

УДК 004.89

DOI: [https://doi.org/10.30837/bi.2026.1\(104\).14](https://doi.org/10.30837/bi.2026.1(104).14)М. С. Широков¹, В. І. Олевський²¹ДНУ, м. Дніпро, Україна, nekit.com37@gmail.com, ORCID iD: 0009-0000-1612-0056²ДНУ, м. Дніпро, Україна, olevskiy_v@365.dnu.edu.ua, ORCID iD: 0000-0003-3824-1013

РОЗПІЗНАВАННЯ ПІДЗЕМНИХ ПОРОЖНИН У ҐРУНТІ: КЛАСИЧНІ МЕТОДИ ТА СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ

У роботі розглянуто комплексний підхід до виявлення та характеристики підповерхневих порожнин на основі поєднання геофізичних методів та сучасних методів штучного інтелекту. Основну увагу приділено аналізу можливостей електророзвідувальних, сейсмічних та георадіолокаційних методів для формування інформативних вхідних даних, а також застосуванню згорткових і гібридних нейронних мереж для автоматизованого розпізнавання аномалій, пов'язаних з підземними порожнинами. Запропоновано порівняльний аналіз класичних алгоритмів обробки геофізичних даних і моделей глибокого навчання за показниками точності, стійкості до шумів та здатності до узагальнення на різних типах середовищ. Показано, що інтеграція фізично обґрунтованих чисельних моделей із нейромережевими підходами дозволяє підвищити достовірність локалізації та класифікації порожнин, особливо в умовах складної та урбанізованої геологічної будови. Отримані результати підтверджують ефективність використання гібридних геофізично-інтелектуальних підходів для задач інженерної геології, моніторингу техногенних ризиків і безпеки інфраструктури та можуть бути використані як методологічна основа для створення автоматизованих систем підтримки прийняття рішень.

ПІДЗЕМНІ ПОРОЖНИНИ, ГЕОРАДІОЛОКАЦІЯ, ЕЛЕКТРОРОЗВІДКА, СЕЙСМІЧНІ МЕТОДИ, ГЛИБОКЕ НАВЧАННЯ, НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, РОЗПІЗНАВАННЯ АНОМАЛІЙ, ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

M.S. Shyrovok, V.I. Oleviskyi. Recognition of underground volatile space: classic methods and modern technologies.

The paper considers a comprehensive approach to the detection and characterisation of subsurface cavities, combining geophysical methods with modern artificial intelligence. The main attention is paid to the analysis of the capabilities of electrical reconnaissance, seismic, and georadar methods for generating informative input data, as well as to the use of convolutional and hybrid neural networks for automated recognition of anomalies associated with underground cavities. A comparative analysis of classical geophysical data processing algorithms and deep learning models in terms of accuracy, noise resistance, and generalisation ability across different environments is proposed. It is shown that integrating physically based numerical models with neural network approaches increases the reliability of cavity localisation and classification, especially in complex, urbanised geological structures. The results obtained confirm the effectiveness of hybrid geophysical-intellectual approaches for engineering geology tasks, monitoring of technogenic risks, and infrastructure safety, and can serve as a methodological basis for creating automated decision-support systems.

UNDERGROUND VOLTAICS, GEORADIOLOCATION, ELECTRICAL PROSPECTING, SEISMIC METHODS, DEEP LEARNING, NEURAL NETWORKS, ANOMALIES RECOGNITION, NUMERICAL MODELING

Вступ

Задача розпізнавання підземних порожнин у ґрунті є однією з класичних проблем інженерної геофізики, геотехніки та прикладної механіки суцільних середовищ. Протягом понад двох століть вона розвивалася переважно в межах аналітичних і напіваналітичних підходів, заснованих на розв'язанні хвильових рівнянь для спрощених моделей середовища. Такі методи дозволили закласти фундаментальні уявлення про процеси поширення хвиль, їх відбиття, заломлення та інтерференцію в підповерхневих структурах.

Водночас сучасні умови застосування, зокрема щільна міська забудова, наявність складних техногенних об'єктів, неоднорідність ґрунтів, а також специфіка військових дій, суттєво обмежують можливості класичних підходів. Аналітичні методи виявляються непридатними через складність геометрії, невизначеність фізичних параметрів середовища та неможливість точного задання граничних умов. У таких умовах зростає роль чисельного моделювання та інтелектуальних методів аналізу даних, здатних працювати з зашумленими, неповними та нелінійними сигналами.

Особливого значення набуває поєднання фізично обґрунтованих чисельних моделей поширення хвиль із сучасними методами штучного інтелекту, що дозволяє не лише відтворювати поведінку хвильових полів, а й автоматизувати інтерпретацію результатів. Такий інтегрований підхід є перспективним напрямом розвитку систем розпізнавання підземних порожнин і формує наукове підґрунтя для подальших досліджень у цій галузі.

1. Актуальність проблеми

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується стрімким зростанням ролі підземного простору в різних сферах людської діяльності — від забезпечення національної безпеки та функціонування критичної інфраструктури до розвитку міського середовища й інженерних комунікацій. Водночас інтенсифікація використання підповерхневих зон супроводжується накопиченням прихованих ризиків, пов'язаних із порушенням структурної цілісності ґрунтового середовища та утворенням підземних порожнин різного походження, зокрема карстові порожнини, покинуті шахти та міська інфраструктура, яку не використовують протягом тривалого часу [1].

