

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту
(повна назва)Кафедра Інформатики
(повна назва)Рівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 122 Комп'ютерні науки
(код і повна назва)Тип програми освітньо-професійнаОсвітня програма Інформатика
(повна назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУстудентові Жиліну Михайлу Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)1. Тема роботи Дослідження симуляційних моделей землетрусів на основі зареєстрованих даних

затверджена наказом по університету від 25 листопада 2024 року № 1246Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 23 грудня 2024 р.3. Вихідні дані до роботи математичні моделі землетрусів, статистичні данні, перелік використовуваних програмних засобів: теоретичні відомості про методи створення симуляційних моделей землетрусів.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1. Огляд методів моделювання землетрусів.

2. Математична модель геологічного моделювання землетрусів.

3. Математична модель ймовірнісного моделювання землетрусів.

4. Огляд програмного забезпечення.

5. Обґрунтування вибору підходів для реалізації.

6. Програмна реалізація.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) актуальність проблеми моделювання землетрусів, постановка задачі, тестові зображення.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу	25.11.2024	
2	Аналіз завдання, підбір літератури	26.11.24-29.11.24	
3	Аналіз літератури з досліджуваної проблеми	30.11.24-03.12.24	
4	Аналіз технічних засобів	04.12.24-07.12.24	
5	Розробка моделей	08.12.24-10.12.24	
6	Програмна реалізація	11.12.24-16.12.24	
7	Оформлення пояснювальної записки	17.12.24-19.12.24	
8	Перевірка на плагіат	22.12.2024	
9	Рецензування	23.12.2024	
10	Підготовка презентації та доповіді	24.12.2024	
11	Занесення роботи в електронний архів	06.01.2025	
12	Попередній захист кваліфікаційної роботи	07.01.2025	

Дата видачі завдання 25 листопада 2024 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

_____ доц. Руденко Д.О.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ/ABSTRACT

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 77 с., 15 формул, 9 рис., 63 джерела.

СИМУЛЯЦІЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, СЕЙСМОЛОГІЯ, ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ, АНАЛІЗ РИЗИКУ, СЕЙСМІЧНА НЕБЕЗПЕКА.

Об'єктом дослідження є процеси виникнення та розвитку землетрусів та їх моделювання з використанням математичних і чисельних методів.

Метою дослідження є розробка та впровадження методів математичного моделювання землетрусів, що дозволяють прогнозувати сейсмічну активність та оцінювати сейсмічні ризики в різних регіонах.

У роботі використано методи чисельного моделювання, аналітичного обґрунтування та обробки сейсмічних даних. Проведено дослідження існуючих математичних моделей землетрусів, зокрема моделей розломів та поширення сейсмічних хвиль. Виконано моделювання землетрусів різних масштабів і проведено аналіз отриманих результатів з точки зору прогнозування сейсмічної небезпеки.

У результаті дослідження створено програмне забезпечення для симуляції землетрусів, яке дозволяє ефективно прогнозувати сейсмічну активність та сприяти розробці заходів щодо зниження сейсмічних ризиків.

SIMULATION OF EARTHQUAKES, MATHEMATICAL MODELING, SEISMOLOGY, NUMERICAL METHODS, RISK ANALYSIS, SEISMIC HAZARD.

The object of the research is the processes of occurrence and development of earthquakes and their modeling using mathematical and numerical methods.

The aim of the research is to develop and implement methods of mathematical modeling of earthquakes that allow forecasting seismic activity and assessing seismic risks in various regions.

Numerical modeling methods, analytical reasoning, and seismic data processing were used in the work. Research of existing mathematical models of earthquakes was conducted, including fault models and seismic wave propagation. Simulations of earthquakes of various scales were performed, and the obtained results were analyzed in terms of seismic hazard forecasting.

As a result of the research, software for earthquake simulation was created, which allows effective forecasting of seismic activity and contributes to the development of measures to reduce seismic risks.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1 Моделювання землетрусів і історія розвитку	11
1.1 Природа та механізми виникнення землетрусів.....	11
1.2 Способи дослідження землетрусів.....	13
1.2.1 Сейсмографія та сейсмічні мережі.....	13
1.2.2 Геодезичні методи у вивченні землетрусів: GPS та InSAR..	18
1.2.3 Комп'ютерне моделювання з використанням чисельних методів у вивченні землетрусів	20
1.3 Еволюція математичних моделей землетрусів	23
1.4 Проблематика моделювання землетрусів	26
1.5 Розвиток комп'ютерного моделювання	28
1.6 Постановка задачі дослідження.....	29
2 Математичні моделі симуляції землетрусів.....	31
2.1 Модель пружного середовища	31
2.2 Чисельні методи моделювання землетрусів	35
2.3 Моделювання поширення сейсмічних хвиль.....	37
2.4 Моделювання поширення сейсмічних хвиль.....	38
2.5 Альтерування параметрів моделювання землетрусів та їхній вплив на результати симуляцій.....	39
2.6 Ймовірнісна модель землетрусу.....	44
2.7 Кінцева формула для розрахунку сили землетрусу та ймовірності його виникнення.....	49
3 Дослідження комп'ютерної моделі фільтрації зображень.....	50
3.1 Обґрунтування вибору середовища програмної реалізації	50
3.2 Програмна реалізація.....	60
3.2.1 Побудова архітектури проєкту	60
3.2.2 Логіка процесів застосунку	62
3.3 Інструкція користувача	68

	6
Висновки	70
Перелік джерел посилання	72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Модуль зсуву – параметр, що характеризує жорсткість матеріалу при зсуві

Перший параметр Ламе – пружний параметр матеріалу

Зсувне напруження – напруження, що діє паралельно площині розриву

Нормальне напруження – напруження, що діє перпендикулярно до площини розриву

Тензор напружень – математичне представлення напружень у точці матеріалу

Тензор деформацій – математичне представлення деформацій у точці матеріалу

P-хвилі – первинні (поздовжні) сейсмічні хвилі

S-хвилі – вторинні (поперечні) сейсмічні хвилі

Сейсмічний ризик – ймовірність виникнення руйнівних наслідків землетрусу в певному регіоні

Сейсмічна небезпека – потенціал сейсмічної активності в регіоні

Сейсмограма – запис коливань земної поверхні в часі, отриманий за допомогою сейсмографа

Епіцентр – точка на поверхні Землі, розташована безпосередньо над гіпоцентром землетрусу

Гіпоцентр – фокус землетрусу, точка в надрах Землі, де починається розрив і вивільняється енергія

Афтершоки – серія менших землетрусів, що слідують за основним землетрусом

Тектонічна плита – великий жорсткий сегмент земної літосфери, що рухається відносно інших плит

Розлом – тріщина або зона слабкості в земній корі, по якій може відбуватися рух порід

Сейсмічна хвиля – пружна хвиля, що поширюється через Землю після землетрусу

Чисельне моделювання – метод розв’язання математичних моделей за допомогою обчислювальних алгоритмів

Геодезичні вимірювання – методи вимірювання змін форми та розмірів Землі для моніторингу деформацій земної кори

GPS – Global Positioning System (глобальна система позиціонування)

DEM – Digital Elevation Model (цифрова модель рельєфу)

GIS – Geographic information system (геоінформаційна система)

SAR – Synthetic Aperture Radar (радіолокація з синтетичною апертурою)

USGS – United States Geological Survey (Геологічна служба США)

ВСТУП

Землетруси належать до найбільш руйнівних природних явищ, що спричиняють значні людські жертви та матеріальні збитки в усьому світі. Розуміння механізмів виникнення землетрусів та їх прогнозування є критично важливим для зменшення їхніх негативних наслідків. Одним із ключових інструментів у вивченні сейсмічних процесів є симуляція землетрусів, яка дозволяє моделювати складні фізичні процеси, що відбуваються в земній корі, та прогнозувати поведінку сейсмічних хвиль.

Симуляція землетрусів включає математичне моделювання та чисельне розв'язання рівнянь, що описують механіку розломів, поширення сейсмічних хвиль та взаємодію з геологічними структурами. Це дозволяє дослідникам відтворювати різні сценарії землетрусів, аналізувати вплив геологічних і геофізичних параметрів на сейсмічну активність, а також оцінювати ефективність сейсмостійких конструкцій та інженерних заходів.

Дослідження в галузі симуляції землетрусів сприяють:

- покращенню систем раннього попередження про землетруси, що може врятувати життя та зменшити збитки;
- розробці сейсмостійких конструкцій та інженерних рішень, адаптованих до специфічних сейсмічних умов;
- глибшому розумінню сейсмічних процесів, що відбуваються в земній корі, та взаємодії між тектонічними плитами;
- оцінці сейсмічних ризиків для планування міської забудови та розробки заходів цивільного захисту.

Актуальність дослідження полягає в необхідності підвищення точності та достовірності прогнозів сейсмічної небезпеки. З розвитком обчислювальних технологій з'являються нові можливості для високоточних симуляцій, що враховують неоднорідність земної кори, складну геометрію розломів та нелінійні властивості матеріалів. Це особливо важливо в

контексті зростання урбанізації та інфраструктурного розвитку в сейсмонебезпечних регіонах.

Таким чином, симуляція землетрусів є невід'ємною складовою сучасної сейсмології та інженерної сейсмології, яка поєднує в собі фізичні, математичні та інженерні аспекти для підвищення безпеки та стійкості суспільства до природних катастроф.

1 МОДЕЛЮВАННЯ ЗЕМЛЕТРУСІВ І ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ

Землетруси є одними з найнебезпечніших природних катастроф, здатних спричинити масштабні руйнування, людські жертви та значні економічні втрати. Вони можуть виникати раптово і без попередження, що робить їх особливо небезпечними для суспільства. Розуміння механізмів їх виникнення та розвитку є ключовим для прогнозування сейсмічної небезпеки та розробки стратегій зменшення ризиків. Проте, моделювання землетрусів є складним завданням, яке поєднує в собі фізичні, математичні, геологічні та інженерні аспекти. Протягом історії науки дослідники стикалися з багатьма викликами, намагаючись відтворити та передбачити ці складні природні явища.

1.1 Природа та механізми виникнення землетрусів

Землетруси виникають раптово, залишаючи після себе сліди руйнувань, а іноді й спричиняючи значні людські втрати.

Основною причиною більшості землетрусів є рух тектонічних плит у земній корі. Земна кора має наступну структуру:

- кора, тонкий зовнішній шар товщиною від 5 до 70 км підрозділяється на континентальну та океанічну кору;
- мантія, розташована під корою, простягається на глибину до 2 900 км складається з верхньої та нижньої мантії;
- ядро, поділяється на зовнішнє рідке ядро та внутрішнє тверде ядро знаходиться на глибині від 2 900 км до центру землі (приблизно 6 371 км).

Земна кора та верхня частина мантії утворюють жорсткий шар, відомий як літосфера [1]. Літосфера розділена на кілька великих і багато малих фрагментів, які називаються тектонічними плитами. Ці плити рухаються на в'язкій, більш гарячій частині верхньої мантії, званій астеносферою, як

зображено на рисунку 1.1. Незважаючи на те, що цей рух повільний і зазвичай непомітний, він призводить до накопичення величезної напруги на межах цих плит. Коли напруга перевищує певний поріг, відбувається раптовий зсув або ковзання плит одна повз одну, що спричиняє землетрус. Відбувається вивільнення накопиченої енергії, яка поширюється у вигляді сейсмічних хвиль, і саме ці хвилі викликають коливання земної поверхні. Більшість найсильніших землетрусів відбувається саме в місцях зіткнення тектонічних плит.

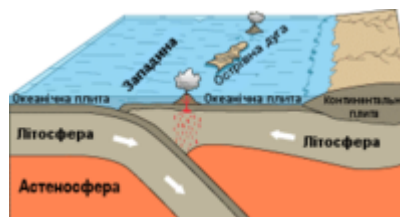


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення руху літосферних плит

Крім того, землетруси можуть бути спричинені вулканічною активністю. Виверження вулканів, під час яких магма піднімається до поверхні землі, створює великий тиск на навколишні породи. У деяких випадках цей тиск стає настільки сильним, що спричиняє землетруси, відомі як вулканічні. Хоча ці землетруси рідко бувають такими потужними, як тектонічні, вони можуть бути дуже небезпечними, оскільки супроводжують самі виверження, які несуть значні загрози.

Ще одним джерелом землетрусів є зони розломів у земній корі. Це області, де породи мають тріщини і зсуви, що утворилися внаслідок руху тектонічних плит у минулому. Розломи бувають трьох видів:

- скидові розломи виникають при розтягуванні земної кори. верхній блок опускається вниз відносно нижнього;
- надвигові розломи виникають при стисканні. верхній блок насувається на нижній;

- зсувні розломи характеризуються горизонтальним зміщенням блоків уздовж розлому [2].

У таких зонах напруга може накопичуватися протягом тривалого часу, і коли вона досягає критичної точки, виникає землетрус. Цей процес є особливо небезпечним, оскільки активність у зонах розломів може спричиняти серії землетрусів, що поступово руйнують інфраструктуру та призводять до небезпечних наслідків для мешканців прилеглих районів.

Окремо варто зазначити, що деякі землетруси можуть бути індукованими людською діяльністю. Вони виникають через видобуток корисних копалин, будівництво великих гребель, заповнення водосховищ та інші значні зміни в геологічній структурі. Наприклад, коли будують греблі та утворюють водосховища, маса води чинить тиск на земну кору, що іноді може призводити до невеликих землетрусів [3]. Хоча індуковані землетруси зазвичай мають меншу потужність, ніж природні, вони становлять реальну загрозу, особливо якщо відбуваються поблизу густонаселених районів.

1.2 Способи дослідження землетрусів

Для протидії руйнівним наслідками землетрусів використовуються різноманітні методи їх прогнозування та симуляції. Вони включають у себе велику кількість інструментальних, геофізичних, геологічних, лабораторних та комп'ютерних підходів.

1.2.1 Сейсмографія та сейсмічні мережі

Сейсмографія є фундаментальною галуззю геофізики, що займається вивченням землетрусів та поширенням сейсмічних хвиль у земній корі та мантії. Вона базується на використанні сейсмографів – чутливих приладів,

здатних реєструвати навіть найменші коливання земної поверхні. Сейсмографія відіграє ключову роль у розумінні механізмів виникнення землетрусів, їхньої локалізації, а також у прогнозуванні сейсмічної активності та оцінці сейсмічних ризиків.

Основним інструментом сейсмологічних досліджень є сейсмограф. [4]

Сейсмографи працюють на основі перетворення механічних коливань ґрунту на електричні сигнали, які можна записати та проаналізувати. Традиційний сейсмограф складається з маси, підвішеної на пружині або маятнику, яка через інерцію залишається відносно нерухомою під час руху ґрунту. Коли земна поверхня коливається внаслідок сейсмічних хвиль, маса залишається на місці, а корпус приладу рухається разом із землею. Різниця між положенням маси та корпусу перетворюється на електричний сигнал за допомогою датчиків переміщення або швидкості. Цей сигнал записується у вигляді сейсмограми, що відображає зміщення, швидкість або прискорення ґрунту в часі.

Принцип роботи класичного сейсмографу зображено на рисунку 1.2.

