об'єднує між собою burst сплески між собою і прибирає лінії між спалахами, що видно на вихідному зображенні рис. 4.26.



**Рис. 4.26.** Зображення інтерферометрії після об'єднання спалахів між собою

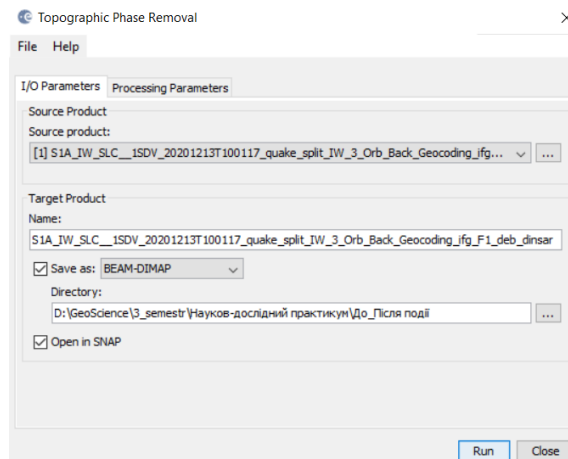
На даному знімку чомусь вода стала зеленою з невідомих причин. Через це варто зазначити, що не потрібно обирати землетруси, які були повністю в акваторії. За допомогою або програмного продукту SNAP, або взагалі за допомогою інтерферометрії не можливо буде побачити.

Наступним кроком йде видалення топографічної фази. Це відноситься до третьої фази змін і передбачає нівелювання зміни поверхні. Воно виконується за допомогою інструменту Topographic Phase Removal. Розташування даного меню показано на рис. 4.27.



**Рис. 4.27.** Розташування функції *Topographic Phase Removal*

В меню, що з'явиться (рис. 4.28) необхідно вказати назву вихідного файлу, або по замовчуванню до назви додається приставка `dinsar`. Розташування теж саме. В іншому вікні нічого змінювати не потрібно.



**Рис. 4.28.** Вигляд меню *Topographic Phase Removal*

Четвертою є різниця атмосфери в інтерферометричній фазі. Фахівці які працюють в даній галузі вважають, для мінімізації впливу атмосферних фазових збурень та помилок розгортання, серію зображень потрібно проаналізувати для отримання більш достовірного результату. Для цього були завантажені знімки з часовим інтервалом 12 діб. В даний момент часу це є дуже важким завданням. Оскільки не на всіх територіях відбувається зйомка з такою частотою. Також обробка серії знімків з 6 підпорядкованих знімків буде займати дуже багато часу та вимагає великої кількості пам'яті комп'ютера (кілька сотень гігабайт).

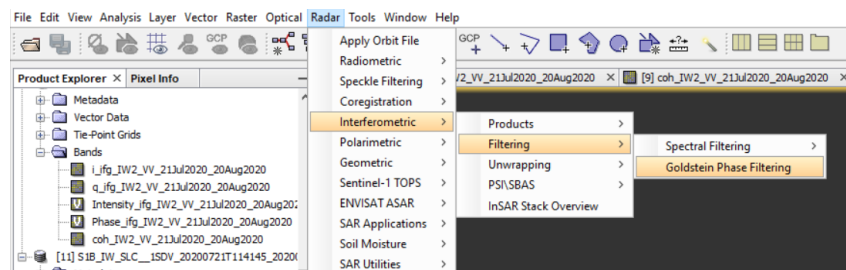
Для часткового нівелювання атмосферної складової були взяті знімки за рік до даного землетрусу.

Останнім кроком для покращення зображення можна зробити фазову фільтрацію. Інтерферометрична фаза може бути спотворена шумами від:

- часової декорреляції;
- геометричної декорреляції;
- об'ємного розсіювання;
- помилок обробки.

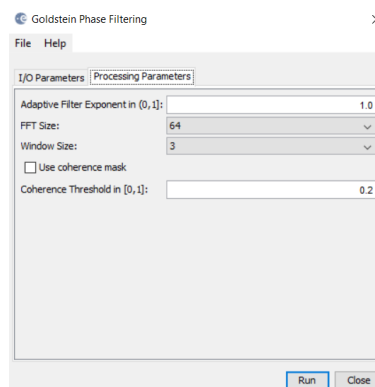
Там, де є втрата когерентності, втрачається інтерференційна картина. Щоб мати можливість правильно розгорнути фазу, відношення сигнал/шум потрібно збільшити фільтрації фази.

Для цього застосуємо Goldstein Phase Filtering. Розташування даної функції представлено на рис. 4. 29.