У наукових дослідженнях останніх років дедалі частіше наголошується, що підземні порожнини, незалежно від їх походження, становлять суттєву загрозу безпеці населення, стійкості інфраструктури та ефективності систем управління ризиками [2, 3]. Особливу складність створює той факт, що більшість таких об'єктів має прихований характер і не проявляється на поверхні до моменту виникнення аварійних або кризових ситуацій.

Розглянемо більш детально основні види підповерхневих небезпек.

1.1. Підземні антропогенні тунелі

У наукових та аналітичних джерелах останніх років дедалі частіше підкреслюється, що підземні тунелі стали повноцінним елементом сучасних асиметричних конфліктів і гібридних воєн. Дослідники відзначають, що використання підземного простору з військовою та диверсійною метою почало суттєво зростати в середині–кінці ХХ століття, а особливо – у 2010–2020-х роках. Це пов'язують із розвитком міських бойових дій, ущільненням забудови та прагненням сторін конфлікту мінімізувати власні втрати й підвищити прихованість операцій. Активне використання підземного простору дозволяє сторонам конфлікту компенсувати технологічну нерівність і значною мірою нівелювати переваги супротивника у сфері повітряної розвідки та високоточної зброї, як це було під час конфліктів на Близькому Сході [4]. Перенесення частини бойових дій у підповерхневий простір змінює саму логіку конфлікту, роблячи його менш передбачуваним і складнішим для контролю. Яскравим прикладом цього переходу є використання системи підземних тунелів під час В'єтнамської війни в районах Cu Chi та Igon Triangl [5]. Наведене дослідження підтверджує, що американські війська, озброєні значно кращою технікою й вогневидами засобами, виявилися нездатними ефективно знищити ці підземні мережі, зокрема через складність їх ідентифікації. До того ж, такі тунелі стають фактором довготривалої нестабільності навіть після завершення активної фази конфлікту.

Сучасні підземні тунелі суттєво відрізняються від історичних або тимчасових підкопів [6] – мова йде про складні інженерні системи, які включають житлові, складські та командні приміщення і функціонують протягом тривалого часу. Такі мережі часто інтегруються в щільну міську забудову, що не лише ускладнює їх виявлення, а й підвищує ризики для цивільного населення. Це підтверджують останні дослідження сучасної російсько-української війни [7, 8], де підземні маршрути використовуються як для прихованого пересування сил, так і для обходу оборонних ліній супротивника.

Узагальнюючі оглядові дослідження з прикордонної та внутрішньої безпеки також звертають увагу на те, що більшість існуючих систем спостереження орієнтовані на поверхневий або повітряний контроль

і практично не враховують підповерхневий вимір. Також підкреслюється, що дефіцит достовірної інформації про стан ґрунту і підземних структур створює «сліпу зону» в системах національної безпеки, що особливо актуально для прикордонних регіонів і густозаселених територій.

1.2. Урбанізація та інфраструктурні ризики, пов'язані з підповерхневими порожнинами

У галузі інженерної геології, містобудування та управління ризиками значна кількість оглядових публікацій присвячена проблемі деградації ґрунтової основи та появи порожнин унаслідок інтенсивної урбанізації. Відзначається, що сучасні міста дедалі активніше використовують підземний простір для транспортних систем, комунікацій, сховищ і технічних споруд, що істотно змінює природний стан ґрунтів.

Оглядові дослідження у сфері інженерної геології, геотехніки та урбаністики одноставно вказують на те, що інтенсивна урбанізація істотно змінює природний стан ґрунтового середовища [9]. Окремо підкреслюють, що сучасні міста дедалі активніше освоюють підземний простір, що призводить до накопичення прихованих деформацій та локальних зон нестабільності, які часто розвиваються повільно і залишаються непоміченими до моменту аварійного прояву.

Проблема підповерхневих порожнин має комплексний характер і не може бути зведена до окремих помилок проектування або експлуатації. Антропогенне навантаження на ґрунт, застарілі інженерні мережі та зміни гідрогеологічного режиму формують умови для системного зростання ризиків у міському середовищі [10]. Особлива увага приділяється тому, що багато сучасних міст не мають цілісної стратегії моніторингу підповерхневих процесів.

Окремий акцент в літературі робиться на соціально-економічних наслідках таких явищ [11], де зазначається, що раптові просідання та обвали ґрунту можуть призводити до значних людських і матеріальних втрат, порушення транспортної логістики та функціонування критичної інфраструктури. Автори підкреслюють, що в умовах зростаючої щільності забудови навіть локальні порушення ґрунтової стабільності можуть мати непропорційно великі наслідки.

1.3. Техногенні порожнини

Окремий напрям досліджень присвячений проблемі техногенних порожнин, які виникають унаслідок господарської діяльності людини: гірничих робіт, прокладання комунікацій, несанкціонованих підземних споруд або деградації інженерних мереж. У наукових публікаціях підкреслюється, що такі порожнини часто залишаються невідомими або недостатньо задокументованими, особливо в районах зі складною історією забудови [2, 12].