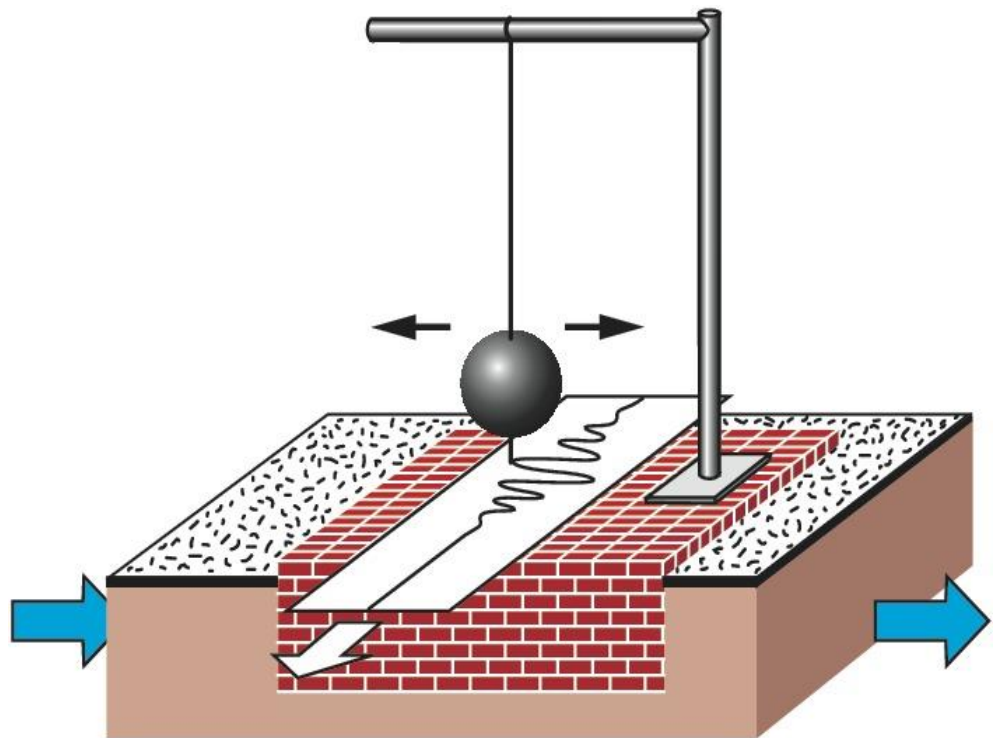


Рисунок 1.2 – Принцип роботи сейсмографу

Сучасні сейсмографи оснащені високоточними електронними датчиками та цифровими системами збору даних (рис.1.3). Вони можуть реєструвати широкий діапазон частот сейсмічних хвиль – від низькочастотних (довгоперіодичних) коливань, які корисні для вивчення глибоких структур Землі, до високочастотних (короткоперіодичних) коливань, що важливі для аналізу місцевих землетрусів та інженерних застосувань.

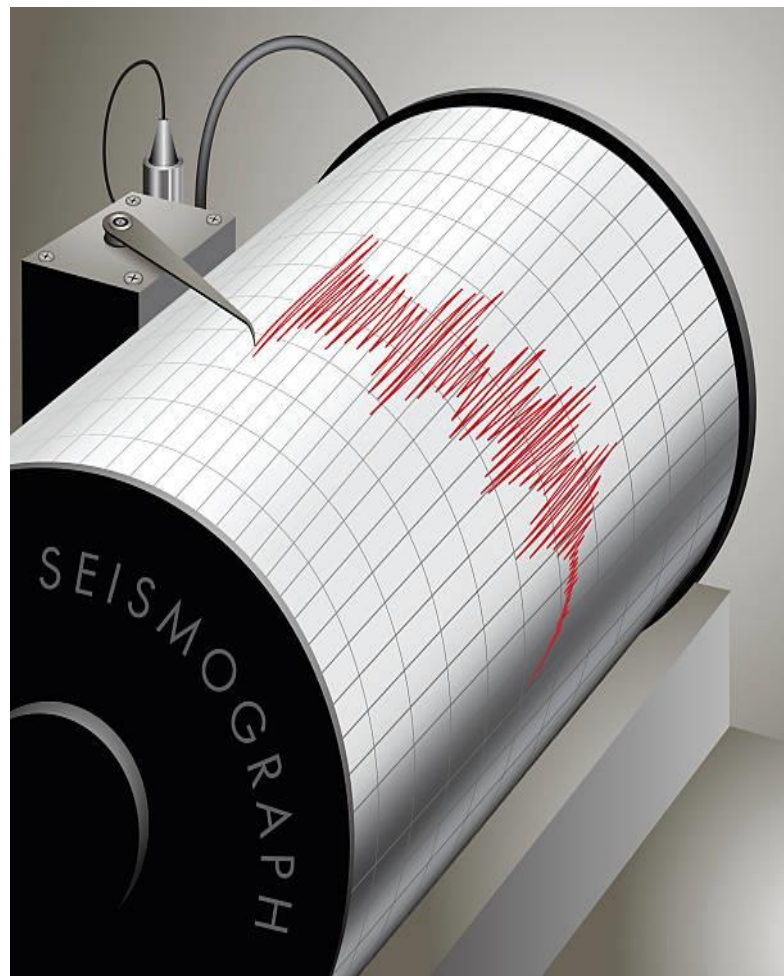


Рисунок 1.3 – Сучасний сейсмограф

Під час сучасних сейсмографічних досліджень використовуються сейсмічні системи – це системи, що складаються з багатьох сейсмографів, розташованих на певній території або по всьому світу, які працюють спільно для збору, передачі та аналізу сейсмічних даних. Існують локальні,

регіональні та глобальні сейсмічні мережі, кожна з яких має свої завдання та сфери застосування [5].

Локальні сейсмічні мережі зазвичай розгортаються в районах з високою сейсмічною активністю або там, де необхідний детальний моніторинг, наприклад, поблизу активних вулканів, геотермальних полів або інженерних споруд. Вони дозволяють виявляти та аналізувати навіть найменші землетруси, що є важливим для розуміння місцевих тектонічних процесів та оцінки ризиків.

Регіональні сейсмічні мережі охоплюють більші території, такі як країни або континенти. Вони забезпечують моніторинг середніх та великих землетрусів, допомагають визначати сейсмічну небезпеку в регіоні та надають дані для наукових досліджень.

Глобальні сейсмічні мережі, такі як Міжнародна сейсмологічна мережа (International Seismological Centre, ISC) або Глобальна сейсмографічна мережа (Global Seismographic Network, GSN), об'єднують дані з усього світу (рис.1.4). Вони є критично важливими для виявлення та аналізу великих землетрусів [6], особливо в віддалених або важкодоступних районах, а також для дослідження внутрішньої будови Землі та глобальних тектонічних процесів.

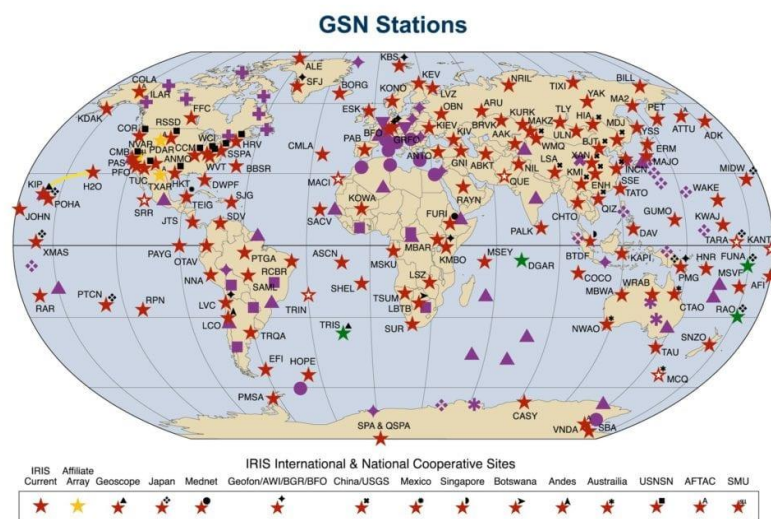


Рисунок 1.4 – Розміщення центрів Глобальної сейсмографічної мережі

Завдяки цьому інструментарію становиться можливим чіткий аналіз землетрусів. Під час землетрусу сейсмографи реєструють різні типи сейсмічних хвиль: поздовжні (P-хвилі), поперечні (S-хвилі) та поверхневі хвилі. Кожен тип хвиль має свої характеристики та несе інформацію про властивості середовища, через яке вони проходять. P-хвилі, як найшвидші, прибувають на сеймостанцію першими, за ними слідує S-хвилі та поверхневі хвилі. Аналізуючи час прибуття цих хвиль на різні станції, сейсмологи можуть визначити місце розташування епіцентру землетрусу та глибину його вогнища.

Зареєстровані сейсмограми підлягають детальному аналізу. Спочатку проводиться обробка сигналів для видалення шумів та перешкод. Потім визначаються ключові параметри: амплітуда, частота, фаза сейсмічних хвиль. На основі цих даних розраховується магнітуда землетрусу, яка відображає його енергію. Крім того, досліджуються спектральні характеристики сейсмічних хвиль, що дозволяє отримати додаткову інформацію про джерело землетрусу та властивості порід, через які пройшли хвилі.

Сейсмографічні дані також використовуються для визначення механізму вогнища землетрусу. Це включає встановлення типу розриву на розломі та напрямку зміщення тектонічних блоків. Такий аналіз допомагає зрозуміти тектонічні процеси в регіоні та прогнозувати можливі майбутні сейсмічні події.

У глобальному масштабі сейсмографічні мережі забезпечують моніторинг сейсмічної активності по всій планеті. Дані з тисяч сейсмографів об'єднуються та аналізуються в реальному часі, що дозволяє оперативно реагувати на землетруси та попереджати про можливі цунамі. Міжнародна співпраця в цій галузі є надзвичайно важливою, оскільки землетруси не визнають державних кордонів і можуть мати транскордонний вплив [7].

1.2.2 Геодезичні методи у вивченні землетрусів: GPS та InSAR

Серед найважливіших інструментів для вивчення деформацій земної поверхні, пов'язаних з тектонічними процесами та землетрусами, виділяються геодезичні методи, зокрема глобальна навігаційна супутникова система (GPS) та інтерферометрична синтетична апертура радіолокації (InSAR). Ці методи дозволяють з високою точністю вимірювати зміни положення точок на земній поверхні, що є критично важливим для розуміння механізмів землетрусів та прогнозування їхніх наслідків. Суть теорії еластичної розрядки

Глобальна навігаційна супутникова система (GNSS), до якої належить GPS (Global Positioning System), базується на використанні сигналів від групи супутників, що обертаються навколо Землі. Кожен супутник постійно передає радіосигнали, що містять інформацію про час та своє положення в просторі. Наземні приймачі GPS, встановлені на досліджуваній території, приймають ці сигнали і, шляхом вимірювання часу проходження сигналу від супутника до приймача, визначають своє точне тривимірне положення з точністю до кількох міліметрів [8].

У контексті вивчення землетрусів, GPS використовується для моніторингу рухів та деформацій земної кори. Постійні GPS-станції, розташовані по всьому світу, забезпечують безперервний збір даних про зміни координат з високою частотою (від секунд до днів). Аналіз цих даних дозволяє виявити повільні тектонічні рухи тектонічних плит, такі як їхнє зіткнення, розходження або ковзання одна відносно одної. Крім того, GPS дозволяє фіксувати раптові зміщення, які відбуваються під час землетрусів, а також післясейсмічні деформації, пов'язані з релаксацією напружень у земній корі.

Одним із ключових застосувань GPS у сейсмології є виявлення накопичення напружень уздовж розломів. Шляхом довготривалого моніторингу рухів земної поверхні можна визначити ділянки, де рухи

блокуються і де відбувається накопичення енергії, яка може вивільнитися під час землетрусу. Це особливо важливо для прогнозування сейсмічної небезпеки та планування заходів зменшення ризиків.

InSAR є методом дистанційного зондування, який використовує радіолокаційні супутники для вимірювання змін висоти земної поверхні з точністю до міліметрів. Принцип роботи InSAR базується на порівнянні фаз радіолокаційних сигналів, відбитих від земної поверхні в різні моменти часу. Коли супутник пролітає над тією самою ділянкою Землі, він робить знімки, які потім обробляються для виявлення інтерференційних візерунків – інтерферограм [9].

Інтерферограми містять інформацію про зміну відстані між супутником і земною поверхнею, що може бути результатом вертикальних зміщень через тектонічні процеси, землетруси, вулканічну активність або інші геофізичні явища. Завдяки високій роздільній здатності InSAR, яка може досягати десятків метрів на земній поверхні, цей метод дозволяє детально картувати деформації на великих територіях.

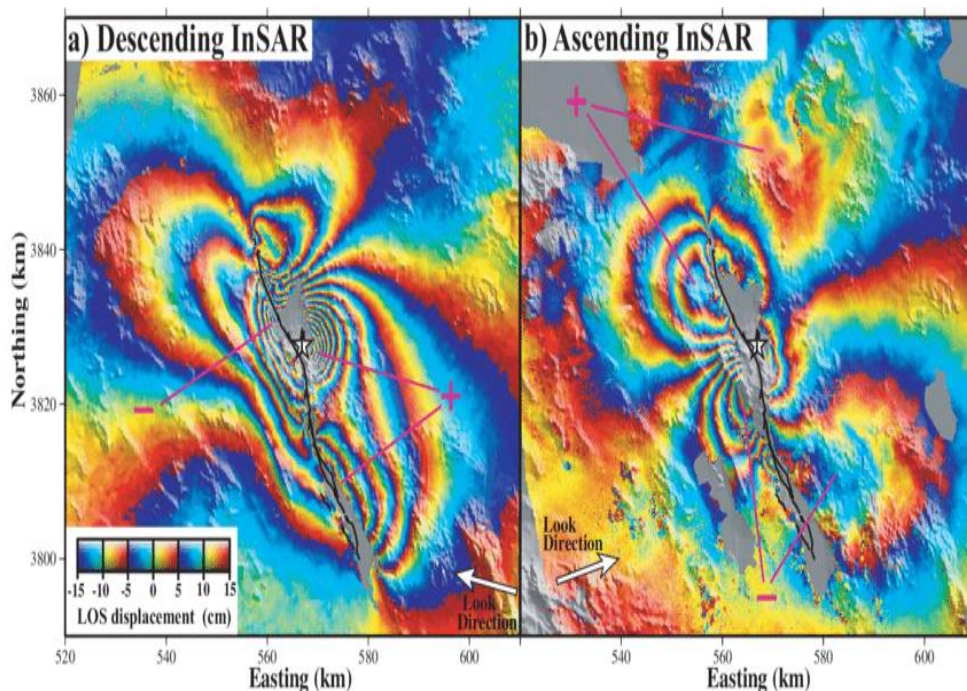


Рисунок 1.5 – Приклад інтерферограми

Ці інструменти надають можливість виявити зміни у земній корі після землетрусу та проаналізувати процеси, пов'язані з релаксацією напружень та переміщенням флюїдів у земній корі. Також можливо помітити процеси які відбуваються дуже повільно і не спричиняють сильних сейсмічних хвиль.

Хоча GPS та InSAR є потужними інструментами самі по собі, їх поєднання забезпечує ще більшу точність та повноту даних про деформації земної поверхні. GPS надає високоточні вимірювання в точках встановлення приймачів, тоді як InSAR забезпечує просторово безперервні дані на великих територіях.