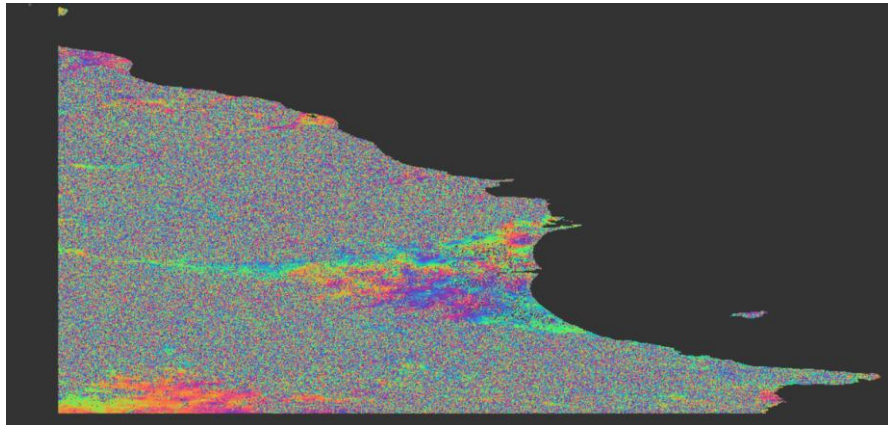
**Рис. 4.29.** Розташування функції Goldstein Phase Filtering

У вікні, що з'явиться ніяких додаткових налаштувань додавати не потрібно. Необхідно застосувати їх за замовчуванням. Вигляд даного вікна представлений на рис. 4.30.



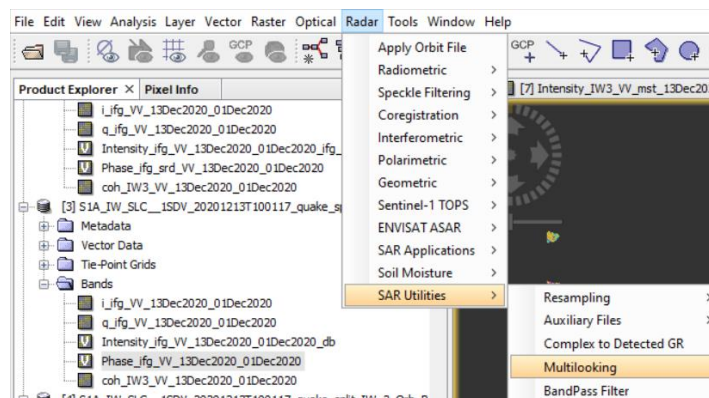
**Рис. 4.30.** Вікно налаштування параметру Goldstein Phase Filtering

Після застосування даного фільтру отримуємо результат, який представлений на рис.4.31.



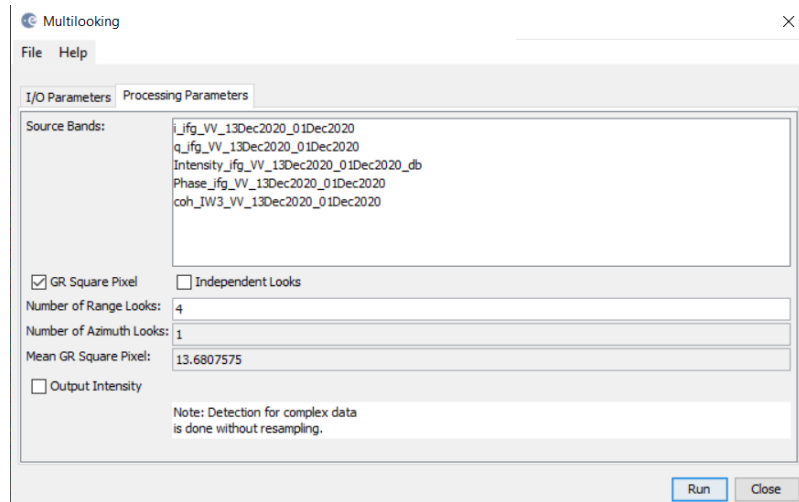
**Рис. 4.31.** Вигляд інтерферометрії після застосування фільтра

Для отримання більшого ефекту покращення зображення застосуємо ще кілька фільтрів. Зокрема багатоканальну фільтрацію, яка є поширеною технікою фільтрації, що використовується для підвищення співвідношення сигнал/шум отриманого зображення. Розташування даної функції представлено на рис. 4.32.