У роботах з інженерної безпеки підкреслюється, що техногенні порожнини є одним із найменш передбачуваних типів підповерхневих дефектів [13, 14].

Значна кількість таких порожнин утворюється внаслідок історичної господарської діяльності – гірничих розробок, старих комунікацій або несанкціонованих підземних споруд, інформація про які є неповною або втраченою. Це створює додаткові складнощі для сучасного міського планування.

Також наголошується, що головна небезпека техногенних порожнин полягає в їх прихованості та відсутності явних поверхневих індикаторів. Такі порожнини можуть залишатися стабільними протягом тривалого часу, але за певних умов призводити до раптових обвалів із катастрофічними наслідками [15]. У цьому контексті дослідники підкреслюють, що традиційні підходи до інженерного обстеження часто є недостатніми для раннього виявлення таких загроз. У свою чергу, деградація інфраструктури без системного моніторингу може призводити до поступового розущільнення ґрунту і втрати його несучої здатності [16]. Додатково підкреслюється, що відсутність єдиних реєстрів і стандартів обліку підземних порожнин значно ускладнює управління ризиками.

Розпізнавання техногенних порожнин вартує уваги науковців, є актуальним і відзначається високим ступенем прихованості та непередбачуваності підповерхневих дефектів, зростаючим рівнем зношеності інженерної інфраструктури та відсутністю системного підходу до обліку та моніторингу підземного простору.

2. Класичні методи розпізнавання підземної структури

Пошук, опис і розпізнавання підземних структур є однією з найдавніших прикладних задач у природничих науках. Ще в XIX столітті почали формуватися перші геофізичні методи, які дозволяли досліджувати підповерхневі об'єкти без прямого проникнення в товщу ґрунту. У другій половині XIX – на початку XX ст. електричні та сейсмічні підходи поступово розширили свою сферу застосування для виявлення не лише корисних копалин, а й неоднорідностей у підповерхневих шарах [17].

У XX ст. інженерна та прикладна геофізика стала окремою дисципліною, що об'єднала різноманітні підходи до дослідження внутрішньої структури Землі. До традиційних методів відносяться сейморозвідка, електророзвідка, магніторозвідка, гравірознавдя та георадіолокація (GPR) – технології, які дозволяють непрямо оцінювати наявність неоднорідних зон, включаючи порожнини, по зміні фізичних полів.

Інші геофізичні підходи, наприклад, вимірювання природних або збуджених електромагнітних полів, також застосовувалися для вирішення прикладних задач розвідки структури ґрунту та підземних вод.

2.1. Електророзвідка

Електророзвідка є одним із найстаріших геофізичних методів, витоки якого сягають експериментів Р. В. Фокса (1829 р.), пов'язаних із вимірюванням

природних електричних потенціалів у ґрунті. Сутність електророзвідки полягає у тому, що різні типи ґрунтів, порід і порожнин мають різну електропровідність [17]. Під час вимірювання штучно створеного або природного електричного поля фіксуються зміни потенціалів, за якими можна судити про підповерхневі неоднорідності. Порожнини, заповнені повітрям або слабопровідними матеріалами, створюють характерні аномалії електричного поля, що дозволяє виявляти їх за відповідної конфігурації електродів.

У прикладній електророзвідці налічується більше п'ятдесяти різних методів і модифікацій, призначених як для глибинних досліджень, так і для вивчення верхньої частини розрізу. Через багатоманітність способів електророзвідку можна поділити на класи, групи, методи й модифікації. Усі методи електророзвідки можна поділити на три групи: методи постійного струму, поляризаційні (електрохімічні) методи та електророзвідка на змінному струмі.

Основними методами постійного струму є методи опорів, які поділяються на електропрофілювання і електричне зондування: вертикальне і дипольне. У даній групі штучних методів електророзвідки використовуються не тільки постійні поля, але й змінні низькочастотні ($f < 20$ Гц), для яких при малих розмірах установок справедлива теорія постійних полів.

Суть методів опорів зводиться до визначення позірних опорів шляхом виміру різниці потенціалів на приймальних електродах і сили струму в живильній лінії. Із розв'язку прямих задач для стаціонарних електричних полів різних джерел над однорідним провідним півпростором випливають формули для визначення його питомого опору ρ . У методах опору за цими ж формулами розраховується позірний опір $\rho_{\text{п}}$, що характеризує аномальне поле, зумовлене неоднорідною будовою півпростору:

$$\rho_{\text{п}} = K * \Delta U / I, \quad (1)$$

де I – величина струму, що пропускається в землю через живильні електроди; ΔU – різниця потенціалів, яка зареєстрована між вимірювальними електродами у момент проходження струму; K – коефіцієнт установки.

Методи поляризації ґрунтуються на вимірюванні вторинних електричних полів електрохімічної та електрокінетичної природи, що виникають у гірських породах при протіканні в них електричного струму. Метод викликаної поляризації є одним із провідних у комплексі геофізичних методів, що використовуються при пошуках і розвідці рудних родовищ.