1.2.3 Комп'ютерне моделювання з використанням чисельних методів у вивченні землетрусів

Комп'ютерне моделювання стало невід'ємною частиною сучасної сейсмології та геофізики, дозволяючи дослідникам аналізувати складні процеси, що відбуваються під час землетрусів, та прогнозувати їх можливі наслідки. Використання чисельних методів у моделюванні землетрусів дає змогу відтворювати фізичні процеси в земній корі та мантиї, які неможливо безпосередньо спостерігати чи експериментально відтворити в лабораторних умовах.

Чисельні методи, такі як метод скінченних різниць, метод скінченних елементів та спектральні методи, дозволяють розв'язувати складні диференціальні рівняння, що описують механіку суцільних середовищ та поширення сейсмічних хвиль. Завдяки цьому науковці можуть моделювати процеси накопичення та вивільнення напружень у земній корі, динаміку розриву на розломах, а також поширення сейсмічних хвиль через неоднорідні та анізотропні середовища [10].

Метод скінченних різниць базується на дискретизації диференціальних рівнянь шляхом заміни похідних скінченними різницями. Це дозволяє

перетворити неперервні рівняння в систему алгебраїчних рівнянь, які можна розв'язати за допомогою чисельних алгоритмів. Цей метод широко використовується для моделювання поширення сейсмічних хвиль у дво- та тривимірних середовищах, особливо в випадках, коли необхідно врахувати складну геометрію та неоднорідність земної кори.

Метод скінченних елементів полягає в розбитті області дослідження на невеликі елементи, в межах яких фізичні властивості вважаються відомими або змінюються за відомим законом. Цей метод особливо ефективний для моделювання складних геометричних структур, таких як нерівні поверхні, розломи, а також для врахування різних граничних умов. Використовуючи метод скінченних елементів, дослідники можуть моделювати процеси розриву на розломах, враховуючи нерівності, сегментацію та зміну властивостей порід.

Спектральні методи ґрунтуються на представленні функцій у вигляді рядів базисних функцій, таких як тригонометричні або поліноміальні. Це дозволяє з високою точністю розв'язувати рівняння руху для сейсмічних хвиль у випадку гладких та періодичних середовищ. Спектральні методи є ефективними для моделювання поширення хвиль на великих відстанях та для вивчення глобальних сейсмічних процесів.

Комп'ютерне моделювання з використанням чисельних методів дає змогу дослідникам досліджувати динаміку землетрусів на різних масштабах— від локальних розривів на окремих розломах до глобальних тектонічних процесів. Застосовуючи високопродуктивні обчислювальні системи та паралельні алгоритми, можна виконувати моделювання з високою просторовою та часовою роздільною здатністю, що є необхідним для детального аналізу складних сейсмічних явищ.

Одним із важливих напрямків комп'ютерного моделювання є симуляція процесу розриву на розломах. Ці моделі враховують механіку контактної взаємодії між блоками порід, силу тертя, накопичення напружень та їх вивільнення під час землетрусу. Динамічні моделі розриву дозволяють

вивчати умови, за яких відбувається ініціація землетрусу, швидкість розповсюдження розриву, його зупинку та взаємодію з іншими розломами. Це сприяє глибшому розумінню фізичних механізмів землетрусів та прогнозуванню їхньої сили та масштабів.

Комп'ютерне моделювання також використовується для вивчення поширення сейсмічних хвиль через неоднорідну земну кору. Врахування реальних геологічних структур, таких як шари різних порід, порожнини, водоносні горизонти та інші неоднорідності, дозволяє моделювати, як сейсмічні хвилі взаємодіють із цими структурами, змінюючи свою амплітуду, швидкість та напрямок. Це має важливе значення для прогнозування розподілу сейсмічних хвиль на поверхні, оцінки сейсмічної небезпеки та планування будівництва сейсмостійких споруд.

Іншим важливим аспектом є моделювання взаємодії сейсмічних хвиль з інженерними спорудами та ґрунтом. Це дозволяє оцінити, як будівлі та інші конструкції будуть реагувати на сейсмічні впливи, та розробити заходи для підвищення їхньої стійкості. Комп'ютерне моделювання допомагає інженерам проектувати будівлі, що здатні витримувати певні рівні сейсмічних навантажень, та оптимізувати їхню конструкцію.

Використання суперкомп'ютерів та кластерних обчислювальних систем є необхідним для вирішення великих та складних задач у сейсмологічному моделюванні. Завдяки паралельним обчисленням та ефективним алгоритмам можна значно скоротити час розрахунків та підвищити точність моделей. Це відкриває можливості для проведення серій чисельних експериментів, що дозволяють досліджувати вплив різних параметрів на поведінку сейсмічної системи.

Комп'ютерне моделювання також інтегрує дані з інших джерел, таких як сейсмографія, геодезичні вимірювання (GPS, InSAR), геологічні та геофізичні дослідження. Це дозволяє створювати комплексні моделі, що враховують широкий спектр даних та підходів. Поєднання різних типів

інформації сприяє підвищенню достовірності та надійності прогнозів, а також дозволяє вирішувати складні міждисциплінарні задачі [11].

1.3 Еволюція математичних моделей землетрусів

Математичне моделювання землетрусів є ключовим інструментом для розуміння механізмів їх виникнення, прогнозування сейсмічної активності та оцінки сейсмічної небезпеки. Протягом історії розвитку науки ці моделі еволюціонували від простих спрощень до складних багатофакторних систем, які враховують різноманітні фізичні, геологічні та статистичні аспекти. У цьому розділі ми розглянемо основні етапи еволюції математичних моделей землетрусів, зосереджуючись на теоретичних підходах та їх обґрунтуваннях, без використання математичних формул.

На початкових етапах розвитку сейсмології вчені намагалися зрозуміти природу землетрусів, базуючись на спостереженнях і логічних висновках. Перші моделі були здебільшого якісними і не містили складних математичних описів.

Інтуїтивні моделі – це перші теорії розглядали землетруси як результат руху «підземних вітрів» або обвалів у підземних порожнинах. Ці моделі не враховували механічних властивостей порід та процесів накопичення напружень

Деякі вчені уявляли земну кору як набір блоків, що можуть зміщуватися один відносно одного. Однак ці уявлення були дуже спрощеними і не давали можливості передбачити поведінку землетрусів.

З появою класичної механіки та розумінням законів руху тіл виникла можливість застосовувати фізичні принципи для опису процесів у земній корі.

Закони Ньютона – вони стали основою для опису рухів мас у землі, хоча на практиці застосування цих законів було ускладнене через складність та неоднорідність земної кори.

Теорія еластичності – розробка цієї теорії дозволила описувати, як тверді тіла деформуються під дією сил. Вона стала фундаментом для подальших моделей, що описують накопичення та вивільнення напружень у земній корі.

Після руйнівного землетрусу в Сан-Франциско Гаррі Філдінг Рейд провів детальні дослідження зсувів земної поверхні вздовж розлому Сан-Андреас. Він виявив, що породи по обидва боки розлому змістилися на кілька метрів.

Суть теорії пружної розрядки:

– накопичення еластичних напружень: тектонічні плити повільно рухаються, але сила тертя на розломах перешкоджає цьому руху, спричиняючи деформацію порід і накопичення енергії;

– раптове вивільнення енергії: коли накопичене напруження перевищує силу тертя, відбувається раптовий розрив або ковзання по розлому, що призводить до землетрусу.

Вимірювання показали реальні зміщення земної поверхні, що підтверджує накопичення деформацій перед землетрусом.

Теорія еластичності пояснює, як тверді тіла можуть накопичувати енергію при деформації та вивільняти її при руйнуванні.

Теорія Рейда стала ключовою для розуміння того, як і чому відбуваються землетруси. На основі швидкості накопичення напружень можна оцінювати періодичність великих землетрусів на активних розломах.

З розумінням того, що землетруси пов'язані з раптовим розривом на розломах, вчені почали розробляти моделі, які описують цей процес.

Механіка розриву – вивчається, як напруження накопичується до критичного рівня і як відбувається початок та поширення розриву [13]. Поведінка розлому – розглядаються умови, за яких розрив може

прискорюватися або зупинятися, а також вплив геометрії розлому на ці процеси.

Кінематичні моделі зосереджені на описі руху по розлому без детальнього розгляду сил, що його спричиняють. Використовуються для прогнозування поширення сейсмічних хвиль.

Динамічні моделі враховують сили та механічні властивості порід, що дозволяє краще зрозуміти фізичні процеси під час землетрусу.

Вчені почали аналізувати сейсмічні хвилі з точки зору їхніх частотних характеристик:

- аналіз спектрів для дослідження того, які частоти переважають у сейсмічних хвилях від різних землетрусів;
- розмір розлому та швидкість розриву впливають на спектральний склад сейсмічних хвиль.

Таким чином були створені моделі джерела.

Пружний диполь: землетрус розглядається як певний тип механічного джерела, що випромінює енергію у вигляді хвиль.

Сейсмічний момент: введено поняття, яке кількісно описує розмір та силу землетрусу, враховуючи площу розлому та величину зсуву.

Наступним етапом розвитку стали мультифізичні моделі. Завдяки цьому були відкриті наступні явища:

- впливу флюїдів: рідини в земній корі можуть змінювати напружений стан та властивості порід, впливаючи на ймовірність землетрусів;
- термомеханічні процеси: нагрівання під час ковзання може змінювати властивості порід і тертя, що впливає на розвиток землетрусу.

1.4 Проблематика моделювання землетрусів

Моделювання землетрусів є складним науковим завданням, яке стикається з багатьма проблемами та викликами. Ці труднощі зумовлені складністю фізичних процесів, що відбуваються в надрах Землі, обмеженістю даних спостережень, а також обмеженнями сучасних обчислювальних методів та ресурсів. У цьому розділі детально розглянуто основні проблеми, з якими стикаються науковці при моделюванні землетрусів.

Однією з основних проблем є складність та неоднорідність внутрішньої структури Землі. Земна кора та мантія складаються з різних гірських порід з різними фізичними та механічними властивостями [14]. Ці властивості можуть значно змінюватися в просторі та з часом.

Гірські породи відрізняються за щільністю, пружними модулями, в'язкістю та іншими параметрами. Ця неоднорідність ускладнює створення точних моделей, здатних відобразити реальні умови в земній корі.

Анізотропія властивостей: у деяких випадках фізичні властивості порід залежать від напрямку, що ускладнює математичний опис та моделювання.

Наявність флюїдів: підземні води, гази та розплавлені породи можуть суттєво впливати на механічні властивості порід та процеси на розломах, змінюючи коефіцієнт тертя і сприяючи виникненню землетрусів.

Процеси, що призводять до виникнення землетрусів, є нелінійними та часто мають хаотичний характер. Їм властива нелінійна динаміка. Взаємодія між накопиченням напружень та їх раптовим вивільненням не піддається простому лінійному опису.

Ще одним елементом хаотичності є чутливість до початкових умов. Невеликі зміни в початкових параметрах моделі можуть призвести до суттєвих відмінностей у результатах. Це ускладнює прогнозування землетрусів і вимагає врахування ймовірнісних підходів.

Наступним пунктом є самоорганізована критичність. Земна кора може розглядатися як система, що перебуває в стані самоорганізованої критичності, де навіть невеликі збурення можуть викликати великі події. Моделювання таких систем потребує спеціальних математичних підходів.

Достовірне моделювання вимагає точних і обширних даних, проте збір таких даних стикається з численними викликами. Глибина фокусів землетрусів є однією з основних проблем, оскільки більшість землетрусів відбувається на значних глибинах, що унеможлиблює проведення прямих вимірювань. Історичні дані про землетруси також мають свої обмеження: детальні сейсмічні записи існують лише кілька десятиліть, чого недостатньо для розуміння довготривалих сейсмічних процесів. До цього додається і неточність вимірювань, адже навіть сучасні інструменти мають обмеження в точності, а зібрані дані можуть містити шуми або помилки через вплив навколишнього середовища чи технічні особливості обладнання.

Розломи та інші геологічні структури, що беруть участь у процесах землетрусів, характеризуються складною геометрією та взаємодією, які суттєво впливають на динаміку цих явищ. Складна геометрія розломів, що включає вигини, розгалуження, неоднорідності та інші особливості, ускладнює точний опис і врахування цих факторів у моделях. Окрім цього, взаємодія між різними розломами впливає на зміну напруженого стану в земній корі, що робить прогнозування поведінки кожного окремого розлому надзвичайно складним завданням. Додатковий вплив на процеси землетрусів мають мультифазні явища, що включають взаємодію механічних, термічних та хімічних процесів, які впливають на поведінку розломів та сприяють виникненню землетрусів.

Моделювання землетрусів вимагає значних обчислювальних ресурсів та розвинених математичних методів. Висока розмірність задач пов'язана з тривимірним моделюванням із високою роздільною здатністю, яке потребує величезних обсягів пам'яті та обчислювальної потужності. Водночас вимоги до точності, які передбачають врахування дрібних деталей та особливостей,

вимагають застосування малих кроків по часу та простору, що значно збільшує час обчислень. Складність чисельних методів зумовлена необхідністю моделювання нелінійних, неоднорідних та анізотропних середовищ, що вимагає розробки та використання алгоритмів, здатних давати точні результати та залишатися стійкими до помилок.

Великі землетруси відбуваються рідко, але вони мають катастрофічні наслідки. Через рідкість великих подій статистичні моделі стикаються з високим рівнем невизначеності. Додатково, землетруси можуть виникати випадково, під впливом багатьох факторів, і точне передбачення часу та місця їх виникнення залишається надзвичайно складним завданням.

Діяльність людини також може впливати на сейсмічну активність, додаючи складності в моделювання. Індуковані землетруси, спричинені видобутком корисних копалин, закачуванням рідин у свердловини та іншими діями, є одним із таких факторів. Зміна навантажень на земну кору, зумовлена будівництвом великих споруд, водосховищ та інших об'єктів, може призводити до змін напруженого стану земної кори.

1.5 Розвиток комп'ютерного моделювання

Комп'ютерне моделювання дозволяє розробляти детальні математичні моделі, які враховують різні аспекти сейсмічної активності, такі як механіка розломів, властивості гірських порід і глибина залягання фокусів землетрусів. Тривимірні моделі з високою роздільною здатністю забезпечують точне відображення реальної геометрії розломів і шарів земної кори. Однак висока розмірність таких задач вимагає значних обсягів оперативної пам'яті, високопродуктивних процесорів і графічних прискорювачів. Ці ресурси необхідні для ефективного розв'язання рівнянь і симуляції процесів, що відбуваються на різних часових і просторових масштабах.

Одним із ключових викликів є точність моделювання. Врахування дрібних деталей і особливостей геологічних структур потребує використання малих кроків у часі та просторі, що значно збільшує кількість обчислень. Для цього застосовуються складні чисельні методи, які адаптуються до специфіки задачі. Наприклад, методи кінцевих елементів і кінцевих різниць дозволяють враховувати неоднорідності матеріалів, розгалужену геометрію розломів та інші фактори, що впливають на поширення сейсмічних хвиль. Крім того, розробка стійких алгоритмів, які забезпечують точність розв'язків навіть за складних умов, є важливою складовою моделювання.

1.6 Постановка задачі дослідження

Таким чином, моделювання землетрусів є актуальним завданням для розуміння сейсмічних ризиків та розробки стратегій їх зменшення. Тому ставиться завдання розробки алгоритму та створення програми для моделювання землетрусів, використовуючи методи чисельного моделювання та враховуючи геологічні дані.

Об'єктом дослідження є сейсмічні процеси та структура земної кори.

