

*«3D
моделювання
фізичних полів у
поверхневих
шарах земної
кори методом
скінченних
елементів»*

Аспірант Інституту геофізики ім. С.І.
Субботіна НАН України:

- Рендзеняк Назар Андрійович

Науковий керівник:

- Брич Тарас Богданович - ст.н.с.,
к.т.н.

Київ(Львів) – Вересень 2025

Мета і завдання дослідження

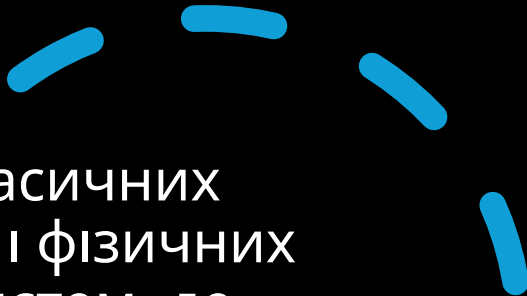
Мета: розробка та апробація методики 3D моделювання хвильових полів у поверхневих шарах земної кори методом скінченних елементів (МСЕ).

Основні завдання:

- Аналіз сучасного стану досліджень і програмного забезпечення.
- Апробація алгоритмів 3D розбиття області стосовно розглядуваних задач.
- Моделювання хвильових полів та тестування методики.
- Застосування для оцінки сейсмічної небезпеки на прикладі інженерних споруд України.