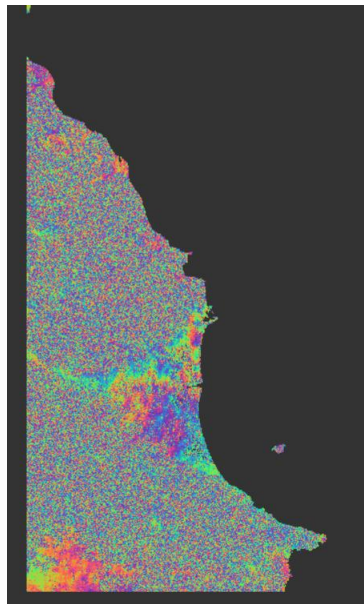
**Рис. 4.32.** Розташування функції *Multilooking*

У вікні, що з'явиться в першому вікні, як і в інших пишемо назву та розташування вихідного файлу. В меню процесу, обираємо той шар, який потрібно обробити, якщо всі то нічого не обираємо. Вигляд даного меню представлений на рис. 4.33.



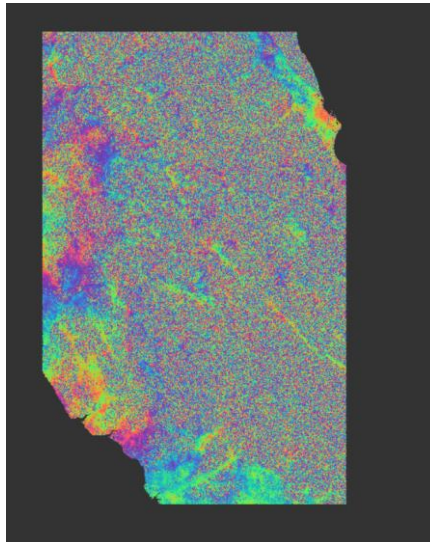
**Рис. 4.33.** Вигляд меню параметрів налаштування для багаканального покращення

Результат даного перетворення представлений на рис. 4.34.



**Рис. 4.34.** Вигляд вихідного зображення після застосування Multilooking. Дане зображення орієнтоване відповідно місцевості

Після цього таким самим чином була оброблена ще одна фаза знімку IW2. Після всіх стадій обробок маємо наступне зображення (рис. 4.35).



**Рис. 4.35.** Результат обробки прольоту IW2

Після обробки даної пари знімків були оброблені друга та третя фаза знімків за рік до даного землетрусу. Таким чином, можна вважати що була проведена корекція відносно атмосфери.

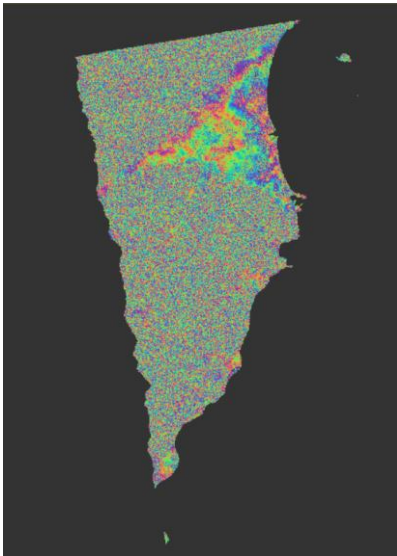
При об'єднанні двох знімків коли виконується команда Back-Geocoding потрібно обрати головне і підпорядковане зображення. Було прийняте рішення обрати головним той знімок, який був виконаний пізніше (рис. 4.36).

S-1 Back Geocoding

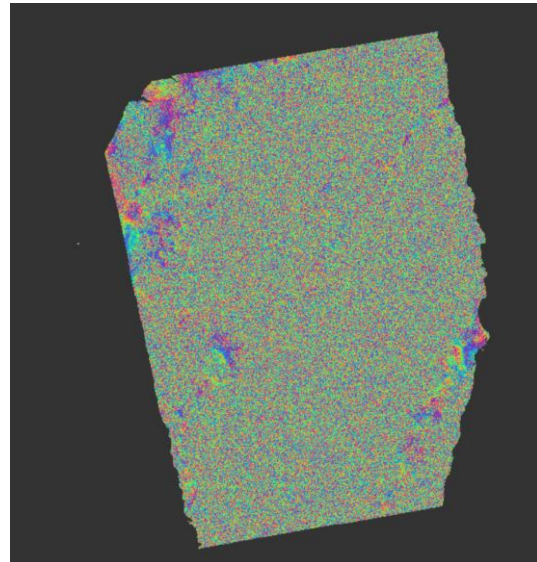
File Name	Type	Acquisition	Track	Orbit
S1B_IW_SLC__1SDV_20190827T100023_split_IW3_Orb	SLC	27Aug2019	69	17770
S1B_IW_SLC__1SDV_20190815T100023_split_IW3_Orb	SLC	15Aug2019	69	17595

**Рис. 4.36.** Зображення вибору головного і підлеглого зображення

Результати обробки для 3 фази (IW3) представлено на рис. 4.37, для 2 фази (IW2) на рис. 4.38.