Метою дослідження є розробка методів, що базуються на використанні сучасних чисельних методів, які дозволяють моделювати виникнення та поширення землетрусів для прогнозування їхнього впливу та зменшення сейсмічних ризиків, а також створення програми, яка реалізує ці методи.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих методів моделювання землетрусів та сейсмічних хвиль;
- розробити алгоритм моделювання поширення сейсмічних хвиль у неоднорідних середовищах на базі методу скінченних елементів або методу скінченних різниць;

– реалізувати алгоритм моделювання генерації землетрусів на розломах, враховуючи механізми накопичення напружень та властивості тертя типу «швидкість-стан»;

– створити програму, яка реалізує розроблені алгоритми та дозволяє моделювати землетруси з можливістю врахування реальних геологічних даних;

– розробити комп'ютерну модель для симуляції землетрусів та аналізу їхніх наслідків.

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ СИМУЛЯЦІЇ ЗЕМЛЕТРУСІВ

Розуміння та моделювання процесів, що відбуваються під час землетрусів, вимагає комплексного підходу, який включає фізичні, математичні та чисельні аспекти. У цьому розділі розглядаються основні математичні моделі, які лежать в основі симуляції землетрусів, а також їх взаємозв'язки та логічна послідовність

2.1 Модель пружного середовища

Першим кроком у моделюванні землетрусів є розуміння процесу накопичення і вивільнення напружень у земній корі. Теорія пружної розрядки слугує основою для опису цього механізму, демонструючи, як пружні напруження поступово накопичуються через тектонічні рухи, доки не досягають критичної межі, що призводить до раптового розриву порід.

Теорія пружної розрядки є фундаментальною для розуміння механізму виникнення землетрусів. Вона описує процес накопичення пружних напружень у земній корі внаслідок тектонічних рухів і їх раптове вивільнення під час землетрусу.

Основне рівняння пружної розрядки виражається законом Гука:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.1)$$

де σ – напруження, що діє на матеріал;

E – модуль Юнга, який характеризує пружність матеріалу;

ε – відносна деформація, безрозмірна величина.

Це рівняння показує, що напруження в матеріалі зростає прямо пропорційно до деформації, що виникає внаслідок зовнішніх сил [15]. У контексті землетрусів, тектонічні сили викликають накопичення напружень у

земній корі, поки вона не досягне критичної межі, після чого відбувається розрив

Рівняння руху в пружному середовищі є фундаментальними для розуміння динаміки землетрусу. Вони описують, як накопичена енергія викликає зміщення мас земної кори, створюючи хвилі, які поширюються на великі відстані. Саме ці хвилі є причиною руйнівних наслідків землетрусів

Рівняння руху для пружної ізотропної середовища без зовнішніх сил описують динаміку зміщень у земній корі внаслідок землетрусу. Вони ґрунтуються на другому законі Ньютона і враховують внутрішні сили, що виникають внаслідок деформацій.

Рівняння мають вигляд:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2.2)$$

де ρ – густина середовища, кг/м³;

u_i – компоненти вектора зміщення в напрямку i , м;

t – час, с;

σ_{ij} – компоненти тензора напружень, Па;

x_j – координати в просторі, м.

Ці рівняння показують, що прискорення масових елементів середовища пропорційні градієнту напружень. Вони є основою для моделювання поширення сейсмічних хвиль у земній корі [16].

Закон Гука в тривимірному випадку дозволяє врахувати складну поведінку матеріалів, зокрема об'ємні та зсувні деформації. Цей підхід забезпечує більш точне моделювання, оскільки враховує складну геометрію та неоднорідності земної кори [17].

У тривимірному випадку закон Гука описується через тензорні величини і враховує як об'ємні, так і зсувні деформації матеріалу. Зв'язок між напруженнями та деформаціями виражається формулою:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (2.3)$$

де λ, μ – це параметри Ламе, Па, які характеризують пружні властивості матеріалу;

δ_{ij} – символ Кронекера, який дорівнює 1 при $i = j$ та 0 при $i \neq j$;

ε_{kk} – слід тензора деформацій, що дорівнює сумі діагональних елементів ε_{ii} ;

ε_{ij} – компоненти тензора деформацій.

Компоненти тензора деформації вираховуються за формулою:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{du_i}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} \right), \quad (2.4)$$

Тепер, маючи зв'язок між напруженнями та деформаціями, ми можемо підставити вираз для σ_{ij} з рівняння (2.3) у рівняння руху (2.2). Це дозволяє отримати рівняння тільки для зміщень u_i , які можна використовувати для моделювання динаміки пружних хвиль у земній корі.

Окрім руху у пружному середовищі, важливо розглянути процеси, які відбуваються безпосередньо на розломі. Модель тертя типу «швидкість-стан» дозволяє описати взаємодію порід на поверхнях розлому. Вона враховує залежність між зсувним напруженням, швидкістю ковзання і станом контактної поверхні, що є ключовим для розуміння механізмів виникнення землетрусів [18,19].

Таким чином, математичні основи закладають фундамент для чисельного аналізу, який дозволяє перейти до практичної реалізації моделей у складних геологічних умовах.

Однак для повного опису процесу землетрусу необхідно врахувати поведінку розлому, на якому відбувається ковзання порід. Тут на допомогу приходить модель тертя типу «швидкість-стан», яка описує залежність зсувного напруження на розломі від швидкості ковзання та стану контактної поверхні.

Основне рівняння моделі має вигляд:

$$\tau = \sigma_n \left[\mu_0 + a \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + b \ln\left(\frac{\theta V_0}{L}\right) \right], \quad (2.5)$$

де τ – зсувне напруження на розломі, Па;

σ_n – нормальне напруження, Па;

μ_0 – базовий коефіцієнт тертя;

a і b – емпіричні параметри моделі;

V – швидкість зсуву, м/с;

V_0 – референтна швидкість, м/с;

θ – змінна стану контактної поверхні, с;

L – характерна довжина зсуву, м.

Змінна стану θ еволюціонує за рівнянням:

$$\frac{d\theta}{dt} = 1 - \frac{V\theta}{L}, \quad (2.6)$$

Ця модель дозволяє врахувати складні нелінійні процеси на розломі, зокрема зміни в стані контактної поверхні в залежності від швидкості ковзання. Це критично важливо для моделювання реалістичної поведінки розлому під час землетрусу.

2.2 Чисельні методи моделювання землетрусів

Після формулювання математичних моделей виникає потреба в їх розв'язанні для конкретних геологічних умов. Через складність аналітичних розв'язків використовуються чисельні методи, які дозволяють ефективно моделювати динаміку землетрусів навіть за складної геометрії та неоднорідностей середовища.

Метод кінцевих елементів є універсальним і потужним інструментом для моделювання землетрусів, який дозволяє враховувати широкий спектр геологічних та фізичних особливостей досліджуваного середовища. Основою МКЕ є дискретизація області дослідження, що передбачає розбиття складної геометрії земної кори на окремі малі елементи, такі як трикутники чи чотирикутники в двовимірному просторі або тетраедри та гексаедри у тривимірному. Це розбиття дозволяє моделювати навіть складні форми розломів і неоднорідності матеріалів з високою точністю.

Після дискретизації обираються функції форми, які апроксимують змінні, наприклад, зміщення чи напруження, всередині кожного елемента. Ці функції є поліномами, які забезпечують плавний перехід між вузлами сітки, що особливо важливо для точного моделювання розподілу напружень і деформацій. На основі фізичних законів, таких як рівняння пружності або динаміки, для кожного елемента формуються локальні рівняння, які описують взаємодію між сусідніми вузлами.

Ці локальні рівняння потім об'єднуються в глобальну систему рівнянь, яка охоплює всю досліджувану область. При цьому враховуються взаємодії між окремими елементами, що дозволяє отримати цілісну картину поведінки земної кори під час землетрусу. Додатково враховуються граничні умови, які задають відомі значення змінних на межах області, наприклад, нульові зміщення на фіксованих ділянках або відомі значення навантажень.

Остаточний етап передбачає розв'язання отриманої системи рівнянь за допомогою чисельних методів, таких як прямі або ітеративні методи.

Результати обчислень дозволяють оцінити, як напруження, деформації та інші параметри розподіляються в земній корі під час сейсмічної події. Завдяки своїй гнучкості та точності, МКЕ є важливим інструментом для вивчення механізмів землетрусів, прогнозування їх наслідків і розробки стратегій зниження сейсмічного ризику.

Метод кінцевих різниць є альтернативним чисельним методом, який базується на апроксимації похідних у диференціальних рівняннях за допомогою скінченних різниць. Цей метод особливо ефективний для задач з регулярною сіткою та відносно простою геометрією.

Приклад апроксимації другої похідної по координаті x :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta x^2}, \quad (2.7)$$

Землетруси – це динамічні явища, і тому важливо враховувати зміни з часом. Схеми інтегрування дозволяють розраховувати, як змінюються напруження та зміщення на кожному часовому кроці. Залежно від потреб моделі, використовуються явні схеми (для швидкості обчислень) або неявні (для стабільності розрахунків).

Чисельні методи створюють основу для моделювання поширення сейсмічних хвиль, дозволяючи перейти до їхнього практичного аналізу.

Існують різні чисельні схеми інтегрування, які використовуються для розв'язання диференціальних рівнянь у часі при моделюванні динамічних процесів, таких як землетруси. Всі ці схеми можна поділити на явні та неявні, залежно від їх підходу до обчислення змінних на кожному часовому кроці. Явні схеми, такі як метод центральних різниць, характеризуються простотою реалізації, оскільки для обчислення значень у наступному моменті часу використовуються лише дані з попередніх кроків. Це робить їх дуже ефективними з точки зору обчислювальної складності, оскільки немає необхідності розв'язувати систему рівнянь. Однак, для забезпечення

стабільності розрахунків такі схеми вимагають використання дуже малих кроків часу, що може значно збільшувати час виконання моделювання.

З іншого боку, неявні схеми, такі як метод Ньюмарка, дозволяють використовувати більші кроки часу, що робить їх стабільними навіть для складних систем. Проте вони потребують розв'язання системи рівнянь на кожному часовому кроці, що додає обчислювальної складності. Завдяки цьому неявні схеми краще підходять для моделювання систем із великими часовими інтервалами або у випадках, коли стабільність є критично важливою. Вибір між явними та неявними схемами зазвичай залежить від вимог до точності, стабільності та обчислювальних ресурсів, що доступні для проведення моделювання.

Вибір схеми інтегрування залежить від специфіки задачі та вимог до точності та швидкості обчислень.

2.3 Моделювання поширення сейсмічних хвиль

Після того як чисельні методи забезпечують розв'язання рівнянь, наступним кроком є моделювання поширення сейсмічних хвиль. Це ключовий етап, оскільки саме ці хвилі визначають вплив землетрусів на інфраструктуру та довкілля.

Одновимірна модель є найпростішим підходом, який дозволяє зрозуміти основні характеристики поширення хвиль. Хоча ця модель є спрощеною, вона забезпечує важливу базу для переходу до більш складних випадків [20,21].

Використовується одновимірне хвильове рівняння:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (2.8)$$

де $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – швидкість поширення хвилі в матеріалі.

Це рівняння допомагає зрозуміти основні характеристики хвильового процесу, але не враховує складних ефектів, які виникають у реальних тривимірних середовищах.

Для більш реалістичного моделювання використовують двовимірне хвильове рівняння [22]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (2.9)$$

Ця модель дозволяє врахувати поширення хвиль у двох напрямках, що важливо для аналізу впливу землетрусу на поверхневі структури та інфраструктуру.

Правильне задання граничних умов є критичним для точності моделювання. Наприклад, щоб уникнути штучних відбиттів хвиль від меж області моделювання, використовують поглинаючі граничні умови [23].

Джерела збурень, які моделюють землетрус, можуть бути задані як:

- прикладені сили в певних точках або областях;
- початкові умови для зміщень і швидкостей, що відповідають раптовому вивільненню енергії.

2.4 Моделювання поширення сейсмічних хвиль

Параметри моделі мають суттєвий вплив на результати симуляції. Розуміння цього впливу дозволяє налаштувати модель для більш точного відтворення реальних землетрусів і прогнозування їх наслідків.

Механічні властивості порід, такі як модуль Юнга E та густина ρ , визначають швидкість поширення сейсмічних хвиль [24]:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.10)$$

Зміна цих параметрів впливає на:

- час прибуття хвиль до певної точки;
- амплітуду та частотний склад хвиль;
- розподіл напружень і деформацій у середовищі.

Наприклад, більш жорсткі породи (з більшим E) сприятимуть швидшому поширенню хвиль, що може збільшити ризик руйнувань у певних областях.

Параметри a та b у моделі тертя типу «швидкість-стан» визначають характер ковзання на розломі:

- якщо $a < b$, система схильна до нестабільного ковзання, що відповідає виникненню землетрусів;

- якщо $a > b$, ковзання є стабільним і енергія вивільняється поступово.

Це означає, що зміна умов на розломі (наприклад, через зміну тиску або температури) може вплинути на ймовірність та інтенсивність землетрусу [25].

2.5 Альтерування параметрів моделювання землетрусів та їхній вплив на результати симуляцій

Розуміння, як різні параметри впливають на симуляції землетрусів, допомагає вдосконалити моделі для більш точного відтворення реальних подій. Варіювання параметрів, таких як механічні властивості матеріалу, геометрія розломів чи термодинамічні фактори, дозволяє вивчати їхній вплив на динаміку землетрусів. Це також відкриває можливість моделювання широкого спектру сценаріїв і забезпечує кращу готовність до майбутніх подій.

Одним із перших кроків у моделюванні землетрусів є визначення механічних властивостей земної кори. Ці властивості включають модуль Юнга, модуль зсув та густину. Альтерування цих параметрів дозволяє моделювати різні типи гірських порід і їх поведінку під час сейсмічних подій [26-28].

Модуль Юнга визначає жорсткість матеріалу: вищі значення цього параметра свідчать про те, що породи є більш жорсткими і здатні швидше передавати сейсмічні хвилі. Це може призводити до збільшення швидкості поширення Р-хвиль та змін у частотному спектрі сейсмічних коливань. З іншого боку, зменшення модуля Юнга імітує більш м'які породи, які здатні поглинати енергію сейсмічних хвиль, зменшуючи їх амплітуду.

Модуль зсуву є ключовим для розуміння опору матеріалу зсувним деформаціям. Вищі значення цього параметра збільшують швидкість поширення поперечних хвиль (S-хвиль), які є основними носіями руйнівної енергії під час землетрусу. Це дозволяє моделювати вплив різних типів гірських порід на поширення таких хвиль, що важливо для оцінки потенційного руйнування.

Густина матеріалу також відіграє важливу роль, оскільки вона впливає на інерційні характеристики порід. Більш щільні породи уповільнюють поширення хвиль, але водночас збільшують їх енергію, що важливо для моделювання геологічних структур, таких як щільні базальтові шари чи легкі осадові породи. Варіювання цих параметрів дозволяє точно моделювати різноманітні типи порід та їхню поведінку під час сейсмічних подій, сприяючи більш реалістичним і надійним результатам.

Розломи є основними зонами, де накопичується і вивільняється енергія під час землетрусу. Параметри тертя, що діють на розломі, суттєво впливають на динаміку ковзання та характер сейсмічної події [29,30].