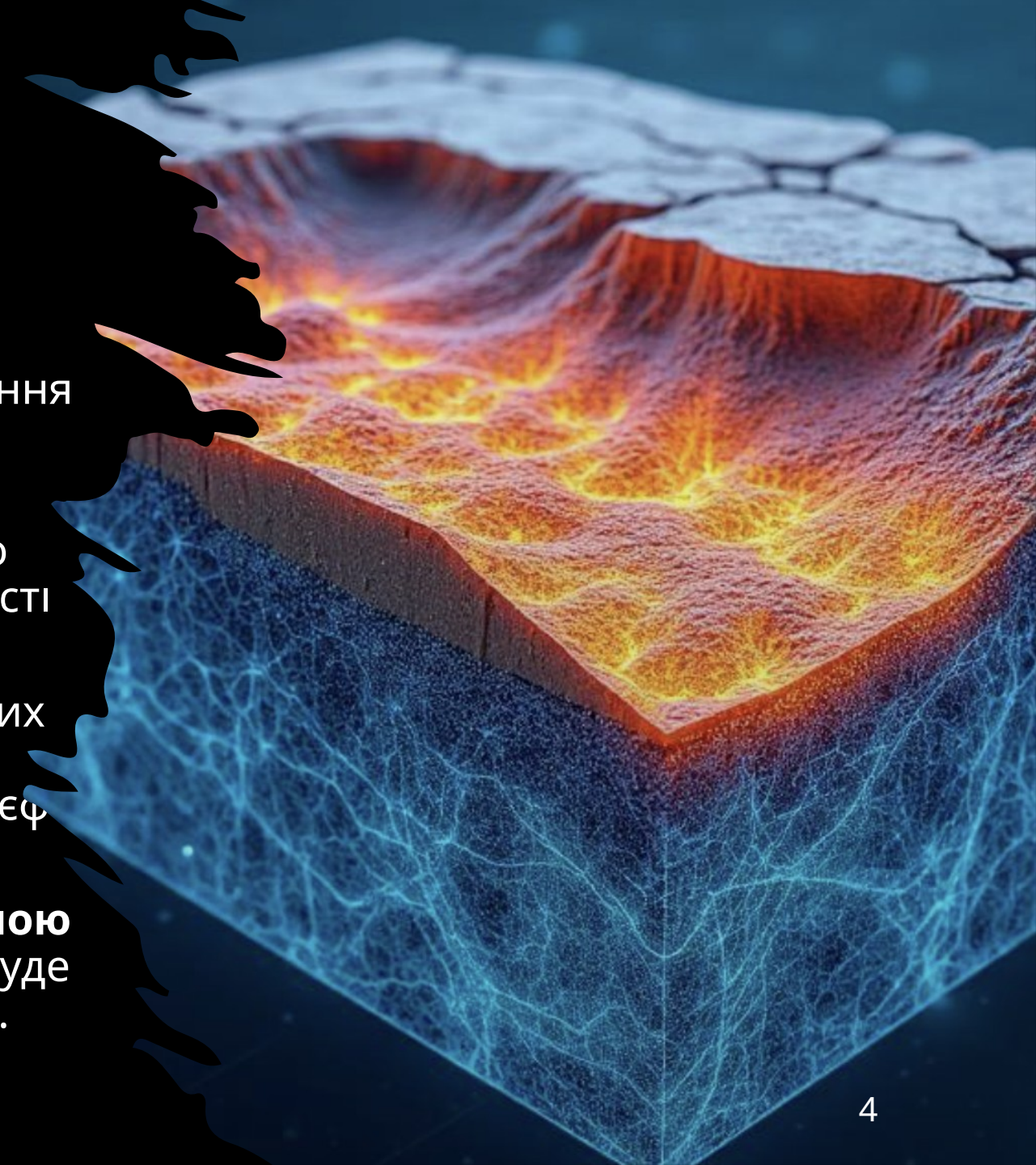
Сучасний стан дослідже нь

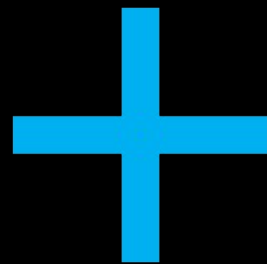
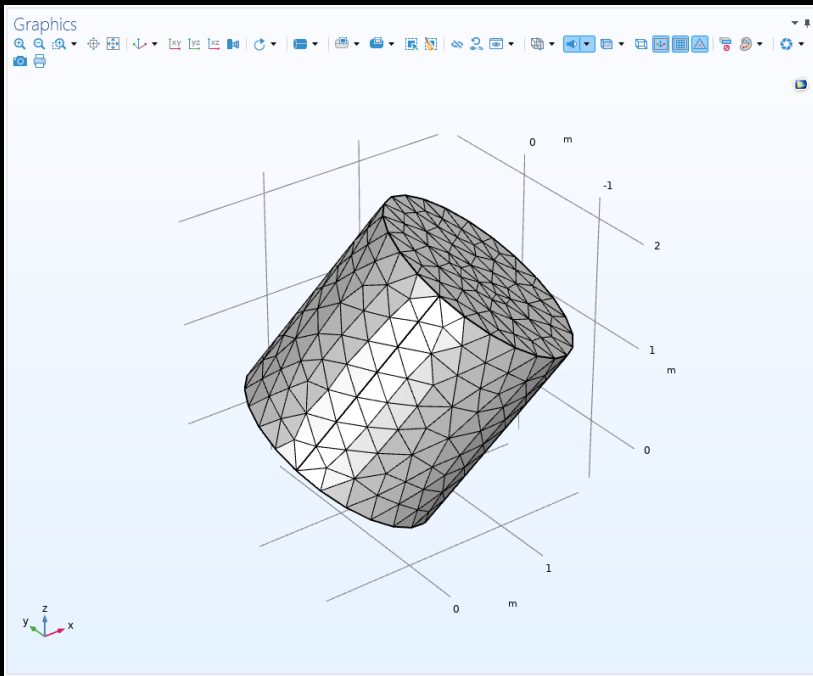


Плавний перехід від класичних статистичних розрахунків і фізичних підходів до гібридних систем, де ключові ролі відіграють великі каталоги подій, високопродуктивні обчислення, дані взяті з Глобальних Супутникових Навігаційних Систем та методи машинного навчання (ML/AI). Це дозволяє робити краще картування розломів, автоматичну обробку каталогів, покращені прогнози розповсюдження хвиль і оперативні оцінки пошкоджень.

Виклики сучасності

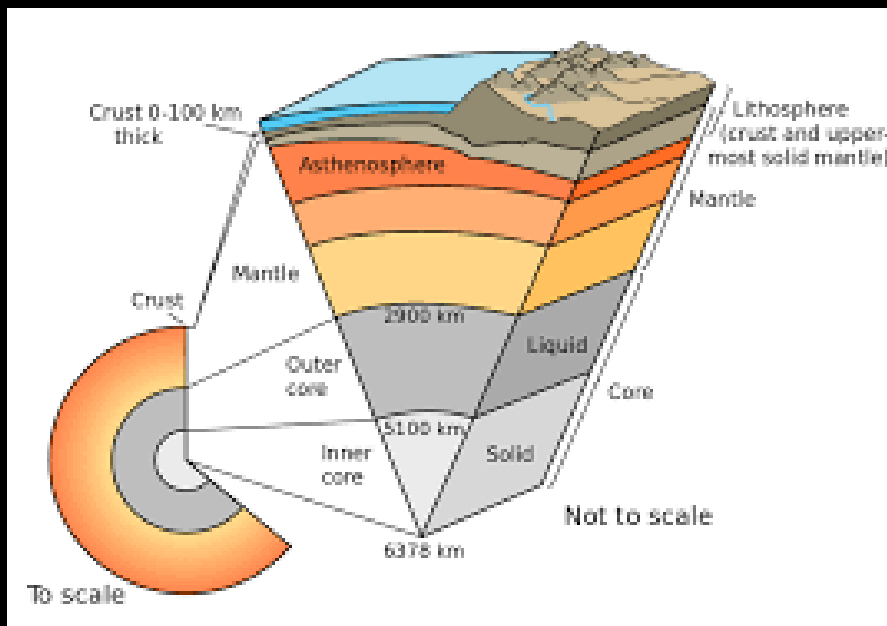
- **Великі обчислювальні ресурси** — 3D моделювання потребує потужного обладнання та оптимізації обчислювальних методів.
- **Неоднорідність отриманої геологічної інформації** — потрібно максимально точно визначати параметри середовища (швидкості хвиль, щільність, нелінійності, тощо).
- **Граничні умови** — визначення абсорбуючих меж, меж між різними середовищами, врахування реальних умов (поверхня, рельєф та ін.).
- **Баланс між деталізацією і обчислювальною витратою** — потрібно вирішити, що саме буде спрощуватись, і чи ці спрощення допустимі.





Постановка задачі

1. Створення 3D моделі досліджуваної області
 - Присвоєння матеріалу кожному елементу моделі (густина, швидкість просування Р- та S- хвиль, коефіцієнт Пуассона та інші)
2. Розбивка 3д моделі на меш сітку використовуючи тетраедри та нумерація вершин(node) згідно вибраній стратегії