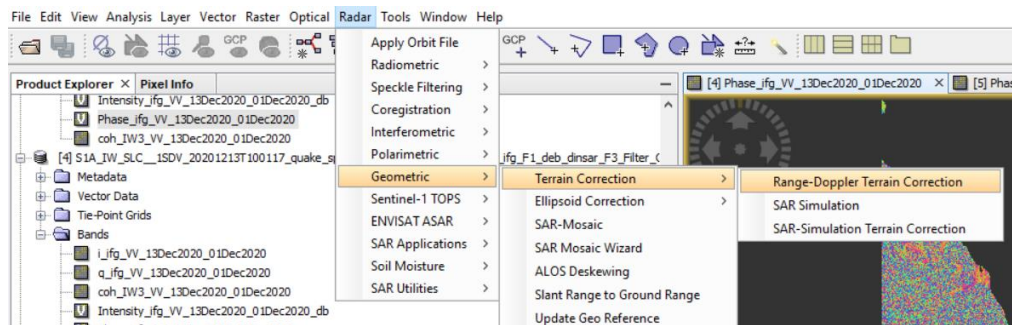


**Рис. 4.37.** Результат обробки третьої фази знімку за рік до землетрусу



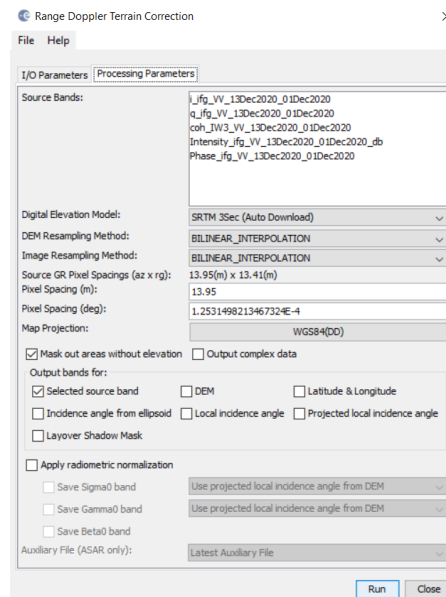
**Рис. 4.38.** Результат обробки другої фази за рік до землетрусу

Для того, щоб інтерферограма була корисною її необхідно спроектувати на географічну систему координат, використовуючи еталонну ЦМР. Цей крок слід робити тільки після того, як всі обробки на зображенні завершені і зображення готове до експорту. Розташування даного інструменту представлено на рис. 4.39.



**Рис. 4.39.** Розташування меню проектування на систему координат

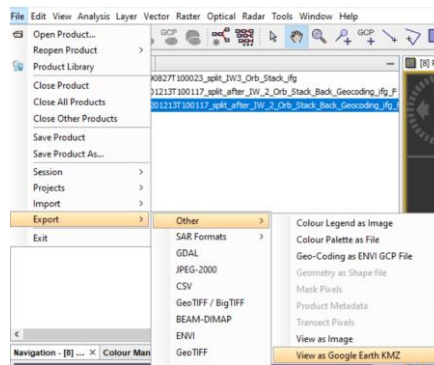
У вікні, що з'явиться можна окремо виділити певні шари. Якщо всі шари були підготовлені до експорту, то нічого не потрібно обирати. Вигляд даного меню показано на рис. 4.40.



**Рис. 4.40.** Вигляд меню підготовки координат знімків для експорту

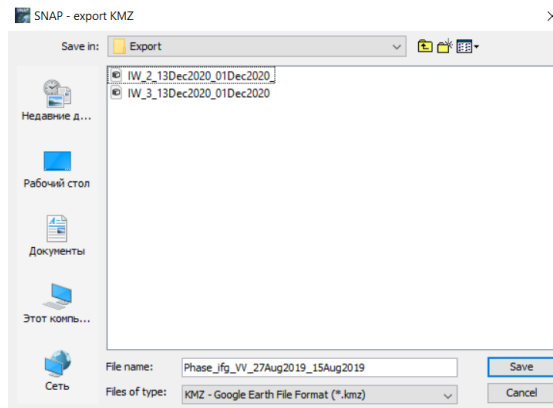
#### 4.4. Експортування знімків

Після додавання координат можна перейти до експортування знімків. За потреби можна обрати різні формати. Було обрано .KMZ його легко можна запустити в Google Earth Pro або QGIS. Розташування меню експорту та вибору вихідного файлу показано на рис. 4.41.