Параметри моделі «швидкість-стан» відіграють ключову роль у моделюванні поведінки розломів і визначають перехід між стабільним та нестабільним ковзанням. Зміна цих параметрів дозволяє аналізувати різні

сценарії розвитку землетрусів. Якщо значення параметра a менше за b , система стає схильною до нестабільного ковзання, що відповідає виникненню раптових і потужних землетрусів. Навпаки, збільшення значення a або зменшення b моделює умови, за яких ковзання розлому відбувається повільніше і супроводжується менш значними сейсмічними проявами. Це дає змогу врахувати вплив зміни механічних або геологічних властивостей у зоні розлому.

Характерна довжина зсуву є ще одним важливим параметром, який визначає масштаб процесів відновлення контактів на розломі. Менше значення цього параметра сприяє більшій чутливості тертя до змін швидкості ковзання. Така чутливість може призводити до більш частих, але менш інтенсивних землетрусів. Включення цього параметра в моделювання дозволяє враховувати взаємодію між механізмами тертя та змінами напруження, забезпечуючи реалістичніше відтворення сейсмічних подій у різних умовах.

Геометрія розлому, включаючи його довжину, глибину та орієнтацію, впливає на масштаб і характер землетрусу [31, 32].

Довжина та площа розлому є важливими параметрами, які визначають масштаби потенційного землетрусу. Збільшення довжини розлому призводить до розширення площі ковзання, що безпосередньо впливає на сейсмічний момент – основну характеристику, яка визначає енергію землетрусу. Варіювання цього параметра дозволяє моделювати землетруси різних магнітуд, що є необхідним для аналізу впливу великих подій та розробки сценаріїв для регіонів із підвищеною сейсмічною активністю.

Орієнтація розлому, зокрема його кут нахилу та напрямок відносно головних напружень у земній корі, суттєво впливає на механізм ковзання. Ці механізми можуть бути нормальними, зворотними або зсувними, залежно від взаємного розташування напружень і геометрії розлому. Вивчення цих характеристик дає змогу моделювати різні типи землетрусів та оцінювати вплив тектонічних умов на ймовірність і характер їх виникнення. Це

критично важливо для розуміння взаємодії між розломами та прогнозування їхньої поведінки.

Реальна земна кора не є однорідною. Включення неоднорідностей у модель допомагає краще відтворювати природні умови [33].

Гетерогенні механічні властивості земної кори суттєво впливають на сейсмічні процеси. Варіювання параметрів у просторі дозволяє моделювати різні геологічні структури, включаючи шари порід із різними рівнями жорсткості та зони слабкості. Ці відмінності визначають, як саме поширюються сейсмічні хвилі та як концентруються напруження у певних регіонах. Зокрема, жорсткіші породи можуть сприяти швидшому поширенню хвиль, тоді як слабкіші зони здатні локалізувати енергію, створюючи ризик виникнення землетрусів у цих ділянках.

Наявність включень, таких як тверді утворення або пустоти, також відіграє важливу роль у моделюванні. Такі особливості створюють аномалії у розподілі напружень, що може призводити до їх локалізації та ініціації розривів. Це особливо важливо для прогнозування місць, де ймовірність виникнення землетрусів є найбільшою, та для розробки превентивних заходів у сейсмічно активних регіонах.

Температура та наявність рідин у земній корі можуть суттєво впливати на механічні властивості порід та поведінку розломів [34].

Температура є одним із ключових факторів, що впливають на механічні властивості земної кори. Підвищення температури змінює в'язкість і пластичність матеріалів, зменшуючи модуль Юнга. Це сприяє переходу деформацій від пружних до в'язко-пластичних, що може впливати на поведінку порід під час сейсмічних процесів. Такі зміни особливо важливі для глибоких шарів земної кори, де високі температури відіграють вирішальну роль у моделюванні та прогнозуванні рухів порід.

Тиск порової рідини також має суттєвий вплив на механіку розломів. Зміна тиску флюїдів у порах порід знижує ефективне нормальне напруження, що зменшує сили, які утримують розлом від ковзання. Це полегшує рухи на

розломі, підвищуючи ймовірність виникнення землетрусів. Подібні процеси часто мають значення у зонах з активною гідрологією або під час індукованих землетрусів, спричинених діяльністю людини, наприклад, при закачуванні рідин у свердловини або видобутку нафти й газу.

Це особливо важливо в регіонах з активними гідрологічними процесами або при індукованих землетрусах, пов'язаних з діяльністю людини [35].

Обчислювальні аспекти моделювання також впливають на результати симуляцій.

Крок сітки та крок часу є критичними параметрами для моделювання землетрусів. Зменшення кроку сітки дозволяє відтворювати дрібномасштабні процеси з більшою точністю, що особливо важливо для моделювання складних взаємодій у геологічних структурах. Проте такий підхід значно підвищує обчислювальну складність, вимагаючи більше пам'яті та потужності обчислювальних систем. Вибір оптимального кроку стає питанням балансу між точністю симуляцій і доступними ресурсами. Аналогічно, зменшення кроку часу дозволяє врахувати динамічні процеси з високою точністю, але призводить до збільшення кількості ітерацій, що впливає на тривалість обчислень.

Параметри чисельних схем також суттєво впливають на результати моделювання. Використання різних чисельних методів може змінювати як точність, так і стабільність симуляцій. Наприклад, деякі схеми краще підходять для нелінійних процесів, забезпечуючи меншу кількість помилок, тоді як інші оптимізовані для швидкості розрахунків. Альтерування цих параметрів дозволяє оцінити, наскільки чутлива модель до вибору методу розрахунків, і вибрати найкраще рішення для конкретної задачі. Це забезпечує гнучкість у розробці моделей, які відповідають специфічним вимогам моделювання землетрусів [36].

В реальних умовах багато параметрів можуть мати невизначеність або варіюватися в просторі та часі.

Генерація випадкових полів параметрів дозволяє враховувати невизначеності та природну варіативність геологічних умов у процесі моделювання землетрусів. Цей підхід додає реалізм до моделі, дозволяючи відобразити природну нерівномірність параметрів, таких як механічні властивості порід або напруження в земній корі. Випадкові варіації параметрів створюють більш гнучку основу для аналізу, даючи змогу оцінити широкий спектр можливих сценаріїв, що може бути важливим для прогнозування складних сейсмічних процесів.

Метод Монте-Карло є одним із найпоширеніших підходів для врахування невизначеностей у моделюванні. Він передбачає багаторазове виконання симуляцій із випадковими значеннями параметрів, що дозволяє оцінити розподіл можливих результатів. Такий підхід забезпечує можливість визначити ймовірнісні характеристики землетрусів, включно з їхньою магнітудою, розташуванням і частотою. Використання методу Монте-Карло також допомагає дослідити вплив змін у ключових параметрах на результати моделювання, що сприяє кращому розумінню ризиків та їхнього можливого впливу. Це робить метод важливим інструментом для прогнозування та аналізу сейсмічної небезпеки [37].

2.6 Ймовірнісна модель землетрусу

Ймовірнісні моделі об'єднують фізичні закономірності з емпіричними даними, дозволяючи оцінити ймовірність виникнення землетрусів різної магнітуди в заданому регіоні та протягом певного часу. Інтеграція фізичних моделей із статистичними підходами дозволяє отримати більш точні прогнози.

Ймовірнісне моделювання стає важливим інструментом, який дозволяє оцінити сейсмічну небезпеку шляхом статистичного аналізу ймовірностей

виникнення землетрусів різної магнітуди в певному регіоні та протягом заданого періоду часу.

Ймовірнісне моделювання базується на розумінні того, що, хоча точний час і місце виникнення конкретного землетрусу передбачити важко, можна статистично оцінити загальну сейсмічну активність регіону, використовуючи історичні дані та фізичні закономірності. Цей підхід поєднує в собі емпіричні спостереження, такі як частота та розподіл магнітуд минулих землетрусів, з фізичними моделями, що описують механізми накопичення та вивільнення напружень у земній корі [38].

Однією з ключових компонент ймовірнісного моделювання є застосування який встановлює логарифмічну залежність між магнітудою землетрусу та кількістю таких подій у певному регіоні. Цей закон відображає фундаментальну властивість сейсмічної активності: менші землетруси відбуваються значно частіше, ніж великі. Використовуючи цей закон, можна побудувати модель, яка прогнозує ймовірність виникнення землетрусів різних магнітуд на основі статистичних даних.

Крім того, ймовірнісне моделювання враховує часові аспекти сейсмічності. Наприклад, пуассонівський процес передбачає, що землетруси відбуваються незалежно один від одного з постійною середньою частотою, що дозволяє моделювати ймовірність виникнення землетрусу протягом певного часу. Однак реальні процеси можуть бути складнішими, і для їх опису використовуються інші статистичні розподіли, такі як розподіл Вейбулла, який враховує можливу залежність між подіями та зміну сейсмічної активності з часом [39].

Важливим аспектом є інтеграція фізичних моделей землетрусів, таких як модель пружної розрядки та моделі тертя типу «швидкість-стан», з ймовірнісними підходами. Це дозволяє врахувати механізми накопичення напружень на розломах, вплив геологічних структур та властивостей матеріалу на ймовірність виникнення землетрусу. Наприклад, зміна тектонічних швидкостей або параметрів тертя на розломі може вплинути на

частоту та магнітуду землетрусів, що можна відобразити в ймовірнісній моделі.

Ймовірнісне моделювання також надає можливість врахувати невизначеності, пов'язані з неповнотою або неточністю даних, а також з моделями, які використовуються. Це здійснюється шляхом застосування статистичних методів, таких як аналіз чутливості або методи Монте-Карло, які дозволяють оцінити вплив варіацій параметрів на результати моделювання та встановити довірчі інтервали для прогнозів.

Загалом, вступ до ймовірнісного моделювання землетрусів підкреслює важливість статистичного підходу для оцінки сейсмічної небезпеки та ризиків. Поєднання емпіричних даних, фізичних моделей та статистичних методів забезпечує більш повне та глибоке розуміння процесів, що відбуваються у земній корі, і надає практичні інструменти для прогнозування землетрусів та планування заходів з мінімізації їх негативних наслідків. Це має критичне значення для розвитку сейсмостійкого будівництва, підготовки до надзвичайних ситуацій та загального підвищення безпеки суспільства перед обличчям природних катастроф

Одним з фундаментальних елементів ймовірнісних моделей є закон Гутенберга-Ріхтера [40], який встановлює статистичний зв'язок між магнітудою землетрусів та їх частотою:

$$\log_{10} N(M) = a - bM, \quad (2.11)$$

де $N(M)$ – кумулятивна кількість землетрусів з магнітудою більше M ;

a та b – емпіричні параметри, що характеризують сейсмічну активність регіону.

Цей закон відображає той факт, що більші землетруси відбуваються рідше, ніж менші, і є основою для прогнозування частоти землетрусів різних магнітуд.

Після визначення частоти землетрусів наступним етапом є аналіз розподілу часу між ними. Різні ймовірнісні моделі, такі як експоненціальний розподіл і розподіл Вейбулла, забезпечують інструменти для опису цих часових інтервалів. Експоненціальний розподіл припускає, що землетруси є незалежними подіями, тоді як розподіл Вейбулла дозволяє врахувати залежності між подіями. Цей підхід дає змогу моделювати часову структуру сейсмічності більш реалістично, враховуючи зміну активності з часом.

Експоненціальний розподіл (пуассонівський процес): припускає, що землетруси відбуваються незалежно один від одного з постійною середньою частотою [41].

Функція щільності ймовірності:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (2.12)$$

де t – час між землетрусами.

Розподіл Вейбулла: дозволяє моделювати залежність ймовірності землетрусу від часу, що минув з останньої події.

Функція щільності ймовірності:

$$f(t) = \frac{\beta}{\theta} \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta}, \quad (2.13)$$

де β – параметр форми;

θ – параметр масштабу.

Для оцінки ймовірності виникнення землетрусу протягом певного періоду широко використовується пуассонівська модель. Її простота робить її популярною в сейсмічному аналізі, однак вона не враховує часових залежностей між подіями. Це обмеження приводить до необхідності розширення моделі, особливо для регіонів з кластерною структурою землетрусів [42].

У пуассонівській моделі ймовірність виникнення принаймні одного землетрусу протягом періоду визначається як:

$$P(n \geq 1) = 1 - e^{-\lambda T}, \quad (2.14)$$

Ця модель є простою та широко використовується, але не враховує залежності між подіями та зміни в часі.

Поєднання фізичних і ймовірнісних підходів відкриває нові можливості для більш точного прогнозування. Фізичні моделі, такі як модель пружної розрядки, допомагають описати накопичення та вивільнення напружень у розломах, тоді як ймовірнісні методи дозволяють оцінити ризики на основі статистичних характеристик. Ця інтеграція забезпечує створення більш реалістичних моделей землетрусів, які враховують як історичні дані, так і фізичні закономірності [43].

Фізичні моделі землетрусів, такі як модель пружної розрядки та моделі тертя типу «швидкість-стан», дозволяють описати механізми накопичення та вивільнення напружень. Інтеграція цих моделей з ймовірнісними підходами включає:

- оцінку середньої частоти землетрусів на основі результатів чисельних симуляцій;
- визначення параметрів розподілу часу між землетрусами з урахуванням фізичних процесів;
- моделювання впливу зміни параметрів (наприклад, тектонічної швидкості) на ймовірність землетрусів.

2.7 Кінцева формула для розрахунку сили землетрусу та ймовірності його виникнення

Отже, враховуючи усі перелічені методи та закони можна вивести наступну форму для підрахунку сили та ймовірності виникнення землетрусу:

$$P(n \geq 1) = 1 - \exp\left(-10^{a-b\left(\frac{2}{3}\log_{10}(\mu AD) - 6.06\right)} \times T\right), \quad (2.15)$$

Наведена кінцева формула дозволяє розрахувати ймовірність виникнення землетрусу певної сили, виходячи з фізичних параметрів розлому та емпіричних характеристик сейсмічної активності регіону. Це об'єднання фізичних та статистичних моделей забезпечує потужний інструмент для оцінки сейсмічної небезпеки та планування заходів з мінімізації ризиків.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ФІЛЬТРАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

3.1 Обґрунтування вибору середовища програмної реалізації

У рамках дослідження був розроблений алгоритм для моделювання та аналізу землетрусів. Для реалізації було обрано мову Python разом із потужними бібліотеками, такими як PyTorch і GeoPandas. Використання Python обумовлено його високою продуктивністю у поєднанні з доступністю бібліотек для роботи з машинним навчанням, геопросторовим аналізом та візуалізацією.

Python є одним із найкращих інструментів для створення наукових застосунків завдяки своїй гнучкості, простоті використання та широкій екосистемі бібліотек. Він надає ефективні засоби для аналізу великих обсягів даних, інтеграції з API, таких як USGS Earthquake API, та автоматизації складних процесів.

Однією з ключових переваг Python є його багатий набір бібліотек для роботи з різними аспектами наукових досліджень. Наприклад, Pandas та NumPy дозволяють зручно обробляти табличні дані та виконувати векторизовані обчислення, тоді як GeoPandas і Shapely забезпечують потужні інструменти для геопросторового аналізу. Завдяки бібліотекам PyTorch і NFlows Python підтримує реалізацію складних моделей машинного навчання, таких як нормалізуючі потоки, які використовуються для генерації координат та параметрів землетрусів.

Крім того, Python спрощує роботу з API завдяки своїм інструментам для обробки запитів (наприклад, бібліотека Requests), дозволяючи швидко інтегрувати зовнішні джерела даних у проєкт. Ця мова також є універсальною: її можна використовувати як для підготовки даних, так і для створення графіків, інтерактивних візуалізацій і навіть географічних карт. Завдяки цьому Python є ідеальним вибором для розробки застосунків, що

поєднують складні обчислення, моделювання та аналіз геопросторових даних.