При вимірюванні викликаної поляризації в часовому (нестационарному) режимі в землю гальванічним способом (за допомогою електродів) подається постійний електричний струм, під дією якого протягом певного часу відбувається вимушена поляризація геологічного розрізу. Під час проходження в землі струму вимірюється різниця потенціалів між приймальними

заземленнями й сила струму в живильній лінії, а після вимкнення струму – різниця потенціалів викликані поляризації $\Delta U_{ВП}$. Ця різниця потенціалів вимірюється або в строго фіксований момент часу після вимкнення струму, або через певні його проміжки. Швидкість і характер спаду процесу деполіризації залежать від поляризаційних властивостей геологічних утворень. На практиці інформацію про ці властивості отримують шляхом визначення миттєвого значення позірної поляризованості $\eta_{П}$ для вибраного моменту часу або шляхом вивчення залежності $\eta_{П}$ від часу. Для визначення позірної поляризованості після подання в живильну лінію постійного електричного струму впродовж певного часу його вимикають і на встановленій часовій затримці (зазвичай 0,5 с) вимірюють різницю потенціалів $\Delta U_{ВП}$.

Позірну поляризованість визначають:

$$\eta_{П} = (\Delta U_{ВП} / \Delta U_{ПР}) \cdot 100\%, \quad (2)$$

де $\Delta U_{ПР}$ – різниця потенціалів на електродах приймальної лінії, виміряна під час пропускання струму перед його вимкненням. Одночасно, як правило, визначають і позірний опір:

$$\rho_{П} = K \cdot \Delta U_{ПР} / I, \quad (3)$$

де K – коефіцієнт установки.

Вивчення поляризаційних властивостей геологічного розрізу можна виконувати також і на змінному струмі. У цьому випадку викликану поляризацію оцінюють у градусах фазового зсуву виміряного гармонійного сигналу $E_{MN} \cdot \sin(\omega t + \phi_{ВП})$ щодо струмового сигналу $I_{AB} \cdot \sin(\omega t)$, визначаючи таким чином затримку в реакції середовища щодо процесу дії зовнішнього поля. Потрібно зазначити, що явище викликані поляризації досить інерційне й на високих частотах (>20 Гц) взагалі практично відсутнє.

Якщо середовище однорідне за поляризованістю, то позірна поляризованість співпадає з її істинним значенням. Для неоднорідного середовища $\eta_{П}$ залежить від просторового розподілу ділянок порід із різною поляризованістю, від їх питомого електричного опору, від розташування живильних і вимірювальних електродів і характеру поляризувального поля.

Польові дослідження останнього десятиріччя, проведені науковцями за допомогою електророзвідки в різних умовах та ґрунтах [18, 19], показують, що реальна точність розпізнавання, якої вдалося досягнути, – близько 80%. Причиною цьому є застосування спрощених моделей середовища, припущень про шаруватість та однорідність, які погано відповідають реальним умовам щільної забудови або зруйнованої інфраструктури.

2.2. Сейсмічні та акустичні методи

Сейсмічна розвідка – сукупність методів дослідження геологічного середовища, що ґрунтуються на вивченні розповсюдження пружних хвиль, які збудовуються штучно. Сейсмічні методи ґрунтуються на аналізі поширення пружних хвиль у ґрунті. Акустичні

методи є близькими за фізикою до сейсмічних, але працюють у вищому частотному діапазоні. Джерело (удар, вибух, вібратор) генерує пружні хвилі, які поширюються в різних середовищах з різною швидкістю [20]. На межі, що розділяє ґрунти різного складу, пружні хвилі відбиваються, заломлюються та частково повертаються на поверхню Землі. Вивчаючи час і швидкість поширення хвиль, їх амплітуду, форму сигналу та характер коливань ґрунту, на яких встановлені вібраційні приймачі (сейсмічні приймачі або геофони), можна визначити глибину та форму меж у середовищі, кут їх падіння, напрямок поширення та інші характеристики геологічного середовища (рис. 1).

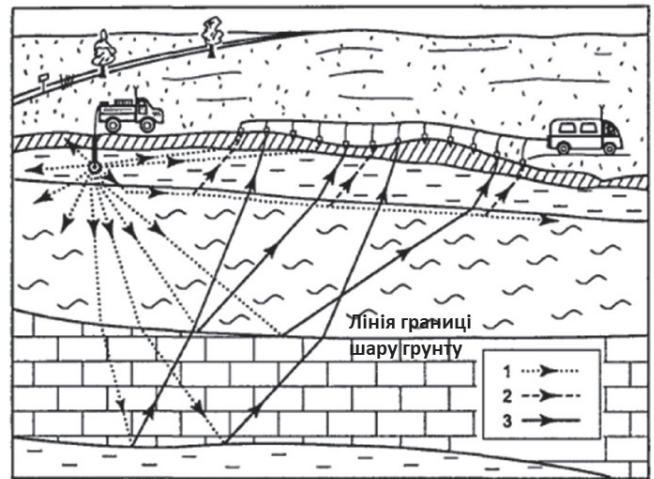


Рис. 1. Схема польових робіт сейсморозвідки

У сейсмічній розвідці використовуються поздовжні хвилі, поперечні та змішані хвилі. Сейсморозвідка включає два основні методи: метод відбитих хвиль (МВХ) і метод заломлених хвиль (МЗХ). Найбільшого поширення набув метод відбитих хвиль, який дозволяє ідентифікувати межі середовищ з точністю понад 95% [20, 21]. Метод заломлених хвиль має нижчу точність і роздільну здатність, що дозволяє вивчати лише шари зі збільшеною швидкістю сейсмічних хвиль.