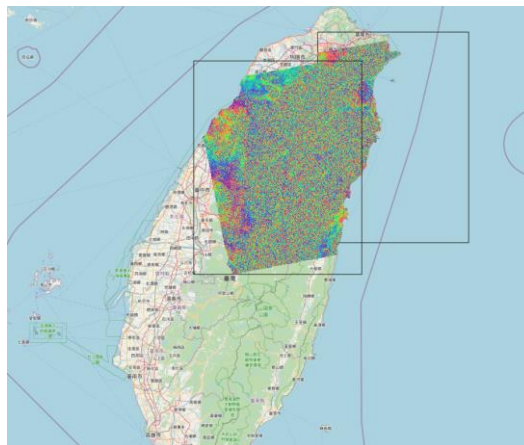
**Рис. 4.41.** Розташування меню експортування та вибору вихідного файлу

У вікні, що з'явиться потрібно обрати назву файлу та його розташування. Вигляд даного меню показано на рис. 4.42. Після експортування дані файли можна імпортувати в інші програми, зокрема в QGIS. Було додано шар з картами OpenStreetMap (OSM) і накладені отримані результати обробки, а саме два знімки із землетрусом, та за рік до нього.



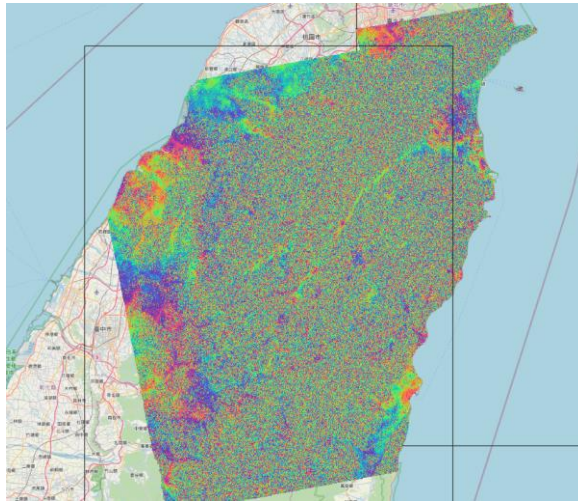
**Рис. 4.42.** Меню експортування файла

Оскільки вони не об'єднані фазами знімків IW2, IW3 то їх потрібно додавати окремо. Отже, були згенеровані інтерферометричні карти, які були накладені на онлайн мапи. Приклад такої карти, яка повністю охоплює острів Тайвань представлено на рис. 4.43.



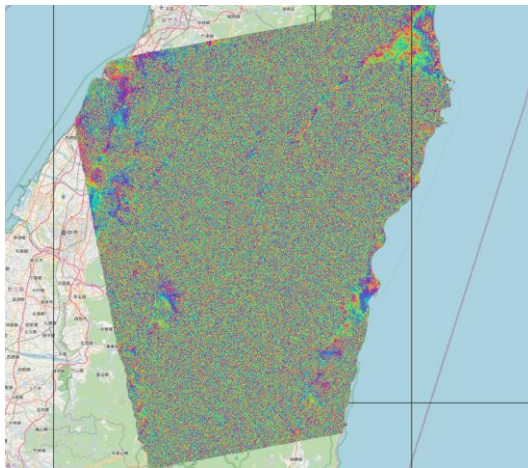
**Рис. 4.43.** Зображення інтерферометричної карти накладеної на о.Тайвань.  
Знімок охоплює зону землетрусу

Як видно з карти вона суттєво спотворена. Це пов'язано з тим, що сама карта є дрібномасштабною, якщо зробити її ще більш дрібномасштабною якість покращиться (рис. 4.44). Як видно з даної карти, за допомогою інтерферограми можна розрізнити землетрус, та місця, де він завдав найбільше руйнувань (мвста). Між містами знаходяться лісовий масив через який дуже важко проводити зйомку радарями IW. Тому руйнування видні тільки вздовж доріг.



**Рис. 4.44.** *Зображення дрібнішої версії карти інтерферометрії для о.Тайвань*

Також таку саму карту було виконано для порівняльного аналізу на основі знімків, що були одержані за рік до землетрусу (рис. 4.45).