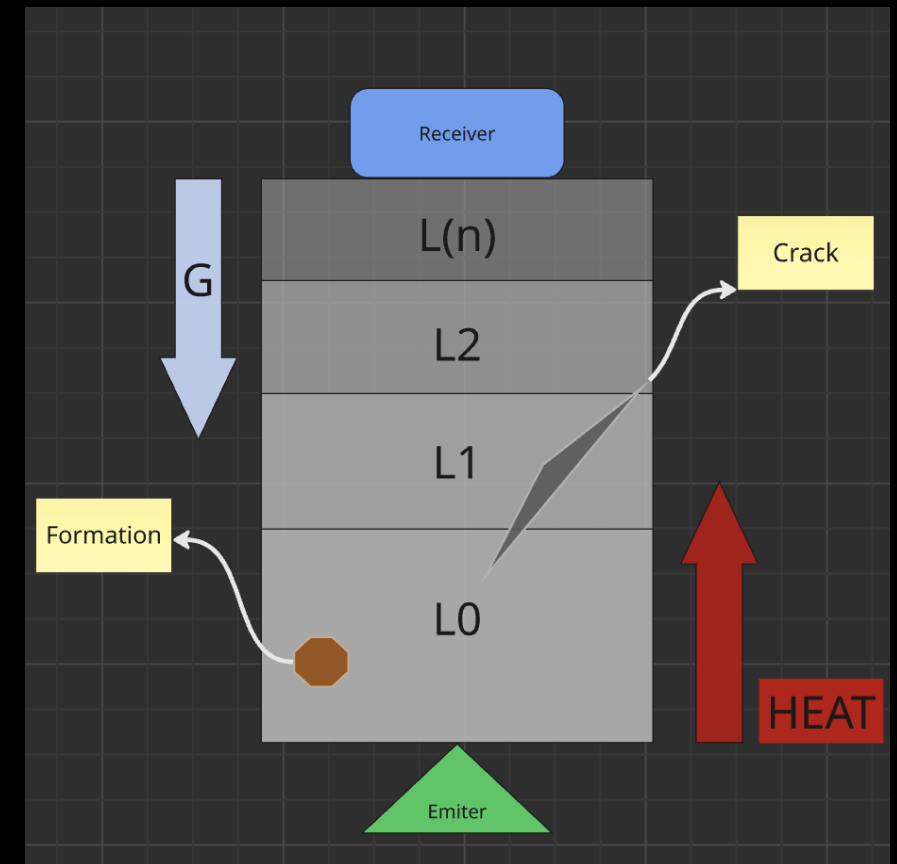


Постановка задачі

3. Реконструювання середовища для проведення симуляцій у 3D просторі з урахуванням присутності:

- Випромінювача – модуль який дозволить моделювати вхідний сигнал
- Приймача – модуль який дозволить зчитувати отриманий сигнал сейсмічної хвилі в заданому місці
- Середовища – модуль який дозволить враховувати або легко змінювати фізичні фактори як от розповсюдження тепла в середовищі щоб максимально наблизити моделювання до реальних умов

4. Візуалізація та інтерпретація отриманих результатів



Рисунок

Аналіз – 3D моделювання

Таблиця

1

	Ціна	Доступність	Ефективність у порівнянні
Blender 	безкоштовна, open-source	Доступна на всіх платформах	Переваги: дуже потужний набір інструментів: моделювання, текстурювання, промальовка, анімація; велика спільнота; плагіни; регулярні оновлення. Недоліки: крута крива навчання для деяких функцій; для дуже точних CAD/інженерних деталей може бути складно (точність, формат обміну).
SketchUp 	~ \$10.75/місяць (при річній оплаті)	Доступна на всіх платформах та у WEB	Переваги: інтуїтивно зрозумілий інтерфейс; швидко моделювати прості форми і концепти; велика бібліотека моделей (3D Warehouse); добре підходить для візуалізацій та архітектурних концептів. Недоліки: обмеження у безкоштовній версії (формати експорту, плагіни, функції); не так добре підходить для дуже складних чи високоточних деталей; обмеження для виробничих CAD-задач.
FreeCAD  	безкоштовна, open-source	Доступна на всіх платформах	Переваги: параметричне моделювання; підтримка CAD/CAM/BIM; імпорт/експорт стандартних форматів; можливість роботи з деталями, збірками; підходить для технічних моделей. Недоліки: інтерфейс може бути трохи менш "гладкий" у порівнянні з комерційними продуктами; менш розвинені інструменти візуалізації/промальовки; можливі лаги на дуже складних моделях.
SolveSpace 	безкоштовна, open-source	Доступна на всіх платформах	Переваги: легкий, простий інтерфейс; працює добре для простих CAD-сцен, механіки; підтримка обмежень (constraint-based modelling); хороша підтримка STEP, STL тощо. Недоліки: набір функцій обмежений; не так багато інструментів для організації складних сцен чи складної геометрії; візуалізація простіша.
Autodesk 3ds Max 	комерційна; підписка. (точні цифри залежать від регіону)	Windows; освітні ліцензії існують; є пробні версії.	Переваги: потужні засоби для візуалізацій, анімацій; багато плагінів і апаратурних оптимізацій; добре підходить для архітектури, візуалізаторів, експорту високоякісних зображень. Недоліки: не дуже оптимальний для інженерно-технічних моделей (ті ж варіанти як у

Аналіз – Побудова mesh сіток

Таблиця

	Ціна	Присутність необхідних модулів	Ефективність у порівнянні ²
Gmsh 	безкоштовна, open-source	- Генерація 1D/2D/3D сіток (лінії, поверхні, об'єми). - Підтримка тетраедральних сіток. - Скриптовий інтерфейс + GUI. - Інтеграція з FEM-розв'язувачами (ElmerFEM, Code_Aster, OpenFOAM).	Переваги: простота, відкритий код, активна спільнота. Недоліки: менше «індустріального» polishing, ніж у комерційних пакетах
TetGen 	безкоштовний (open-source)	- Побудова якісних тетраедральних сіток із оптимізацією форм елементів. - Підтримка багатозональних моделей. - Вбудований алгоритм Delaunay.	Переваги: дуже якісне розбиття саме на тетраедри. Недоліки: вузька спеціалізація (потрібно інтегрувати в інші FEM-пакети для аналізу).
Salome Platform (Mesh module) 	безкоштовно (open-source, розробка EDF/CEA у Франції)	Інтегрований CAD + генерація 2D/3D сіток. Підтримка тетраедральних, гексаедральних та комбінованих сіток. Візуалізація та експорт у формати для Code_Aster, Elmer, Abaqus.	Переваги: потужний інструмент з графічним інтерфейсом. Недоліки: відносно важкий для освоєння.
ANSYS Meshing (ICEM CFD / Workbench)  	висока (ліцензії від десятків тисяч USD).	Побудова складних 3D тетраедральних сіток для FEM/CFD. Автоматичне й ручне керування якістю сітки. Інтеграція з усім стеком ANSYS (Mechanical, Fluent).	Переваги: індустріальний стандарт, висока якість сіток. Недоліки: закритий код, дорога ліцензія.
COMSOL Multiphysics (meshing module)	висока (базова ліцензія + модулі).	Вбудований генератор сіток: тетраедри, призмові, гексаедри. Автоматичне розбиття + можливість локального уточнення сітки.	Переваги: зручний у користуванні, інтегрований із симуляцією. Недоліки: закритість, висока вартість, прив'язка до COMSOL.