Хвильове сейсмічне поле, яке виникає при штучному збудованні й реєструється на поверхні Землі, є надзвичайно складним і відображає складну будову і зміну пружних властивостей неоднорідного геологічного середовища. Для дослідження закономірностей розповсюдження пружних хвиль у геологічному середовищі застосовують спрощені моделі. У першому наближенні реальне геологічне середовище розглядають як деяке ідеально пружне ізотропне середовище, в якому під дією об'ємних або поверхневих сил виникають і розповсюджуються пружні хвилі.

В ідеально пружному середовищі процеси, які відбуваються, є повністю зворотними. Це означає, що ніяких незворотних втрат енергії пружної хвилі в ідеально пружному середовищі немає. В моделі ідеально пружного тіла основні закономірності розповсюдження пружних хвиль описуються законами лінійної теорії пружності. Теорія пружності дає можливість знайти

залежність між силами, прикладеними до зовнішньої поверхні тіла, і зміною розмірів і форми тіла, які виникли внаслідок дії цих сил. Цю залежність зручно виразити за допомогою напруг і деформацій, лінійна залежність між якими описується законом Гука, базуючись на якому, можна знайти фундаментальні співвідношення, що визначають умови динамічної рівноваги ідеально пружного середовища.

Рівняння динамічної рівноваги однорідного ідеально пружного ізотропного середовища має такий вигляд (рівняння Ламе):

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla \theta + \mu \Delta u + \rho \chi, \quad (4)$$

де ρ – густина середовища; λ, μ – пружні постійні Ламе; Δ – лапласіан, u – вектор пружних зміщень, що визначає переміщення частинок середовища відносно їхнього положення рівноваги, який розглядається як функція координат x, y, z простору та часу t і характеризує збурення в середовищі внаслідок дії зовнішніх об'ємних сил χ , θ – дилатація або відносно об'ємне розширення, яке визначається через компоненти вектора зміщень.

Значна кількість сейсмічних систем працює в умовах, коли інтенсивність корисного сейсмічного сигналу перевищує рівень перешкод через використання вибухових джерел формування пружних хвиль. Однак, при вивченні малих структур, таких як невеликі порожнини в ґрунті, слід використовувати спеціальні методи розпізнавання їх впливу на акустичні хвилі, серед яких є обробка даних з використанням комбінації методів комп'ютерного зору та машинного навчання.

У дослідженнях останніх років [20, 21, 22] сейсмічні та акустичні методи застосовуються переважно для знаходження відповідності реконструйованої аномалії відомій геометрії порожнини або співпадіння локалізації з контрольною інформацією з буріння/архівних даних, де показують непогані результати реконструкції підземних порожнин, але через наведені вище особливості, прямі метрики оцінки якості здебільшого не наводяться. Дані дослідження виступають підтвердженням того, що використання методів аналізу вібрацій і шумів ґрунту із застосуванням сучасних методів машинного навчання є перспективним напрямком досліджень.

2.3. Георадіолокація (GPR)

Ще одним широко використовуваним методом для аналізу ґрунтів є георадіолокація. Її фізична сутність ґрунтується електромагнітних полях та законах електродинаміки. За законом Кулона, електричний заряд оточений електричним полем, яке діє на інші заряди, змушує їх пересуватися. Закон Ампера показує, що електричний заряд, що рухається в провіднику, створює магнітне поле, пропорційне швидкості заряду. Якщо електричне поле збільшується, то заряд прискорюється і швидкість його зміни призводить до зміни магнітного поля, що, у свою чергу, індукує інше

електричне поле в провіднику і тим самим впливає на рух прискореного заряду [23].

Якщо два прямі провідники покласти вдовж один одного і з'єднати послідовно, то вони будуть діяти як електричний диполь. Застосування до них змінного електричного поля призведе до коливання диполя, що діятиме як антена для випромінювання електромагнітних хвиль (ЕМ). Такі хвилі складаються з магнітного поля H та електричного поля E , які змінюються з частотою осцилятора та орієнтовані під прямим кутом один до одного у площині, перпендикулярній напрямку поширення (рис. 2).

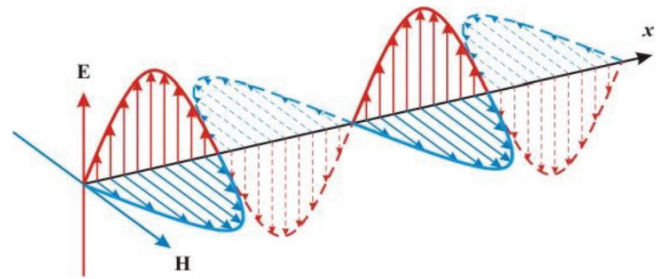


Рис. 2. Поширення електромагнітної хвилі

Поширення електромагнітних хвиль метрового діапазону, характерного для георадарних досліджень, розглядається в рамках законів геометричної оптики відповідно для плоских хвиль на великих відстанях від джерела і для сферичних хвиль на малих відстанях від джерела. Враховуючи контраст діелектричної проникності штучних або природних шарів, їх можна відрізнити один від одного.