**Рис. 4.45.** *Дрібномасштабна карта інтерферометрії о.Тайвань на основі знімків за рік до землетрусу*

Отримані карти можна між собою порівняти та переконатися в тому, що за допомогою інтерферометрії можна оцінити наслідки землетрусу. Але його прогнозування за рік є мало ймовірною подією. Оскільки ті сплески які є на другій карті можна пов'язати з тим, що там розташовуються міста і вони самі по собі можуть змінюватися та видавати незначні шуми, які фіксують радарні датчики.

## ВИСНОВКИ

Будь який прогноз не забезпечує 100% гарантію того, що він дійсно відбудеться. Незважаючи на це, будь-який прогноз надзвичайної ситуації взагалі, а землетрусу зокрема є вкрай важливим, оскільки в разі дійсно виникнення цієї події буде значно легше скоординувати зусилля всіх служб які повинні завадити загибелі людей та руйнування техногенних об'єктів.

Прогнозування в більшості випадків є основою попередження надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру, в основі якого прогнозується хід розвитку обстановки, ефективність тих чи інших намічених заходів з ліквідації природного лиха, необхідний склад сил і засобів. Найбільш важливим з усіх цих прогнозів є прогноз ймовірності виникнення цієї надзвичайної події.

Для підвищення оперативності і якості моніторингу землетрусів необхідно розвивати системи ДЗЗ, які дозволяють реєструвати провісники землетрусів різної природи. Так для ефективного відстежування хмарних сейсмотектонічних індикаторів потрібні дані космічного знімання з періодичністю не менше 15-30 хвилин, з охопленням території не менше чим 2000 x 2000 км і просторовим розрізненням близько 0,5-1 км.

Застосування технологій ГІС та ДЗЗ дозволяє здійснювати оцінку як можливих, так і реальних наслідків землетрусів для своєчасного попередження місцевих органів влади, різних служб населення. Це дозволить істотно зменшити втрати чисельності населення, екологічний і економічний збиток. Для цього а БД ГІС забезпечити збір картографічних джерел про екологічно небезпечні об'єкти, такі як АЕС, хімічні виробництва тощо; про об'єкти транспортної інфраструктури: аеропорти, залізничну і автомобільну мережу тощо; актуальні дані про населені пункти і чисельність населення в них.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Безпека життєдіяльності та основи охорони праці: навч. посіб. / Д.В. Зеркалов - Київ.: ТОВ «Основа», 2016. с.268*
- Берлянт А.М. Теория геоизображений. – М.: ГЕОС, 2006. – 262 с*
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. II. Четыре региона Малой Азии и Юго-Восточной Европы // Вычислительная сейсмология. 1974. Вып. 7. С. 3–40.*
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. I. Памир и Тянь-Шань // Вычислительная сейсмология. 1973. Вып. 6. С. 107–133.*
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И. Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) // Вычислительная сейсмология. 1976. Вып. 9. С. 3–91.*
- Геофизика на рубеже веков. М.: ОИФЗ РАН, 1999. - 330 с*
- Гохберг М.Б. [Геофизика на рубеже веков: Избранные труды ученых ОИФЗ РАН](#), издательство ОИФЗ РАН Москва, с. 163-169.*
- ДБН В. 1.1-12:2006. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво в сейсмічних районах України. – К.: Мінрегіонбуд України, «Укрархбудінформ». - 2006. – 84 с.*
- ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України. – К.: Мінрегіонбуд України, «Укрархбудінформ». – 2014. – 110 с.*
- ДСТУ Б В.1.1-28:2010 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності*
- Дода Л.Н., Натяганов В.Л., Тихонкова Ю.А. Облачные сейсмоиндуцированные структуры как следствие протонного электротеплового пробоя литосферы // Современные проблемы аэрогидродинамики. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2007. С. 43–44*

*Електронний ресурс.* Режим доступу: <https://sites.google.com/site/fireoverdose/organizacia-avarijno---ratuvalnih-robot/zemletrusi-pricini-viniknennaharakteristiki-vrazauci-faktori-naslidki-najbilsi-zemletrusi-v-istoriie-ludstva>.

*Кендзера А.В.* Моделирование расчетных акселерограмм вранчевских землетрясений для промышленной площадки ЧАЭС // Проблемы Чернобыльской зоны відчуження. – К.: «Наукова думка». – 1996. – Вип.3.– С.29-38.

*Кендзера О.В.* Сейсмічна небезпека і сейсмічний захист в Україні // Український географічний журнал – 2015, № 3 С. 9-15.