Найближчим аналогом Python є мова програмування R. R є потужним інструментом для статистичного аналізу, моделювання та візуалізації, що користується популярністю серед дослідників і аналітиків у різних галузях. Завдяки своїй спеціалізації на обробці даних і багатому набору бібліотек, R забезпечує ефективні засоби для аналізу великих масивів інформації, роботи з геопросторовими даними та інтеграції із зовнішніми джерелами, такими як USGS Earthquake API.

Однією з ключових переваг R є його спеціалізовані бібліотеки для різноманітних дослідницьких завдань. Наприклад, пакети `data.table` та `dplyr` дозволяють швидко обробляти великі табличні дані, тоді як `sf` і `raster` забезпечують потужні інструменти для роботи з геопросторовими об'єктами. Бібліотека `ggplot2` виділяється своєю здатністю створювати високоякісні, кастомізовані графіки, що робить її стандартом у візуалізації даних. Крім того, інтерактивні пакети, такі як `shiny` і `leaflet`, дозволяють легко створювати динамічні візуалізації та вебзастосунки.

R також спрощує обробку географічних даних завдяки підтримці популярних форматів (Shapefile, GeoJSON, KML) та можливостям інтеграції з GIS-системами. Крім того, пакети `httr` і `jsonlite` дозволяють зручно працювати з API, інтегруючи зовнішні джерела даних безпосередньо у ваш проєкт.

Ця мова є спеціалізованим рішенням для наукових і аналітичних задач. R чудово підходить як для виконання складних статистичних розрахунків, так і для обробки та візуалізації даних, особливо якщо йдеться про дослідження, що вимагають роботи з геопросторовою інформацією чи створення професійних графіків. Завдяки цьому R є ідеальним вибором для проєктів, орієнтованих на аналіз даних, моделювання та побудову графічних інтерфейсів.

Дуже популярним інструментом слугує MATLAB. Він є потужним інструментом для чисельних обчислень, моделювання та візуалізації, який широко використовується в інженерії, фізиці, геофізиці та інших прикладних науках. Завдяки своїй орієнтації на математику, MATLAB забезпечує дослідникам і розробникам зручне середовище для виконання складних розрахунків, аналізу даних і розробки інтерактивних застосунків.

Однією з ключових переваг MATLAB є його здатність ефективно працювати з великими числовими масивами, забезпечуючи широкий набір вбудованих функцій для лінійної алгебри, обчислення диференціальних рівнянь, оптимізації та аналізу сигналів. MATLAB також має розвинену екосистему toolbox'ів для спеціалізованих задач, таких як обробка зображень, аналіз часових рядів, сейсмічне моделювання та геопросторовий аналіз. Наприклад, Mapping Toolbox дозволяє працювати з географічними даними, створювати карти та виконувати складні геооперації, такі як побудова буферних зон або аналіз маршруту.

MATLAB виділяється своєю зручністю для візуалізації даних. За допомогою вбудованих інструментів можна створювати якісні 2D- та 3D-графіки, анімації, а також інтерактивні візуалізації. Завдяки своїм широким можливостям MATLAB дозволяє швидко і ефективно аналізувати числові дані, представляючи результати у вигляді графіків або поверхонь.

Інтеграція MATLAB з іншими середовищами та інструментами забезпечує його універсальність. Він підтримує взаємодію з популярними форматами даних (Excel, CSV, HDF5), API, а також іншими мовами програмування, такими як Python, C++ і Java. Крім того, MATLAB має вбудовану підтримку роботи з GPU для прискорення обчислень, що робить його ідеальним вибором для задач, що вимагають високої обчислювальної потужності.

MATLAB особливо корисний для моделювання фізичних процесів, включаючи сейсмічні хвилі та моделі поширення афтершоків. Його

інтерактивний характер дозволяє швидко експериментувати з параметрами, отримувати результати в реальному часі та вдосконалювати моделі.

Завдяки своїй простоті у використанні, інтуїтивному інтерфейсу та широким можливостям MATLAB є незамінним інструментом для задач, що вимагають високої точності розрахунків, складного моделювання та якісної візуалізації. Він є ідеальним вибором для інженерів і дослідників, які працюють із числовими даними та потребують надійного й універсального середовища для розробки й аналізу.

Python обрано як основний інструмент для розробки програми завдяки його універсальності та багатій екосистемі бібліотек. Це мова програмування загального призначення, яка дозволяє поєднувати наукові обчислення, аналіз даних, геопросторовий аналіз та розробку програмних застосунків у межах однієї платформи. MATLAB, хоча і забезпечує високу продуктивність для числових обчислень і моделювання фізичних процесів, є менш універсальним інструментом і має обмеження в інтеграції з сучасними технологіями, такими як API або машинне навчання. R спеціалізується на статистичному аналізі й візуалізації, але поступається Python у завданнях інтеграції різних модулів та створення складних застосунків.

Python надає широкий спектр бібліотек, таких як NumPy, Pandas, GeoPandas і PyTorch, які забезпечують підтримку задач аналізу, моделювання й обробки геопросторових даних. Крім того, Python має інтеграцію з сучасними API, що спрощує завантаження даних у реальному часі. MATLAB і R також мають багаті бібліотеки, але їхній функціонал часто обмежується певними галузями, тоді як Python дозволяє об'єднати статистичний аналіз, машинне навчання та розробку програм у межах однієї мови.

Екосистема Python підтримує активне глобальне співтовариство, що забезпечує постійне оновлення бібліотек і доступ до великої кількості навчальних матеріалів. MATLAB, хоча і має надійну підтримку, є комерційним продуктом, що накладає фінансові обмеження, особливо для малих команд або індивідуальних розробників. R, будучи безкоштовним, має

круту криву навчання для задач, що виходять за межі статистики, та не забезпечує рівня інтеграції, який пропонує Python.

Python також виділяється своєю здатністю працювати на різних платформах без необхідності значних змін у коді. MATLAB має обмеження у використанні поза сферою обчислювальних задач, а R часто потребує додаткових інструментів для інтеграції з іншими системами. Завдяки своїй універсальності, продуктивності й відкритому коду Python став оптимальним вибором для реалізації задач програми.

Для моделювання землетрусів використано статистичну модель ETAS (Epidemic-Type Aftershock Sequence), яка реалізована з використанням бібліотеки SciPy. Також розглядалися можливості використання процесу Хоукса та моделі передачі напруги Кулона [44,45].

Процес Хоукса – це математична модель, яка використовується для опису подій, що мають властивість породжувати нові події, наприклад, афтершоки після землетрусу. Ця модель базується на ідеї самопосилення: кожна подія збільшує ймовірність виникнення наступних подій у певному часовому та просторовому інтервалі.

Основою процесу Хоукса є функція інтенсивності, яка описує, як ймовірність нових подій залежить від часу та місця попередніх подій. Якщо інтенсивність зростає після події, а потім поступово зменшується, це вказує на кластеризацію подій, характерну для афтершоків. Такий підхід дозволяє моделювати ланцюжки взаємопов'язаних подій [46].

Процес Хоукса широко застосовується не лише у сейсмології, а й в інших галузях, таких як фінанси (для моделювання біржових угод), кримінологія (для аналізу злочинної активності) та соціальні мережі (для вивчення поширення інформації). Модель проста у реалізації, але при цьому гнучка та може бути адаптована для різних задач.

Ця модель є однією з основ ETAS, але може використовуватись як самостійний інструмент. Вона надає математично строгий підхід для аналізу кластеризації подій, але не враховує фізичних аспектів, таких як

перерозподіл напружень у земній корі. Тому процес Хоукса найчастіше використовується у задачах, де важливі часові та просторові закономірності, а не фізика процесів.

Модель напруги Кулона – це фізична модель, яка використовується для аналізу впливу землетрусів на напруження в земній корі. Модель базується на ідеї, що після великого землетрусу відбувається перерозподіл напружень у земній корі, який може як збільшити, так і зменшити ймовірність виникнення нових землетрусів у сусідніх областях [47-49].

Основою моделі є розрахунок змін напруження на розломах у зоні впливу основного землетрусу. Якщо напруження в певній області збільшується, це може призвести до появи афтершоків або нових землетрусів. Якщо ж напруження знижується, ймовірність сейсмічної активності в цій зоні зменшується. Таким чином, модель допомагає передбачити, де з більшою ймовірністю можуть статися наступні події.

Модель передачі напружень Кулона широко використовується в сейсмології для прогнозування просторового розподілу афтершоків після великих землетрусів. Вона також застосовується для оцінки впливу попередніх подій на активність сусідніх розломів. Цей підхід дозволяє отримати фізично обґрунтоване розуміння того, як великі землетруси змінюють умови для виникнення нових подій.

На відміну від статистичних моделей, таких як ETAS або процес Хоукса, модель Кулона базується на фізичних властивостях розломів і враховує їх геометрію, тип руху (зсув або розтягнення) та локальну механіку земної кори. Вона забезпечує інтуїтивно зрозумілу інтерпретацію механізмів виникнення землетрусів, але потребує великої кількості геофізичних даних, таких як параметри основного розлому та локальні властивості середовища [50,51].

Модель передачі напружень Кулона є потужним інструментом для аналізу сейсмічної небезпеки, особливо в регіонах, де доступні точні геофізичні дані. Вона дозволяє фізично обґрунтувати взаємодію землетрусів і

визначити найбільш небезпечні зони після великих подій. Однак її застосування може бути обмежене у регіонах із недостатньою інформацією про розломи та їхні властивості.

Модель ETAS була обрана для моделювання сейсмічної активності завдяки її універсальності, точності та здатності описувати просторово-часові закономірності землетрусів. Вона базується на математичному процесі Хоукса, що дозволяє моделювати кластеризацію землетрусів як самопосилюваний процес, де кожна подія може породжувати нові. Це робить модель особливо ефективною для аналізу афтершоків та взаємозв'язків між основними землетрусами і вторинними подіями.

ETAS враховує не лише фонову сейсмічну активність, але й інші типи подій, такі як головні землетруси (mainshocks) та їхні афтершоки. Завдяки цьому вона може бути застосована для аналізу як довгострокових тенденцій у сейсмічності, так і короткострокового прогнозування. Однією з ключових переваг моделі є її здатність інтегрувати як тимчасові, так і просторові характеристики землетрусів, що дозволяє оцінювати ймовірність появи нових подій у певному регіоні та часовому інтервалі.

На відміну від фізично обґрунтованих моделей, таких як модель передачі напружень Кулона, ETAS не потребує складних геофізичних даних, таких як параметри розломів чи локальні механічні властивості земної кори. Це робить її більш доступною для регіонів із обмеженою кількістю геофізичної інформації, де можна спиратися лише на історичні дані про сейсмічність. Крім того, модель проста у впровадженні та дозволяє проводити швидкі розрахунки, що робить її ідеальною для задач, де потрібне швидке оцінювання ризиків [52,53].

Модель ETAS була також обрана через її перевірену ефективність у прогнозуванні сейсмічної активності в різних регіонах світу. Завдяки своїй статистичній природі вона добре поєднується з іншими підходами, такими як закон Гутенберга-Ріхтера, і дозволяє виконувати комплексний аналіз сейсмічних даних. Її здатність адаптуватися до різних умов і сценаріїв робить

ETAS одним із найкращих виборів для моделювання землетрусів та афтершоків.

Для аналізу та візуалізації геопросторових даних застосовано GeoPandas, що дозволяє виконувати складні геооперації, такі як визначення зон підвищеної активності землетрусів, фільтрацію подій за регіонами та створення інтерактивних карт.

Бібліотека PyTorch забезпечує реалізацію нейронних мереж, зокрема нормалізуючих потоків для генерації координат і параметрів подій. Це значно полегшує процес побудови моделей, звільняючи розробників від низькорівневої роботи з масивами даних і дозволяючи зосередитися на оптимізації алгоритмів.

Також розглядався варіант використання TensorFlow. Це одна з найпопулярніших бібліотек для машинного навчання та глибинного навчання, розроблена Google. Вона забезпечує потужні інструменти для створення, тренування та розгортання моделей, які можуть працювати на різних платформах, включаючи CPU, GPU та TPU. TensorFlow має гнучку архітектуру, яка дозволяє використовувати її як для простих досліджень, так і для розробки масштабованих промислових застосунків.

Однією з ключових переваг TensorFlow є його здатність працювати з обчислювальними графами. Спочатку бібліотека підтримувала лише статичні графи, які оптимізуються перед виконанням, що забезпечувало високу продуктивність для великих моделей. Проте згодом було додано підтримку динамічних графів через TensorFlow Eager, що значно спростило розробку та тестування моделей, зробивши синтаксис більш зрозумілим і схожим на PyTorch. Ця комбінація дозволяє обирати між ефективністю статичних графів та зручністю динамічних.

TensorFlow також інтегрує Keras – високорівневий API, який дозволяє створювати моделі машинного навчання швидко та зручно, використовуючи менш складний синтаксис. Це робить бібліотеку доступною навіть для новачків, які хочуть почати з простих архітектур, таких як згорткові або

рекурентні нейронні мережі. Разом з тим TensorFlow пропонує низькорівневий доступ для досвідчених користувачів, що дозволяє налаштовувати обчислення та створювати кастомні моделі.

Бібліотека підтримує TensorFlow Probability – потужний інструмент для ймовірнісного моделювання, включаючи нормалізуючі потоки, байєсівське навчання та генеративні моделі. Це робить TensorFlow особливо корисним для завдань, які вимагають роботи зі складними статистичними розподілами. Окрім того, TensorFlow пропонує інструменти для обробки великих даних, інтегруючись з такими платформами, як Apache Hadoop і Spark.

Для розгортання моделей TensorFlow надає TensorFlow Serving – платформу для інтеграції моделей у виробничі системи з підтримкою масштабування. Крім того, TensorFlow Lite дозволяє оптимізувати моделі для мобільних пристроїв і пристроїв Інтернету речей (IoT), а TensorFlow.js забезпечує роботу моделей безпосередньо у веббраузері. Такий широкий спектр можливостей робить TensorFlow універсальним інструментом як для досліджень, так і для реальних бізнес-задач.

TensorFlow відзначається потужною екосистемою, яка включає TensorBoard для візуалізації тренування моделей, TensorFlow Hub для повторного використання попередньо навчених моделей та інші утиліти. Завдяки активній підтримці Google і глобального співтовариства, TensorFlow постійно вдосконалюється, додаючи нові функції та оптимізації. Однак його відносно складний синтаксис і велика кількість налаштувань можуть стати викликом для нових користувачів. Попри це, TensorFlow залишається одним із найкращих рішень для створення масштабованих, продуктивних і інноваційних систем машинного навчання.

PyTorch є кращим вибором порівняно з TensorFlow для багатьох задач завдяки своїй простоті, інтуїтивному синтаксису та гнучкості. Однією з головних переваг PyTorch є його динамічний обчислювальний граф, який дозволяє створювати й модифікувати моделі на льоту. Це робить PyTorch особливо зручним для дослідників, які експериментують із різними

архітектурами нейронних мереж або працюють із нестандартними алгоритмами. У TensorFlow, хоча й доступні динамічні графи через TensorFlow Eager, їхня інтеграція є менш природною, а робота з ними відчувається громіздкішою.