При визначенні швидкостей поширення і амплітуд хвиль у рамках допустимих похибок, діють принципи Ферма, Гюйгенса, Френеля і закон Снеліуса [30]. Припускається, що в ізотропному середовищі промінь перпендикулярний фронту хвилі, що дозволяє зробити геометричні побудови шляхів хвиль в середовищі і подальше обчислення параметрів середовища за вимірними кінематичними і динамічними характеристиками записів хвиль. Хвиля, що поширюється, відбивається тільки від границь поділу різних середовищ, в яких спостерігається зміна відносної діелектричної проникності або провідності. Коефіцієнт відбиття при нормальному падінні хвилі на границю поділу між середовищами з різною діелектричною проникністю, буде визначатись за виразом:

$$K_{\text{відб.}} = \left| \frac{\sqrt{\epsilon_1'} - \sqrt{\epsilon_2'}}{\sqrt{\epsilon_1'} + \sqrt{\epsilon_2'}} \right|^2, \quad (5)$$

де ϵ_1', ϵ_2' – дійсні частини відносної проникності двох відповідних середовищ.

Коефіцієнт заломлення (проходження через границю) буде рівний:

$$K_{\text{пр}} = 1 - K_{\text{відб.}} = 1 - \frac{2 \cdot \sqrt{\epsilon_2'}}{\sqrt{\epsilon_1'} + \sqrt{\epsilon_2'}} \quad (6)$$

Також важливим явищем для георадіолокаційних досліджень є дифракція, яка виникає у результаті опромінення об'єкта електромагнітними хвилями,

розміри якого менші за довжину хвилі. Дифракція може вплинути на розпізнавання хвильових картин, так як пошук локальних об'єктів зводиться до пошуку вторинних джерел випромінювання на записах, що впливає на визначення глибини залягання об'єкта та швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль в середовищі над об'єктом.

Задачі з пошуку різних об'єктів є одними із основних напрямків георадіолокаційних досліджень. До них відносяться пошук трубопроводів, кабелів, валунів, залишки будівельних конструкцій, ємностей, порожнин, археологічних об'єктів, тощо. Порожнини, особливо заповнені повітрям, створюють різкий контраст діелектричних властивостей, що робить їх добре помітними на радарограмах.

Експерименти, проведені в умовах дорожнього покриття, поблизу великих бетонних споруд (дамби) та у золотих шахтах Єгипту показують точність, близьку до 75-85% за умови низької електропровідності матеріалу заповнення порожнини й однорідності навколишнього ґрунту [24, 25]. У результатах досліджень зазначається, що GPR має істотні обмеження: глибина проникнення сильно залежить від вологості ґрунту, наявності металевих об'єктів і електромагнітних завад, що є типовим для міських умов.

2.4. Обмеження класичних методів

Спільною рисою перелічених методів є їх аналітична природа: інтерпретація результатів ґрунтується на розв'язанні обернених задач, які є погано обумовленими та потребують значних спрощень. У мирних умовах, на відкритих територіях з переважно однорідним ґрунтом це допустимо, оскільки можна збільшити кількість вимірювань і уточнювати модель середовища, проводячи дослідження у декілька етапів. Але в умовах військових дій, обмеженого доступу до території, щільної міської забудови та наявності численних техногенних шумів класичні підходи стають малоприматними, занадто повільними або мають занижену точність. До того ж, аналітичні моделі не здатні повною мірою врахувати складну суперпозицію сигналів, що виникає в реальному середовищі, що є додатковим аргументом для застосування методів, які матимуть більш високу точність.

Наведені вище обмеження класичних методів зумовлюють перехід до використання систем штучного інтелекту. На відміну від класичних методів, використання ШІ не потребують явного задання фізичної моделі середовища і здатні навчатися як на реальних, так і змодельованих даних, враховуючи складні нелінійні залежності між формою акустичного сигналу та структурою ґрунту.

Перспективним є аналіз акустичних і сейсмоакустичних сигналів, оскільки такі сигнали містять інформацію про резонансні властивості порожнин, локальні відбиття та особливості затухання хвиль. Системи штучного інтелекту можуть виділяти ці ознаки навіть у зашумлених даних, що робить їх

ефективними в умовах, де аналітичні методи виявляються непридатними.

Сучасні огляди [25, 26] підкреслюють, що поєднання сенсорних систем із методами машинного навчання є одним із ключових напрямів розвитку підземного зондування.

3. Інтелектуальні рішення для розпізнавання підземних порожнин

На практиці існуючі інтелектуальні рішення можна умовно поділити на дві основні групи: підходи на основі традиційних алгоритмів машинного навчання та підходи на основі глибокого навчання і нейронних мереж.

3.1. Підходи на основі традиційного машинного навчання

Алгоритми класичного машинного навчання (Support Vector Machines, Random Forest, k-Nearest Neighbors, Logistic Regression, тощо) широко застосовуються для задач класифікації та виявлення аномалій у геофізичних і акустичних даних. Типовий підхід полягає в тому, що первинний сигнал попередньо обробляється – виконується фільтрація, спектральний аналіз, розрахунок статистичних характеристик або ручне виділення ознак (features), після чого сформований вектор ознак подається на вхід класифікатора [27].