*Кендзера О.В.* Про стан та перспективи розвитку сейсмічних досліджень для захисту від землетрусів. Стенограма наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 17 лютого 2016 року. // *Вісн. НАН України, 2016, № 4 С. 40-46*

*Моргунов В.А.* Реальности прогноза землетрясений // Физика Земли. 1999. № 1. С. 79–91.

*Національний атлас України / Під ред. Л.Г. Руденка – К.: ДНВП «Картографія». – 2007. – 640 с*

*Новодарьевское землетрясение 11 мая 2004 г. с Mw=3,8, Io=5-6 (Украина) / И.П. Габсатарова, А.В. Кендзера, В.А. Свидлова, Р.С. Пронишин, Е.И. Поречнова, З.Н. Сычкина, Е.А. Бабкова, Р.С. Михайлова // Землетрясения Северной Евразии 2004 г. – Обнинск: ГС РАН. – 2010. – С.289-296.*

*Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР (с древнейших времен по 1975 г.) / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. – М.: Наука, 1977. – 535 с.*

*О возможности использования эмпирических передаточных функций среды при микрорайонировании территорий со сложным геологическим строением / А.В. Кендзера, А.М. Скляр, А.А. Роман, Е.С. Исичко, И.И. Илиеш, Г.Р. Стародуб, В.С. Князева // Оценка эффекта сильных землетрясений. – М.: Наука. – 1989. – С.82-89. (Вопросы инженерной сейсмологии. – Вып.30).*

*Осипов В.И.* Природные катастрофы на рубеже XXI века // Вестник РАН. 2001. Т. 71, № 4. С. 291–302.

*Осипов В.И.* Оценка и прогнозирование рисков природных катастроф на территории России // докл. на заседании Президиума РАН 17 февр. 2004 г. [Электронный ресурс URL: [http://www.geoenv.ru/science/osipov\\_paper/osipov\\_paper-rus.htm](http://www.geoenv.ru/science/osipov_paper/osipov_paper-rus.htm) (дата обращения: 05.11.2022)].

*О некоторых аспектах сейсмического районирования слабоактивных территорий / А.В. Кендзера, Г.Р. Стародуб, А.М. Скляр, А.А. Роман // Изучение сейсмических колебаний грунтов и сооружений. – М.: Изд-во МГК при Презид. АН СССР. – 1989. – С.76-82. («Сейсмические исследования», №11).*

*Попович В.В., Ермолаев В.И., Леонтьев Ю.Б., Смирнова О.В.* Моделирование гидроакустических полей на основе интеллектуальной геоинформационной системы // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 4. С. 37–44.

*Практичні питання динаміки будівель / Ю.І. Немчинов, О.К. Хавкін, М.Г. Мар'єнков, Л.О. Жарко, В.А. Дунін, К.М. Бабік, К.В. Єгупов, О.В. Кендзера, В.К. Єгупов, А.Ф.Булат, В.І. Дирда, М.І. Лисиця // Науково-виробничий журнал «Будівництво України». – 2013. – №6. – С.6-21*

*Про особливості прогнозу землетрусів в районах з підвищеним сейсмічним ризиком// Бицань Є.М. Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: актуальні питання (01 - 02 жовтня 2019 р.) Колективна монографія за матеріалами XVIII Міжнародної науково-практичної конференції*

*Саваринський Є.Ф., Кирнос Д.П.* Елементи сейсмології і сейсмометрії / / Держ. тех.-теор. Издат, М.: 1955, 543 с.

*Савиных В.П., Цветков В.Я.* Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования. М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 2001. – 222 с.

Смирнова О. В. Геоинформационные технологии для прогнозирования природных катастроф, Тр. СПИИРАН, 2010, выпуск 14, 216–227

*Соболев Г.А.* Проблема прогноза землетрясений // Природа. 1989. № 12. С. 47–55.

*Степанов И.В.* Геоинформационное обеспечение мониторинга землетрясений с использованием материалов дистанционного зондирования Земли. /Автореферат диссертации на соискание уч. степени канд. геогр. наук . М.: 2011, - 26с

*Четыркин Е. М.* Финансовые риски. М.: Дело, 2008. - 176 с.

*Широков В.А.* Опыт краткосрочного прогноза времени, места и силы камчатских землетрясений 1996–2000 гг. с магнитудой  $M = 6–7.8$  по комплексу сейсмологических данных // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / Отв. ред. Б.В. Иванов. Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 95–116.

*Широков В.А., Серафимова Ю.К.* О связи 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северозападной части Тихоокеанского тектонического пояса // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2, вып. 8. С. 120–133.