Аналіз – Середовище для симуляцій

таблиця

3

	Ціна	Доступність	Ефективність у порівнянні
Unity 3D або Unreal Engine 	Безкоштовний для не комерційних цілей	Доступна на всіх платформах	Усе що стосується фізичних процесів та симуляцій потрібно буде розробляти самотужки
COMSOL Multiphysics 	висока (базова ліцензія + модулі).	Доступна на всіх платформах	- створення геометрії та імпорт CAD-моделей; - генерація 2D/3D сіток (тетраедри, гексаедри); - задання граничних умов, джерел, матеріальних властивостей; - FEM-розв'язувачі для хвильових, теплових, механічних задач; - інтегрована візуалізація результатів.
ANSYS Workbench (Mechanical, Fluent, Explicit Dynamics) 	дуже висока (десятки тисяч \$).	Доступна на всіх платформах	- побудова середовища симуляцій із CAD-геометрії; - автоматичний/ручний mesh; - моделювання механіки, динаміки, сейсміки, флюїдів; - гнучке налаштування граничних умов; - масштабування на HPC-кластери.
Abaqus (SIMULIA) 	дуже висока	Доступна на всіх платформах	- створення середовищ для механіки та динаміки, зокрема сейсмічних задач; - дуже точні моделі для нелінійних процесів, контактів, хвильових задач; - mesh + solver в одному середовищі; - інтеграція з CAD та 3DEXPERIENCE.
Elmer FEM  	безкоштовна, open-source	Добре підходить для простих фізичних симуляцій але має складності з більш комплексними величинами що відбивається на часі виконання розрахунків	- геометрія + mesh (імпорт із Gmsh/Salome); - підтримка динаміки хвиль, теплових, електромагнітних, механічних задач; - інтеграція із CAD через STEP/IGES; - текстовий + графічний інтерфейс (ElmerGUI).

SOFA & Unity 3D

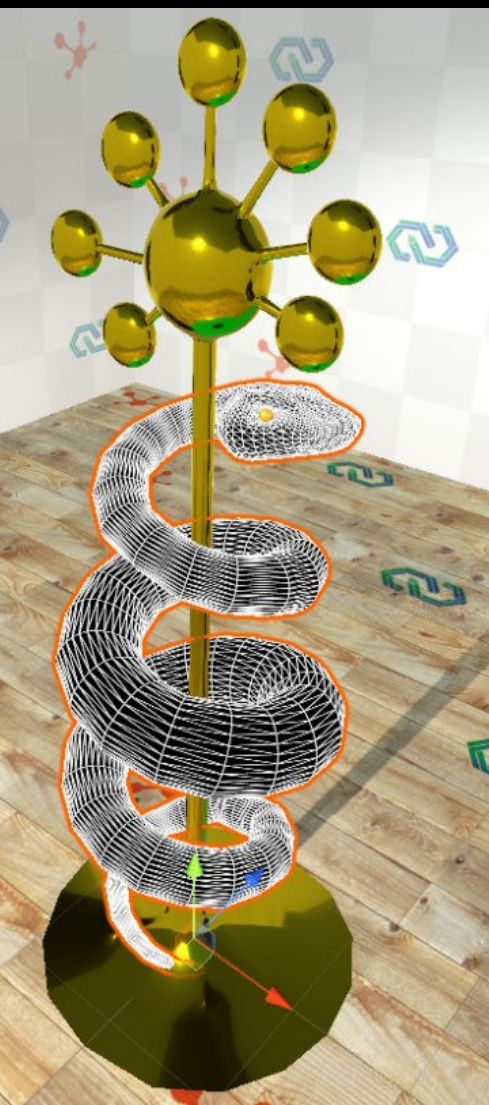
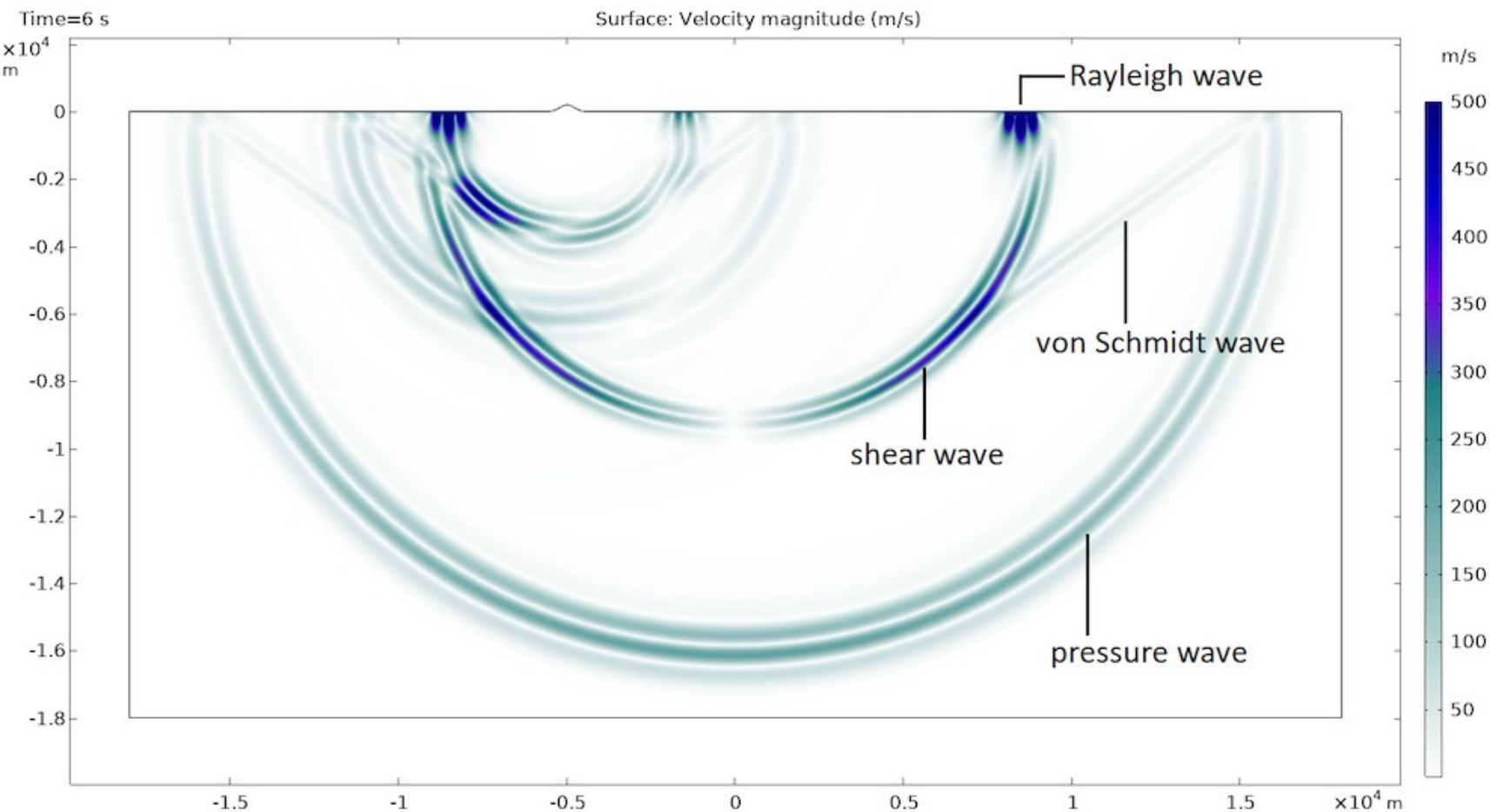