До переваг традиційних ML-підходів можна віднести відносно простоту реалізації та навчання моделей, менші вимоги до обчислювальних ресурсів, можливість часткової інтерпретації результатів та придатність для невеликих навчальних вибірок. В якості недоліків традиційних ML-підходів можна виділити критичну залежність від якості ручного виділення ознак, слабку здатність працювати з високорозмірними сигналами, обмежену ефективність у разі нелінійних і складних взаємозв'язків у даних та значне падіння точності за наявності сильних шумів і варіативних умов вимірювання.

У задачах розпізнавання підземних порожнин ці недоліки стають особливо критичними, оскільки акустичні сигнали мають складну часово-частотну структуру, а їх форма істотно змінюється залежно від типу ґрунту, геометрії порожнини та зовнішніх завад. У таких умовах ручне формування ознак часто призводить до втрати значної частини корисної інформації.

3.2. Підходи на основі глибокого навчання

Глибоке навчання принципово змінює підхід до аналізу підземних сигналів, оскільки нейронні мережі здатні автоматично виділяти інформативні ознаки без явного задання фізичної моделі середовища [28]. Це особливо важливо для задач, де класичні припущення про однорідність або лінійність є неприйнятними.

Серед архітектур глибоких нейронних мереж використовуються повнозв'язані (fully connected) мережі, рекурентні мережі (RNN, LSTM), згорткові нейронні мережі (CNN) та гібридні архітектури.

Вибір архітектури нейронної мережі є критично важливим етапом при побудові інтелектуальної системи розпізнавання підземних порожнин, оскільки тип архітектури безпосередньо визначає здатність моделі виявляти інформативні закономірності в акустичних сигналах за умов високого рівня шумів, неоднорідності середовища та обмеженості апріорної інформації.

Згорткові нейронні мережі історично створювалися для аналізу зображень, проте їхня архітектура виявилася надзвичайно ефективною і для аналізу акустичних сигналів, поданих у вигляді спектрограм, скалограм або багатовимірних часових матриць [29].

Згорткові нейронні мережі мають низку переваг у задачах розпізнавання підземних порожнин. Вони здатні використовувати фільтри, які виявляють характерні локальні патерни в акустичних сигналах, що відповідають відбиттям, резонансам і зонам ослаблення хвиль, пов'язаних із наявністю порожнин. Завдяки локальним згорткам і багаторівневій ієрархії ознак CNN ігнорують випадкові шуми та концентруються на стабільних структурних елементах сигналу, що є критично важливим в умовах міської забудови та бойових дій. Також згорткові нейронні мережі здатні розпізнавати характерні ознаки незалежно від їх точного положення у часовому просторі сигналу та добре оптимізуються для паралельних обчислень, що відкриває можливість їх використання в мобільних або польових системах для оперативного прийняття рішень.

Наведені переваги підтверджуються сучасними дослідженнями [29, 30] у роботах з використанням CNN для ідентифікації підземних штучних порожнин та інверсії георадіолокаційних даних, де продемонстровано перевищення точності порівняно з традиційними ML-методами.

3.3. Поєднання згорткових нейронних мереж з акустичним методом

Акустичний метод є особливо привабливим для задач підземного зондування, оскільки акустичні хвилі легко генеруються, поширюються в різних типах ґрунтів та чутливо реагують на геометрію та механічні властивості порожнин.

Через те, що акустичні сигнали є надзвичайно складними для аналітичної інтерпретації, поєднання акустичного методу з CNN створюватиме синергетичний ефект: сигнали забезпечуватимуть багатий інформаційний вміст, а згорткові мережі – ефективно його вилучення та інтерпретацію. CNN дозволяють аналізувати часові характеристики сигналів та їх представлення, що значно підвищує ймовірність коректного виявлення підземних порожнин навіть за несприятливих умов.

4. Використання чисельного моделювання для задачі розпізнавання підземних порожнин

Через складність аналітичного розв'язання хвильових рівнянь у реальних умовах, з урахуванням неоднорідності середовища, зміни фізичних параметрів ґрунту, складних граничних умов та шумових впливів, аналітичні розв'язки стають практично

недосяжними або непридатними для використання в задачах практичного прогнозування поведінки хвильових полів. Тому в сучасних дослідженнях широко застосовується чисельне моделювання, яке дозволяє ефективно отримувати точні прогнози поведінки хвильових полів у складних середовищах та при складних граничних умовах, коли прямі математичні формули виявляються неефективними або неможливими для явного розв'язання.

Чисельне моделювання дає змогу не лише оцінювати розповсюдження хвиль у неоднорідних підповерхневих структурах, але й апроксимувати вплив складних геометрій і змінних властивостей матеріалів. Підхід базується на дискретизації простору та часу і систематичному розрахунку змін поля у кожній точці дискретної сітки.

Найпоширенішими методами чисельного моделювання є метод кінцевих різниць (FDM), метод кінцевих елементів (FEM) та метод кінцевих об'ємів (FVM).

4.1. Метод кінцевих різниць

Метод кінцевих різниць є одним із найдавніших і широко застосовуваних чисельних методів для моделей хвильових рівнянь. Він замінює похідні у диференціальних рівняннях їхніми апроксимованими різницевиими аналогами. Для простих задач FDM забезпечує відносно просту реалізацію та ефективну реалізацію на структурованих сітках.