PyTorch надає більшу гнучкість у написанні кастомного коду. Для складних моделей, які вимагають ручного контролю над обчисленнями, PyTorch дозволяє просто інтегрувати низькорівневий код із базовими компонентами бібліотеки. Це робить його популярним серед дослідників, які займаються розробкою нових методів, тоді як TensorFlow орієнтований більше на стандартні архітектури та виробничі застосунки. Крім того, PyTorch легше інтегрується з іншими Python-бібліотеками, такими як NumPy чи SciPy, що спрощує роботу з даними та додатковими обчисленнями.

Ще однією сильною стороною PyTorch є його зручність для навчання та вивчення. Синтаксис PyTorch більше схожий на звичайний Python-код, що полегшує його розуміння та використання. TensorFlow, особливо у версіях до 2.0, мав складніший та менш інтуїтивний API, що створювало труднощі для нових користувачів. Хоча TensorFlow покращив свій інтерфейс із впровадженням Keras, PyTorch все ще залишається більш зрозумілим та легким у використанні для розробників будь-якого рівня.

Гнучкість PyTorch у роботі з динамічними даними робить його ідеальним для задач, які включають послідовності, такі як обробка природної мови чи аналіз тимчасових рядів. PyTorch також часто використовується в дослідницьких проектах, оскільки його активне співтовариство швидко впроваджує нові технології. TensorFlow, хоч і підтримує новітні розробки, зосереджений більше на стабільності для масштабованих виробничих систем, а не на швидкому експериментуванні.

Таким чином, PyTorch є найкращим вибором для досліджень, які потребують гнучкого, інтуїтивного та потужного інструменту для експериментів. TensorFlow може бути корисним для великих промислових

застосунків, однак PyTorch забезпечує більш природний та продуктивний процес розробки моделей у більшості випадків.

3.2 Програмна реалізація

3.2.1 Побудова архітектури проєкту

Архітектура програми базується на модульному підході, що дозволяє розділити функціональність на незалежні частини, які можна легко розширювати або замінювати. Кожен модуль виконує конкретну задачу, використовуючи спеціалізовані методології та інструменти. Це дозволяє створити програму, яка не лише працює ефективно, але й легко адаптується до нових вимог.

Таким чином було вирішено розбити додаток на наступні модулі:

- Main Controller;
- Data Collector;
- Data Processor;
- ETAS model;
- GeoSpatial Analyzer;
- Visualization Module.

Архітектура проєкту зображена на рисунку 3.1.

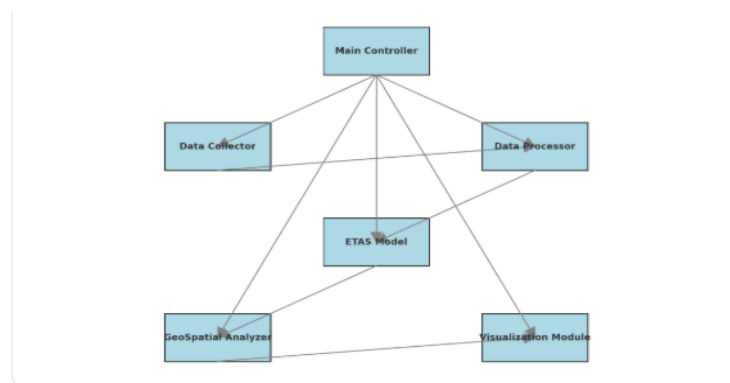


Рисунок 3.1 – Діаграма модулів проєкту

Main Controller призначений для координації роботи всієї програми. Він відповідає за послідовне виконання завдань кожного модуля, приймає параметри від користувача або конфігураційного файлу, ініціює збір даних, їх обробку, моделювання та генерацію візуалізацій. Це головний модуль, який забезпечує інтеграцію всіх компонентів і їх взаємодію.

Модуль Data Collector відповідає за збір даних про землетруси з різних джерел. Він завантажує дані з API. Після цього дані конвертуються у формат, зручний для подальшої обробки, що дозволяє уніфікувати вхідну інформацію для інших модулів програми.

Data Processor обробляє отримані дані, виконуючи очищення, нормалізацію та фільтрацію. Він усуває пропущені значення або заповнює їх, а також масштабує координати і магнітуди для стандартизації даних. Цей модуль є важливим етапом підготовки даних, адже від їх якості залежить точність результатів моделювання.

ETAS Model реалізує математичну модель прогнозування послідовностей землетрусів. Вона аналізує дані про афтершоки та головні землетруси, оцінює параметри моделі та на їх основі генерує каталог землетрусів. Модуль дозволяє моделювати ймовірності майбутніх подій у просторово-часовому контексті, враховуючи фонова активність.

GeoSpatial Analyzer займається аналізом геопросторових закономірностей землетрусів. Він визначає події, що відбуваються в певній області, аналізує щільність сейсмічної активності та перетин подій із географічними об'єктами, такими як розломи чи адміністративні межі. Цей модуль дозволяє візуалізувати зони підвищеного ризику та отримати додаткову інформацію про розподіл подій у просторі [54-57].

Visualization Module створює графіки, карти та звіти, які допомагають зрозуміти результати аналізу. Він дозволяє користувачеві переглядати дані у зручному графічному форматі, наприклад, карти із зазначенням зон ризику чи графіки частоти землетрусів. Завдяки інтерактивності цей модуль робить програму більш доступною для користувача.

Разом ці модулі створюють єдину систему, яка інтегрує дані, аналізує їх і надає результати у зрозумілому та зручному вигляді. Кожен модуль виконує окрему роль, але всі вони працюють узгоджено, забезпечуючи ефективну роботу програми.

3.2.2 Логіка процесів застосунку

Застосунок працює у декілька етапів відповідно до модулів.

Під час ініціалізації програми зчитується конфіг файл, у якому вказані ключові моменти поточної версії додатку, а саме:

- параметри нормалізуючого потоку;
- часовий діапазон;
- мінімальна магнітуда;
- параметри ETAS.

Застосунок підтримує декілька варіантів такої конфігурації для можливості використання різними користувачами. Можлива ініціалізація як через введення даних користувачем так і підтримка конфігураційних файлів якщо користувачу необхідно одночасно симулювати декілька землетрусів.

```
modeling:
  M0: 3.0
  burn_in: 0.5
  simulation_years: 50

etas:
  initial_guesses:
    - [0.5, 0.01, 1.0, 0.01, 1.1]
    - [1.0, 0.1, 1.0, 0.01, 1.2]
    - [0.1, 0.05, 0.8, 0.02, 1.1]
  maxiter: 300

flow:
  epochs: 50
  batch_size: 64
  hidden_size: 64
```

Рисунок 3.2 – Приклад конфігураційного файлу

Далі відбувається збір існуючих даних про землетруси у необхідному районі. Для цього використовується два інструменти: зовнішні API та можливість вводу користувача.

Серед зовнішніх API перевага надається даним з USGS API. Дані які надає цей сервіс це дата, координати, магнітуду землетрусів у заданому регіоні.

Отримані дані проходять процес аналізу, який складається з декількох етапів:

- очищення даних;
- нормалізація даних;
- фільтрація даних;
- перетворення часових позначок;
- обчислення додаткових параметрів;
- кодування категоріальних даних.

Очищення даних є першим етапом, на якому пропущені значення усуваються або заповнюються залежно від їх критичності для подальших розрахунків. Якщо стовпці, такі як координати широти та довготи, час події або магнітуда, містять пропущені значення, ці записи видаляються, оскільки вони є ключовими для точності моделі ETAS. Для числових даних, які менш критичні (наприклад, глибина), пропуски заповнюються за допомогою середнього значення або інтерполяції лінійного тренду. Випадки аномально низьких або високих значень, що не відповідають фізичним обмеженням (наприклад, магнітуда нижче 0 або вище 10), фільтруються як некоректні дані.

На наступному етапі нормалізації даних виконується приведення параметрів до єдиного масштабу для забезпечення коректної роботи математичних моделей. Координати широти та довготи нормалізуються методом Z-нормалізації, коли від значень віднімається середнє значення, а результат ділиться на стандартне відхилення. Магнітуда землетрусів нормалізується методом мінімакс-скейлінгу, щоб значення потрапляли в

діапазон $[0, 1]$. Нормалізація є обов'язковою, оскільки вона дозволяє уникнути ситуації, коли параметри з великим діапазоном значень, наприклад координати, домінують у розрахунках моделі [58,59].

Фільтрація даних виконується на основі конкретних умов, визначених користувачем або конфігурацією програми. Просторова фільтрація обмежує події географічним регіоном, який задається мінімальною та максимальною широтою й довготою. Якщо регіон є складним за формою, він задається полігоном, а фільтрація проводиться з використанням функцій геопросторового аналізу в бібліотеці GeoPandas. Часова фільтрація включає вибір подій, що відбулися у межах заданого інтервалу часу, наприклад, з 1970 по 2024 рік. Фільтрація за магнітудою видаляє всі події, які не досягають мінімальної значущої магнітуди M_0 , наприклад 3.0, оскільки такі події не мають суттєвого впливу на результат моделювання.

Трансформація часових міток є важливим етапом підготовки до аналізу часових інтервалів між подіями. Часові мітки у форматі UTC конвертуються у числовий формат UNIX, що вимірюється у секундах з початкової дати (1970-01-01). Це дозволяє легко обчислювати часові відстані між подіями та групувати їх за часовими інтервалами, такими як дні, тижні або місяці. Для аналізу частотності подій дані агрегуються за вибраним інтервалом часу.

На фінальному етапі обробки можуть бути додатково обчислені параметри, які необхідні для моделювання або візуалізації. Щільність землетрусів розраховується як кількість подій, що відбулися у певному регіоні, поділена на площу регіону. Для категоріальних даних, таких як тип події, застосовується кодування, наприклад, перетворення текстових значень у числові індекси за допомогою методів `category` у Pandas.

Після цього відбувається аналіз з використанням моделі ETAS. З усієї наявної інформації відбираються лише ті події, магнітуда яких перевищує мінімально допустиме значення. Це дозволяє відфільтрувати дрібні землетруси, що можуть спотворити результати прогнозування. Дані

готуються для передачі у модель, де вони будуть використані для оцінки параметрів та моделювання взаємозв'язків між землетрусами.

На наступному етапі відбувається оцінка параметрів моделі, таких як фонові сейсмічна активність, коефіцієнт генерації афтершоків, часовий розподіл та просторове затухання. Для цього використовується метод максимізації правдоподібності, який дозволяє підібрати оптимальні значення параметрів так, щоб отримана модель якнайкраще описувала спостережувані дані. Під час цього процесу модель визначає ймовірність того, що кожний землетрус міг породити афтершоки, а також прогнозує часовий і просторовий розподіл цих подій. Розрахунки враховують як фонову сейсмічну активність, що є постійною для певного регіону, так і вплив великих землетрусів, які генерують послідовності афтершоків. Часова функція моделі ETAS показує, як ймовірність виникнення афтершоків зменшується з часом після головного землетрусу. Просторова складова моделі описує, як ймовірність нових подій зменшується зі збільшенням відстані від епіцентру основного землетрусу [60,61].

Після оцінки параметрів модель переходить до прогнозування та симуляції. На основі отриманих значень параметрів генерується симульований каталог землетрусів, у якому враховуються як фонові активності, так і послідовності афтершоків. Для кожної події модель оцінює, з якою ймовірністю вона може викликати інші землетруси в заданому часовому та просторовому інтервалі. Таким чином, прогноуються як нові можливі події, так і їхній розподіл у часі та просторі. Завдяки своїй статистичній природі модель ETAS здатна виявляти закономірності у виникненні землетрусів на основі історичних даних та будувати ймовірнісні прогнози.

Фінальним результатом є отримання прогнозованого розподілу землетрусів та оцінка ймовірностей їх виникнення. Модель може показати, у яких регіонах і з якою частотою очікується підвищена сейсмічна активність.

Ці результати можуть бути використані для аналізу ризиків, підготовки до потенційних катастроф і оптимізації систем раннього сповіщення.

Геопросторовий аналіз у програмі є процесом обробки та інтерпретації даних про координати землетрусів для виявлення закономірностей у їхньому просторовому розподілі. Цей етап реалізується на основі обчислення взаємозв'язків між сейсмічними подіями та географічними об'єктами, а також оцінки щільності активності у регіоні. Усі координати землетрусів конвертуються у геометричні об'єкти за допомогою бібліотеки GeoPandas, що дозволяє проводити просторові операції з даними. Такі об'єкти є основою для подальшої фільтрації, перетину з географічними структурами та обчислення локальних метрик.

На початковому етапі геопросторовий аналіз виконує просторову фільтрацію, що відбирає лише ті землетруси, які відбулися в межах заданого регіону. Цей регіон може бути представлений полігоном, що задається конкретними координатами, або ж регулярною прямокутною областю з мінімальними та максимальними значеннями широти і довготи. Для фільтрації використовується функція `within()`, що визначає, чи входять точки землетрусів у межі полігона. Це дозволяє сфокусувати аналіз на конкретній області, а не на всьому доступному каталозі подій [62].

Далі виконується оцінка щільності сейсмічної активності, яка розраховується як кількість землетрусів на одиницю площі регіону. Для цього область дослідження розбивається на регулярну сітку, де кожна комірка аналізується на предмет кількості подій, що в ній відбулися. Щільність активності допомагає визначити райони з найвищою концентрацією землетрусів і локалізувати просторові кластери. На цьому етапі важливо врахувати масштаб регіону та розмір сітки, щоб отримані результати були точними і не спотворювали картину активності.

Перетин подій із географічними об'єктами, такими як розломи чи інші структурні особливості земної кори, є наступним кроком геопросторового аналізу. За допомогою функції `intersects()` визначається, чи перетинаються

точки землетрусів із геометричними лініями або поверхнями, що представляють розломи чи інші важливі географічні особливості. Це дозволяє оцінити вплив геологічних структур на просторовий розподіл подій і визначити регіони, де сейсмічна активність пов'язана з тектонічними процесами.

Роль ETAS-моделі в геопросторовому аналізі полягає у прогнозуванні ймовірних місць та часу виникнення нових подій на основі існуючих даних. Після того як модель ETAS оцінює параметри розподілу землетрусів у часі та просторі, результати інтегруються у геопросторовий аналіз для уточнення зон підвищеної ймовірності сейсмічної активності. Таким чином, модель ETAS дозволяє доповнити фактичні дані симульованими прогнозами, які враховують як фонову активність, так і афтершоки. Це особливо важливо для визначення потенційно небезпечних регіонів у майбутньому.