*Alvan, H. V., & Azad, F. H.* (2011). Satellite remote sensing in earthquake prediction. A review. 2011 National Postgraduate Conference. doi:10.1109/natpc.2011.6136371

*Hong S.J., Imamura F.* Study on the accuracy of the tsunami numerical model around obstacles. Proceeding of the APAC. 2004. P. 18–20.

<https://www.unian.ua/health/country/362288-tvarini-peredbachayut-zemletrusi.html>

<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/4042/WPS4823.pdf>

<https://www.unian.ua/health/country/362288-tvarini-peredbachayut-zemletrusi.html>

<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/4042/WPS4823.pdf>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake>

<http://dspace.pnpu.edu.ua/bitstream/123456789/14874/1/80.pdf>

[https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/How\\_does\\_interferometry\\_work](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/How_does_interferometry_work)

<https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>

<https://sites.google.com/site/fireoverdose/organizacia-avarijno---ratuvalnih-robot/zemletrusi-pricini-viniknenna-harakteristiki-vrazauci-faktori-naslidki-najbilsizemletrusi-v-istoriie-ludstva>

[https://uk.upwiki.one/wiki/Earthquake\\_prediction#CITEREFVarotsosLazaridou1991](https://uk.upwiki.one/wiki/Earthquake_prediction#CITEREFVarotsosLazaridou1991)

*Geller, R. J. (1997). Earthquake prediction: a critical review. Geophysical Journal International, 131(3), 425–450. doi:10.1111/j.1365-246x.1997.tb06588.x*

*Guide No. SSG-9. Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations. – Vienna: IAEA. - 2010. – 62 p.*

*Impact of crustal deformation detection by the DSI (difference of split-band interferograms) method with PALSAR-2 data: a case study on the 2016 Kumamoto Earthquake. Taku Ozawa, Yuji Himematsu. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01635-0>*

*Kagan Y.Y. Universality of the seismic moment-frequency relation // Pure and Appl. Geoph. - Vol.155. – 1999. – P. 537-573.*

*Koshimura S., Imamura F., Shuto N. Propagation of obliquely incident tsunamis on a slope. Part I: Amplification of tsunamis on a continental slope // Coastal Engineering J. 1999. Vol. 41, N 2. P. 151–164.*

*Li, X.; Wang, X.; Chen, Y. InSAR Atmospheric Delay Correction Model Integrated from Multi-Source Data Based on VCE. Remote Sens. 2022, 14, 4329. <https://doi.org/10.3390/rs14174329>*

*Lin P., Liu P. L.-F.* A numerical study of breaking waves in the surf zone // *J. of Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 359. P. 239–264.

*Liu P. L.-F.* Tsunami Simulations and Numerical Models // *The Bridge*. 2005. Vol. 35, N. 2. P. 14–21.

*Mofjeld H.O., Venturato A.J., González F.I., Titov V.V., Newman J.C.* The Harmonic Constant Datum Method: Options For Overcoming Datum Discontinuities at Mixed-Diurnal Tidal Transitions // *J. of Atmospheric and Oceanic Techn.* 2004. Vol. 21. Issue 1. P. 95–104.

*Moro, M., Saroli, M., Stramondo, S., Bignami, C., Albano, M., Falcucci, E., ... Wegmüller, U.* (2017). New insights into earthquake precursors from InSAR. *Scientific Reports*, 7(1). doi:10.1038/s41598-017-12058-3

*Ohsaki Y.* On the significance of phase content in earthquake ground motions // *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. – 1979. –V.7.– P.427-439.-13].

Orellana, F.; Hormazábal, J.; Montalva, G.; Moreno, M. Measuring Coastal Subsidence after Recent Earthquakes in Chile Central Using SAR Interferometry and GNSS Data. *Remote Sens.* 2022, 14, 1611. <https://doi.org/10.3390/rs14071611>

*Possibility of an earthquake prediction based on monitoring crustal deformation anomalies and thermal anomalies at the epicenter of earthquakes with oblique thrust faulting Zahra Alizadeh Zakaria Farshid Farnood Ahmadi*  
<https://sci-hub.se/downloads/2019-12-07/7f/10.1007@s11600-019-00390-3.pdf#page=4&zoom=100,406,170>

*Venturato A.J.* A Digital Elevation Model For Seaside, Oregon: Procedures, Data Sources, and Analyses // *NOAA Technical Memorandum OAR PMEL–129*. 2004. 17 p.

*Wright, T. J.* (2002). Remote monitoring of the earthquake cycle using satellite radar interferometry. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1801), 2873–2888. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1094>