Рисунок 3



Рисунок 4

Еластичні хвилі в середовищі Comsol Multiphysics



Тип хвилі	Короткий опис
Рейлівські хвилі (Rayleigh waves)	Це тип поверхневих хвиль, які поширюються по поверхні твердих тіл, наприклад, Землі, і характеризуються еліптичним рухом частинок
Хвиля Фон Шмідта (von Schmidt waves)	Повздовжня хвиля, що поширюється вздовж поверхні середовища, але відрізняється від звичайної повздовжньої хвилі більш швидким зменшенням амплітуди через надлишкові випромінювання в середовище у вигляді поперечних хвиль
Зсувна хвиля (shear wave, S-хвиля)	Тип поперечної хвилі, що поширюється в пружному середовищі шляхом зсуву, коли пара рівних сил діє у протилежних напрямках вздовж двох граней шару речовини
Хвиля тиску (pressure wave, P-хвиля)	Зазвичай поздовжня хвиля, спричинена змінами тиску, яка змушує частинки рухатися, створюючи області стиснення та розрідження в середовищі

Comsol Multiphysics

Elastic Waves Time Explicit

Відео 1

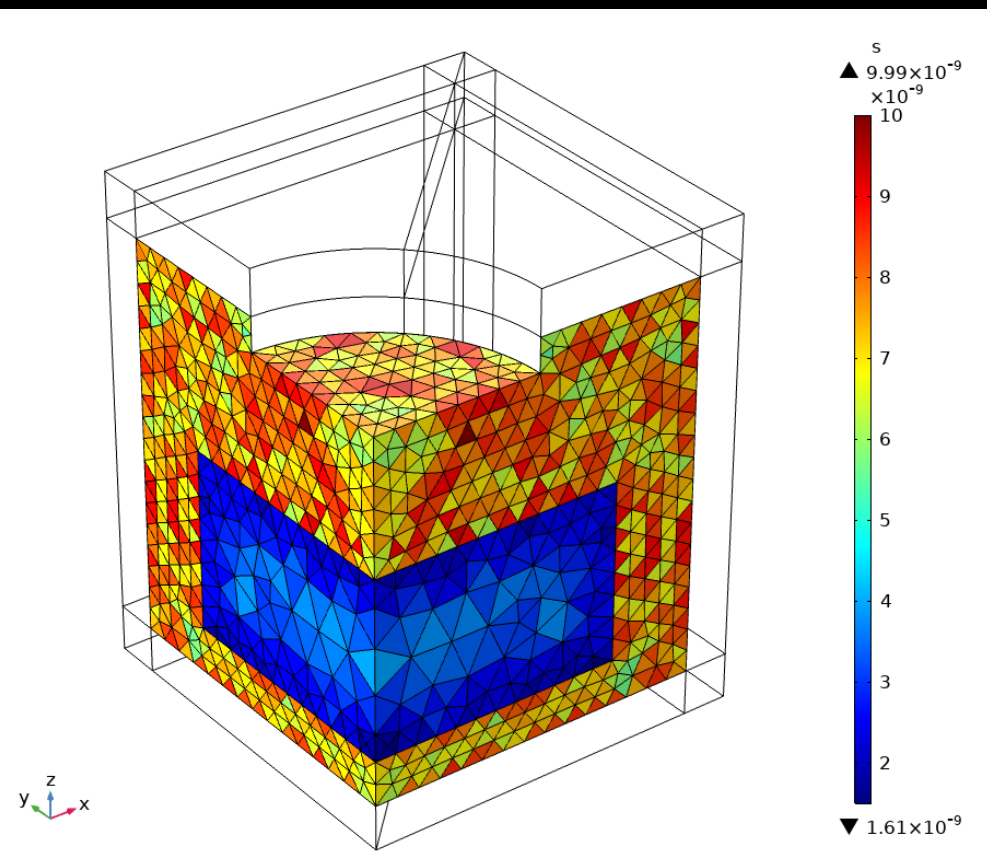
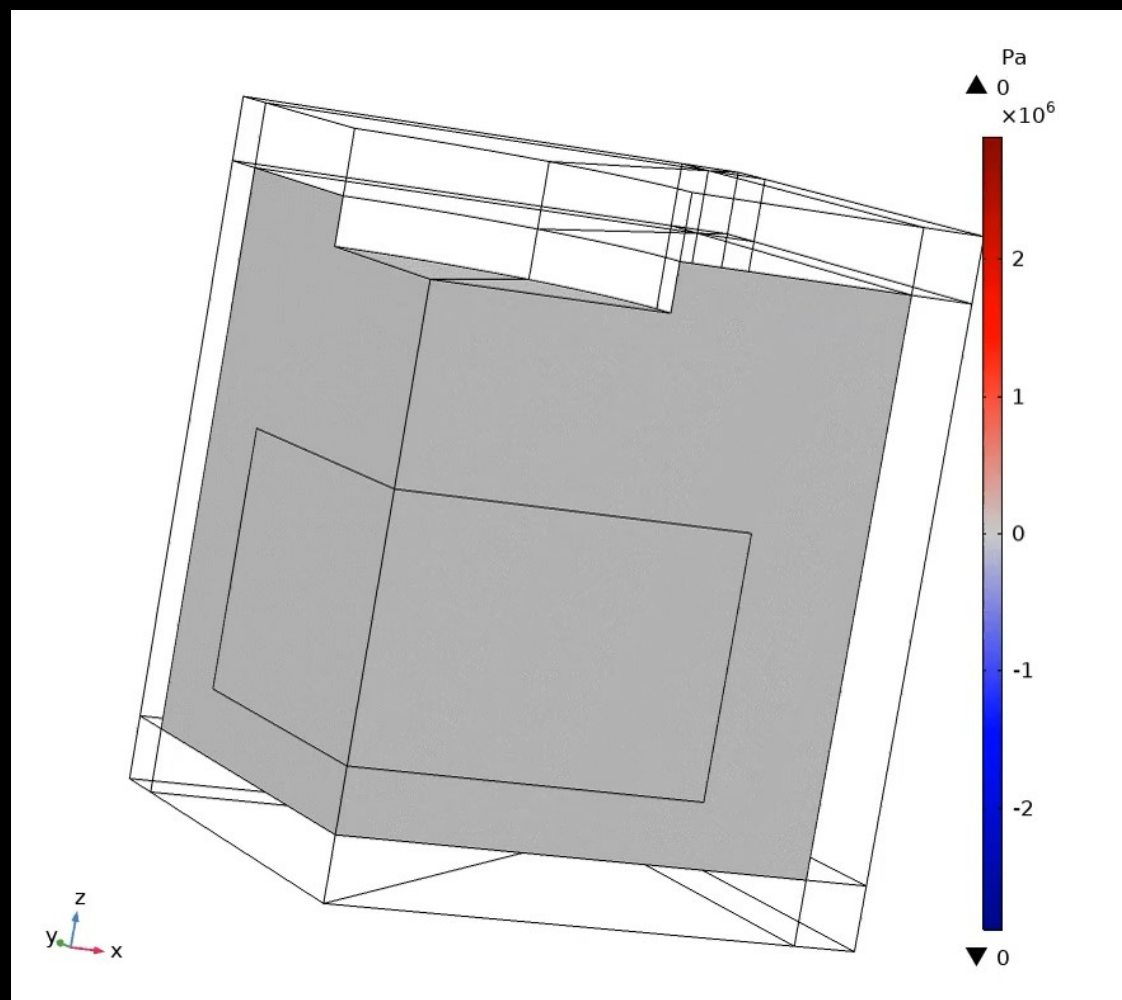
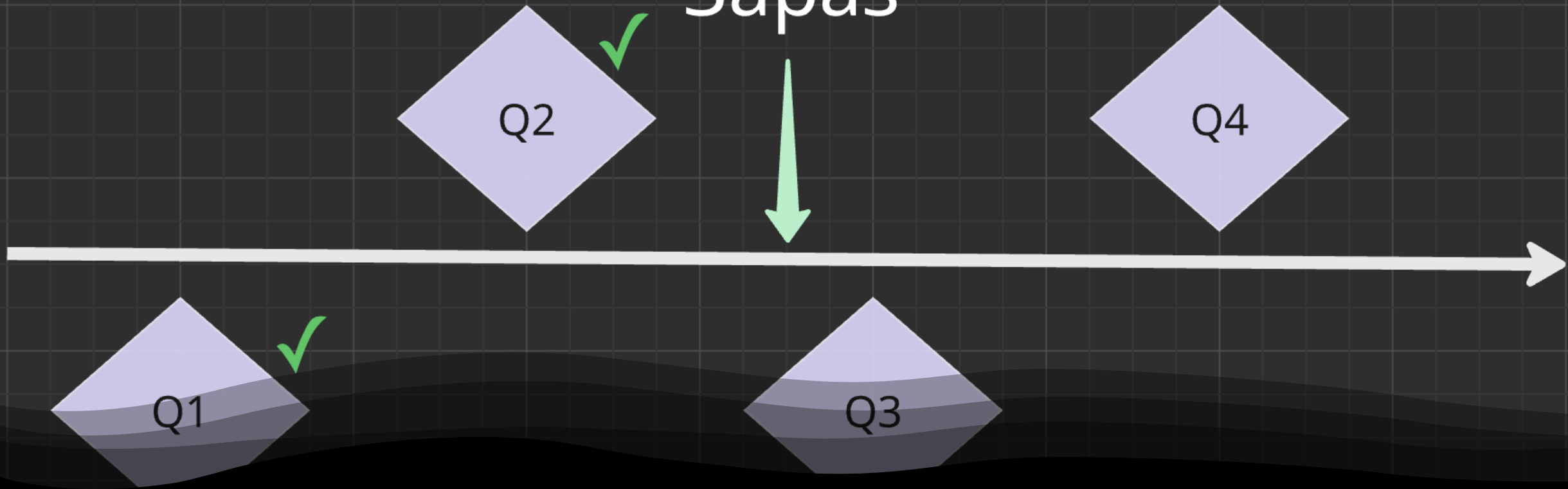