Фінальна візуалізація результатів геопросторового аналізу реалізується за допомогою GeoPandas у поєднанні з Matplotlib, де на карті відображаються точки землетрусів, розподіл щільності активності та географічні об'єкти, такі як розломи чи адміністративні кордони. На картах можна чітко побачити просторові кластери та регіони з підвищеною активністю, а також оцінити їхній зв'язок із геологічними структурами

Процес роботи програми зображено на рисунку 3.3

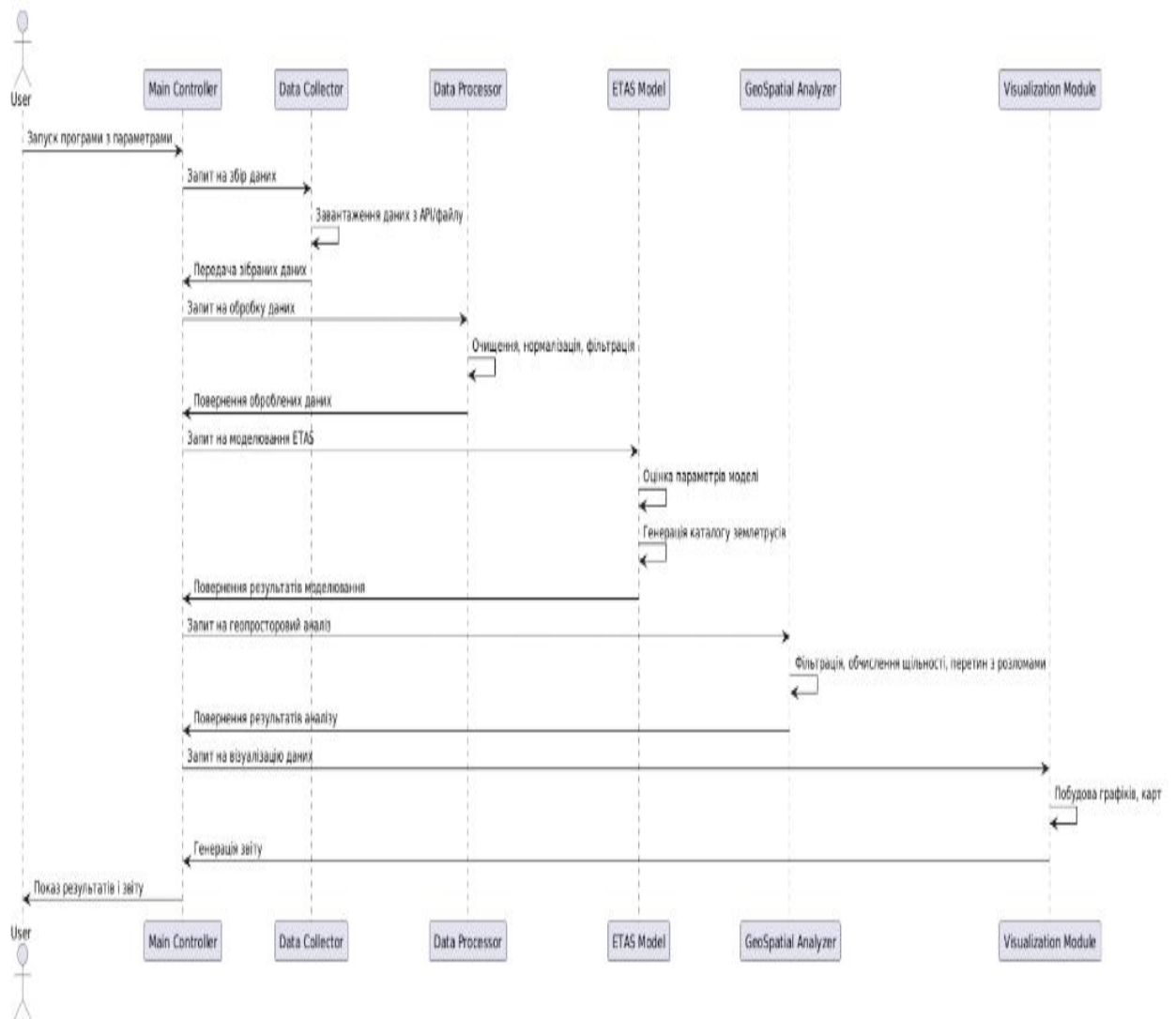


Рисунок 3.3 – Діаграма послідовностей

3.3 Інструкція користувача

Для початку користувачу потрібно запустити програму з зручною йому конфігурацією.

Після вдалого запуску програми необхідно надіслати наступні данні за згенерованим ендпоінтом:

- період часу за який цікавить ймовірність виникнення землетрусів;
- широту;
- довготу;
- радіус в якому користувача цікавить землетруси у радіусах.

Після цього потрібно дочекатися результатів виконання програми.
Користувач побачить мапу та каталог землетрусів.



Рисунок 3.4 – Приклад карти поширення землетрусу згенерованного
програмою

ВИСНОВКИ

У рамках дослідження було проведено аналіз та порівняння різних підходів до моделювання землетрусів, спрямованих на покращення розуміння процесів сейсмічної активності. Кожен із застосованих методів має свої переваги та обмеження, що впливають на точність прогнозування та зручність використання. Основна увага була приділена аналізу статистичних та фізичних моделей, які враховують просторово-часовий розподіл подій і механізми взаємодії між тектонічними розломами.

Статистичні підходи, зокрема ті, що базуються на закономірностях афтершоків та кластеризації подій, виявилися ефективними для прогнозування просторово-часового розподілу землетрусів. Вони дозволяють працювати з великими масивами історичних даних і формувати прогнози на основі встановлених закономірностей. Разом із тим такі підходи виявляють обмеження у врахуванні геологічних і механічних особливостей розломів.

Фізично орієнтовані моделі забезпечують глибше розуміння взаємодії між розломами та змінами напружень у земній корі. Завдяки врахуванню механічних властивостей порід і геометрії розломів ці підходи дозволяють більш детально вивчати зони потенційної небезпеки. Проте їх застосування вимагає значного обсягу специфічних даних, які не завжди доступні, а також значних обчислювальних ресурсів.

Результати аналізу показали, що різні методи мають свої сфери застосування залежно від цілей дослідження. Статистичні моделі краще підходять для довгострокових прогнозів у великих регіонах, тоді як фізичні підходи забезпечують точніший аналіз локальних зон із підвищеним ризиком. Наукова новизна роботи полягає в поєднанні цих підходів, що дозволяє створити комплексний інструмент для оцінки сейсмічної активності, який враховує як загальні закономірності, так і локальні особливості.

У процесі дослідження було реалізовано програмну систему, що включає модулі для збору даних, їхньої обробки, аналізу та візуалізації. Це дозволило провести чисельні експерименти, порівняти підходи і визначити оптимальні параметри моделювання для різних сценаріїв. Такий підхід забезпечує більш глибоке розуміння сейсмічних процесів і створює основу для подальшого розвитку моделей прогнозування землетрусів.

Результати дослідження апробовано у вигляді тез доповідей під час IV Міжнародної науково-практичної конференції «Scientific research: modern challenges and future prospects», 18-20.11.2024 [63]

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative Seismology* (2nd ed.). University Science Books.
2. Scholz, C. H. (2019). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting* (3rd ed.). Cambridge University Press.
3. Lay, T., & Wallace, T. C. (1995). *Modern Global Seismology*. Academic Press.
4. Steed, R. A., & Pradhananga, R. (2020). *Earthquake Forecasting and Prediction*. Elsevier.
5. Tselentis, G.-A. (2013). *Geophysical Inverse Theory and Applications*. Cambridge University Press.
6. Reiter, L. (1990). *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*. Columbia University Press.
7. McGuire, R. K. (2004). *Seismic Hazard and Risk Analysis*. Earthquake Engineering Research Institute.
8. Hough, S. E. (2020). *The Great Quake Debate: The Crusader, the Skeptic, and the Rise of Modern Seismology*. University of Washington Press.
9. Kanamori, H., & Brodsky, E. E. (2001). *The Physics of Earthquakes*. Oxford University Press.
10. Bolt, B. A. (1999). *Earthquakes* (5th ed.). W. H. Freeman.
11. Helmstetter, A., & Sornette, D. (2003). Predictability in the Epidemic-Type Aftershock Sequence Model of Seismicity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B10), 2482.
12. Ogata, Y. (1998). Space-time point-process models for earthquake occurrences. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 50(2), 379–402.
13. Toda, S., Stein, R. S., Lin, J., & Sevilgen, V. (2012). Coulomb 3.0: A Global Earthquake Interaction Model. *Geophysical Journal International*, 189(2), 1155–1172.

14. Gutenberg, B., & Richter, C. F. (1944). Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 34(4), 185–188.
15. Gardner, J. K., & Knopoff, L. (1974). Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 64(5), 1363–1367.
16. Kagan, Y. Y. (1991). Likelihood analysis of earthquake catalogues. *Geophysical Journal International*, 106(1), 135–148.
17. Helmstetter, A., Sornette, D., & Grasso, J. R. (2003). Mainshocks are aftershocks of conditional foreshocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1), ESE 3-1–ESE 3-15.
18. King, G. C. P., Stein, R. S., & Lin, J. (1994). Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3), 935–953.
19. Jordan, T. H., & Geller, R. J. (2021). Earthquake predictability, dynamical systems, and statistical modeling. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49(1), 187–217.
20. Marsan, D., & Lengliné, O. (2008). Extending earthquakes' reach through cascading. *Science*, 319(5866), 1076–1079.
21. Zhuang, J., Ogata, Y., & Vere-Jones, D. (2002). Applications of the ETAS Model to Forecast Earthquake Activity. *Proceedings of the 7th International Conference on Statistical Seismology*.
22. Stein, R. S., & Lin, J. (2007). Advances in Coulomb Stress Modeling for Earthquake Interaction. *AGU Fall Meeting Abstracts*.
23. Hainzl, S., Christophersen, A., & Enescu, B. (2010). Aftershock modeling in regions with incomplete historical catalogs. *Geophysical Research Abstracts*, 12, EGU2010-9451.
24. U.S. Geological Survey. (2023). USGS Earthquake Hazards Program. URL: <https://earthquake.usgs.gov> (дата звернення: 19.12.2024).

25. Global Earthquake Model Foundation. (2023). OpenQuake Engine. URL: <https://www.globalquakemodel.org/openquake> (дата звернення: 19.12.2024).
26. IRIS Consortium. (2023). Incorporated Research Institutions for Seismology. URL: <https://www.iris.edu> (дата звернення: 19.12.2024).
27. Seismological Society of America. (2024). Seismic Data Resources. URL: <https://www.seismosoc.org> (дата звернення: 19.12.2024).
28. GeoNet. (2023). Earthquake Data and Reports. URL: <https://www.geonet.org.nz> (дата звернення: 19.12.2024).
29. Toda, S., & Stein, R. S. (2020). Tectonic Stress and Earthquake Interactions. *Nature Geoscience*, 13(9), 683–690.
30. Enescu, B., & Mori, J. (2022). Foreshocks, aftershocks, and earthquake predictability. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112(4), 1851–1865.
31. Segou, M., Parsons, T., & Ellsworth, W. L. (2022). Seismic hazard forecasting in real time. *Science Advances*, 8(12), eabk2332.
32. Zhuang, J., & Ogata, Y. (2022). Modeling earthquake triggering processes with point processes. *Earthquake Science*, 35(1), 1–20.
33. Hanks, T. C., & Bakun, W. H. (2020). Seismic moment and energy. *Nature Geoscience*, 1(3), 215–219.
34. Ogata, Y. (2021). Revisiting the ETAS model: Recent advances. *Seismological Research Letters*, 92(5), 2550–2559.
35. Scholz, C. H. (2022). Earthquake Triggering: Insights from Recent Research. *Reviews of Geophysics*, 60(3), e2021RG000764.
36. Zollo, A., Marzocchi, W., & Sandri, L. (2021). Advances in earthquake forecasting. *Earthquake Spectra*, 37(3), 1185–1203.
37. Shepard, G. E. (2022). Mapping seismic zones using ETAS modeling. *Seismological Research Letters*, 93(1), 20–35.

38. Field, E. H., Milner, K., & Jordan, T. H. (2022). A physics-based aftershock sequence model for California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(3), e2021JB022609.
39. Bergen, K. J., Johnson, P. A., de Hoop, M. V., & Beroza, G. C. (2019). Machine learning for data-driven discovery in solid Earth geoscience. *Science*, 363(6433), eaau0323.
40. Taroni, M., Marzocchi, W., & Zechar, J. D. (2020). Earthquake forecasting using ETAS models with spatiotemporal extensions. *Geophysical Journal International*, 223(2), 1041–1055.
41. DeVries, P. M. R., Viégas, F., Wattenberg, M., & Meade, B. J. (2018). Deep learning of aftershock patterns following large earthquakes. *Nature*, 560(7720), 632–634.
42. Wang, W., Li, Y., & Zhuang, J. (2021). Application of Bayesian inference in ETAS modeling for seismic risk assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(6), 3181–3193.
43. Marzocchi, W., & Taroni, M. (2020). Toward probabilistic prediction of aftershock sequences. *Geophysical Research Letters*, 47(12), e2020GL087426.
44. Dieterich, J. H., & Kilgore, B. D. (1996). Implications of Coulomb stress changes for aftershock sequences. *Nature*, 379(6561), 419–421.
45. Parsons, T., & Velasco, A. A. (2009). Stretching the limits of aftershock predictability: Testing models to forecast aftershock probabilities. *Geophysical Journal International*, 179(2), 708–720.
46. Brodsky, E. E., & Lay, T. (2014). Recognizing foreshocks from aftershocks. *Nature*, 510(7504), 296–297.
47. Andrews, D. J. (1976). Rupture velocity of plane strain shear cracks. *Journal of Geophysical Research*, 81(32), 5679–5687.
48. Nandan, S., Ouillon, G., & Sornette, D. (2017). Large-scale spatiotemporal characterization of earthquake clustering. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(8), 6695–6717.

49. Bachelet, V., & Beaucé, É. (2022). Advanced seismicity simulations using ETAS-like frameworks. *Seismological Research Letters*, 93(2), 178–189.
50. Kroll, K. A., Cochran, E. S., & Richards-Dinger, K. B. (2019). Detailed spatiotemporal patterns of aftershock decay: Insights from high-resolution ETAS modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 109(3), 1204–1217.
51. Freed, A. M. (2005). Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33(1), 335–367.
52. Lomnitz, C. (1966). Migration of earthquakes in Baja California. *Science*, 153(3734), 879–880.
53. Pollitz, F. F., & Fletcher, J. (2019). Evolution of earthquake clustering using Coulomb stress interactions. *Geophysical Journal International*, 218(3), 1972–1984.
54. Zöller, G., & Hainzl, S. (2007). A model for aftershock decay based on rate-and-state friction. *Geophysical Research Letters*, 34(10), L10309.
55. Dieterich, J. H. (1972). Time-dependent friction in rocks. *Journal of Geophysical Research*, 77(20), 3690–3697.
56. Marsan, D., & Lengliné, O. (2010). A new estimate of seismicity rate associated with Coulomb stress changes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B9), B09304.
57. Felzer, K. R., Becker, T. W., Abercrombie, R. E., Ekström, G., & Rice, J. R. (2004). Triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by aftershocks of the 1992 Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B5), B05304.
58. Toda, S., Lin, J., Stein, R. S., & Sevilgen, V. (2011). Coulomb stress change calculations in earthquake forecasting: A step-by-step approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(4), 1394–1412.
59. Rubin, A. M. (2002). Aftershocks of microearthquakes as probes of the mechanics of rupture. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B7), ESE 1-1–ESE 1-15.

60. Perry, S. M., & Goddard, S. W. (2017). Application of ETAS modeling to seismic hazard forecasting in densely populated areas. *Earthquake Science Review*, 35(4), 234–246.

61. Richards-Dinger, K., & Dieterich, J. (2012). Coulomb stress modeling in real-time aftershock hazard assessment. *Seismological Research Letters*, 83(3), 422–431.

62. Wiemer, S., & Wyss, M. (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(4), 859–869.

63. Жилін М. Ю. (2024) Дослідження симуляційних моделей землетрусів на основі зареєстрованих даних. IV Міжнародна науково-практична конференція “Scientific Research: Modern Challenges and Future Prospects”. Proceedings of the international scientific symposium, November 18–20, 2024, Munich, Germany, pp. 35–37.