Рисунок 5



Зараз



Проміжні результати

Виконано:

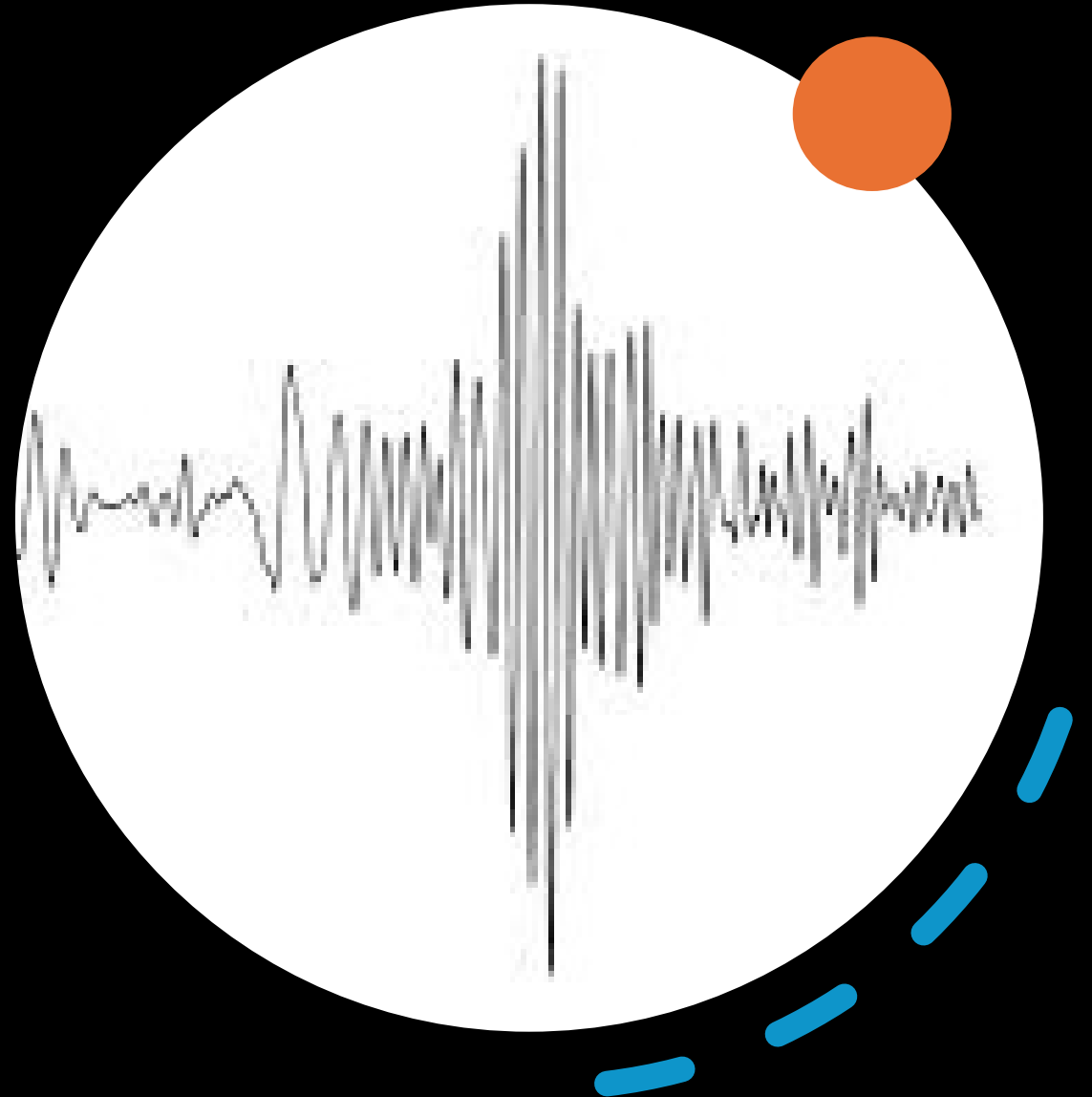
- Аналіз літератури та ПЗ;
- Аналіз алгоритмів розбиття області;
- Прототип програмного комплексу.

У процесі:

- Моделювання хвильових полів на основі реальних взірців

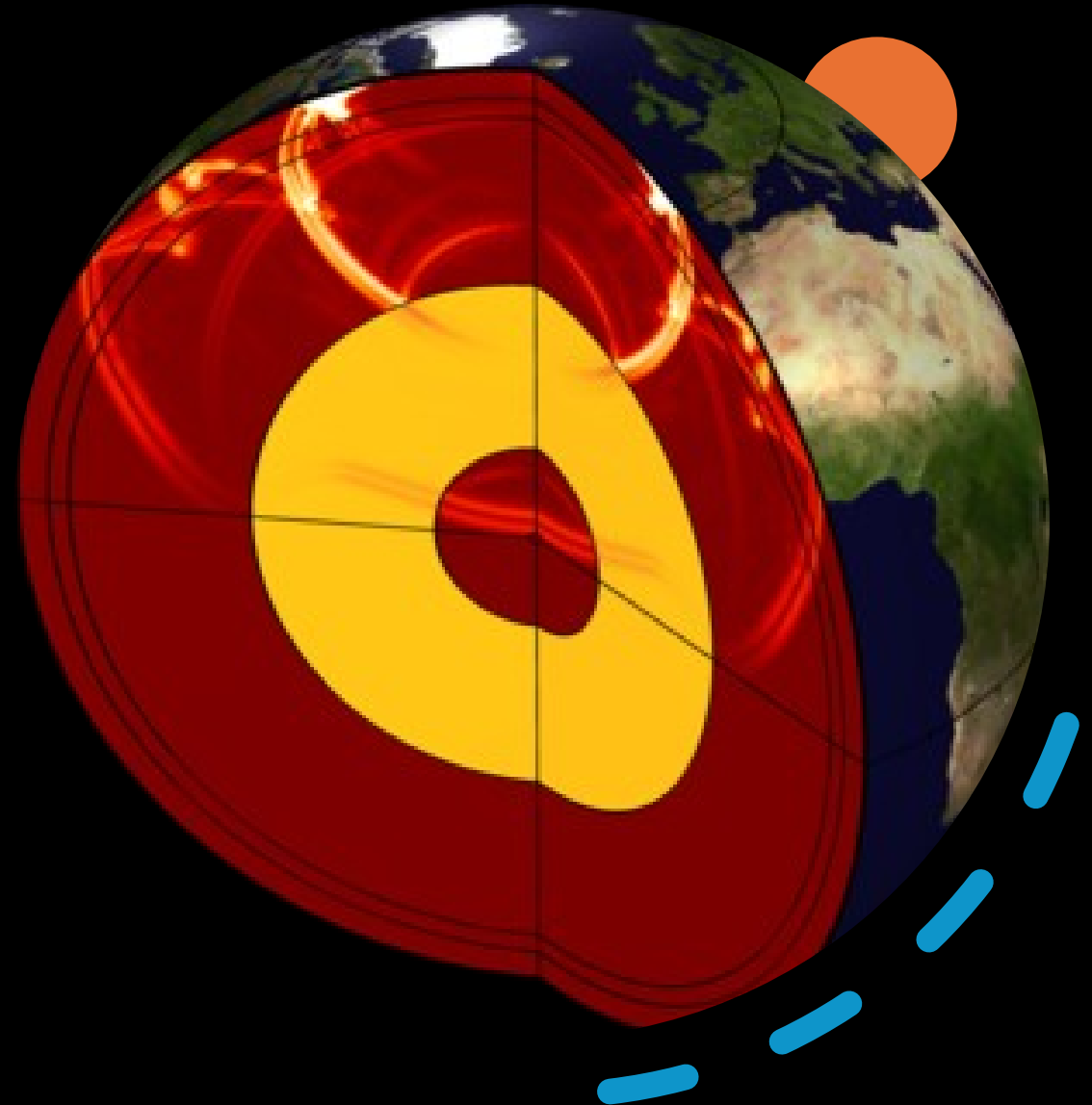
Висновки

- ❖ Існують доволі схожі наукові роботи (наприклад, з пористістю, неоднорідністю ґрунту, modelling wave propagation), але вони не покривають повністю всі наступні умови одночасно:
 - ❖ Тип середовища
 - ❖ Пластичність
 - ❖ Тріщинуватість
 - ❖ Порівняння з аналітичними даними
 - ❖ Безпосередня реалізація в COMSOL
- ❖ Використання COMSOL + FEM дозволяє включити всі ефекти (затухання, пластичність, тріщини) для ґрунтового середовища, і проводити детальну валідацію з експериментальними / інструментальними / польовими даними.



Висновки

- ❖ Наукової новизни вдасться досягти, якщо:
 - ❖ Використати COMSOL + FEM (можливо з XFEM чи інших методів для тріщин) для ґрунтового середовища,
 - ❖ Врахувати пластичність (не тільки лінійну еластичність), затухання, неоднорідності, змінну насиченість (якщо необхідно), тріщини,
 - ❖ Накласти порівняння з реальними даними (експеримент або записи ґрунтової хвилі, інверсія, польові виміри)
- ❖ Однією з проблем буде забезпечити такі реальні дані, аби порівняння було достовірним.



На 1 курсі навчання в аспірантурі було виконано:

- ✓ Успішно завершено повний курс мовної підготовки з англійської мови загальноєвропейського стандарту C1 з оцінкою відмінно
- ✓ Успішно завершено повний курс підготовки з філософії з оцінкою відмінно
- ✓ Проведено дослідження з метою вибору оптимального підбору програмного забезпечення для 3D моделювання і можливостей розробки власних моделей
- ✓ Участь у конференції **X Міжнародна наукова конференція „Геофізика і геодинаміка: прогнозування та моніторинг геологічного середовища»**. За підсумками якого буде підготовлено матеріали до друку.
- ✓ В процесі розробки стаття яка планується до друку наприкінці 2025 – початок 2026 років
 - ✓ Ціхонь С., Віхоть Ю., Рендзеняк Н., (2025). Методика побудови 3D моделей геологічних тіл за допомогою програми Micromine Origin&Beyond (на прикладі родовища Сауляк). // Вісник Львівського університету. Серія геологічна. - 2025. – N/A – N/A

Дякую за увагу