Приклади його використання є в задачах обчислення сейсмічних хвиль з інверсією даних для реконструкції підповерхневих структур та роботі з сейсмічними хвилями у середовищах із аномаліями [31]. Дані дослідження також відмічають відносно просту реалізацію та низькі обчислювальні вимоги цього методу.

За допомогою метода кінцевих різниць можна сформулювати реалістичні хвильові сигнали із пустотами та урахуваннями підповерхневих аномалій, має він має труднощі з моделями складної геометрії та помітно високу чутливість до неоднорідностей та дисперсії, що не так відчутно в методах кінцевих елементів та кінцевих об'ємів. В свою чергу, дані недоліки можуть мати суттєвий негативний вплив під час навчання моделей нейронних мереж, оскільки вона буде вчитися на свідомо не точних даних, через що кінцева точність може бути недостатньо високою.

4.2. Метод кінцевих елементів

Метод кінцевих елементів розбиває обчислювану область на елементарні підобласті (елементи), де рішення апроксимується наближеними функціями. Він широко застосовується для розрахунків механічних і хвильових проблем, особливо у складних геометріях, оскільки легко адаптується до нерівномірних сіток та складних граничних умов.

Прикладами використання методу кінцевих елементів є задачі чисельного моделювання поширення сейсмічних хвиль із подальшою інверсією даних для реконструкції підповерхневих структур, а також дослідження поширення хвиль у середовищах зі

складними аномаліями та порожнинами різної геометрії [32]. У наведених роботах зазначається, що метод кінцевих елементів дозволяє точно враховувати складну геометрію середовища, нерівні межі розділу та неоднорідні матеріальні властивості, що є важливим для задач моделювання реальних ґрунтових умов.

Разом із цим, у наведених вище публікаціях відзначається, що попри високу точність і гнучкість геометричного опису, метод кінцевих елементів характеризується значно вищими обчислювальними витратами у порівнянні з методами кінцевих різниць та кінцевих об'ємів, а також підвищеними вимогами до генерації якісної сітки та стабільності чисельного розв'язання. Це може створювати додаткові труднощі при формуванні великих масивів синтетичних даних для навчання нейронних мереж, через що обмежується масштабованість та швидкість створення навчальних вибірок. Крім того, висока складність реалізації підвищує ризик накопичення чисельних похибок на етапі попереднього моделювання, що може призвести до формування частково спотворених навчальних даних і мати негативний вплив на кінцеву точність моделей.

4.3. Метод кінцевих об'ємів

Як і попередні методи, метод кінцевих об'ємів широко застосовується в задачах чисельного моделювання хвильових процесів у неоднорідних середовищах для розрахунку поширення акустичних та сейсмічних хвиль з метою відтворення підповерхневої структури [33]. Приклади його використання наведені в роботах, присвячених моделюванню хвильових полів у середовищах зі складною геометрією та різко вираженими фізичними контрастами, такими як порожнини, тріщини та техногенні аномалії [34, 35]. У цих дослідженнях підкреслюється, що метод кінцевих об'ємів забезпечує строге збереження фізичних законів (мас, імпульсу, енергії) на дискретному рівні, що є важливим фактором для формування фізично коректних хвильових сигналів.

На відміну від методу кінцевих різниць, метод кінцевих об'ємів значно краще працює зі складною геометрією області, що робить його придатним для моделювання реальних ґрунтових середовищ із підземними порожнинами різної форми [33]. Ця властивість є важливою для задач навчання нейронних мереж, оскільки модель буде отримувати фізично узгоджені репрезентативні навчальні вибірки, що матиме позитивний вплив на підвищення кінцевої точності розпізнавання.

Також у дослідженнях [34, 35] відзначається, що метод кінцевих об'ємів демонструє вищу чисельну стійкість у порівнянні з методом кінцевих різниць, особливо при моделюванні хвиль у середовищах із високими контрастами густини. Цей аспект є важливим, оскільки він показуватиме більш стабільні результати в місцях, де присутні різні типи ґрунтів.

Один з основних недоліків методу кінцевих об'ємів – це дещо вищі обчислювальні витрати у

порівнянні з методом кінцевих різниць. Але сучасні реалізації та можливість паралельних обчислень нівелюють цей недолік, що підтверджується практичними застосуваннями [35]. До того ж, метод кінцевих об'ємів все одно менш ресурсомісткий у порівнянні з методом кінцевих елементів.

Виходячи з наведеного вище, метод кінцевих об'ємів виглядає оптимальним рішенням, оскільки він поєднує високу точність, коректність та гнучкість щодо складної геометрії, що робить його використання доцільним для генерації навчальних даних у задачах розпізнавання підземних порожнин. Сформовані за його допомогою хвильові поля створюють надійну відправну точку для побудови стійких і високоточних систем аналізу підповерхневих структур.

Висновки

У результаті проведеного аналізу сучасного стану проблеми розпізнавання підземних порожнин можна зробити такі узагальнені висновки.

По-перше, традиційні аналітичні методи, попри їх фундаментальну значущість, мають обмежену практичну застосовність у реальних умовах через складність геометрії підповерхневих структур, неоднорідність ґрунтових середовищ і неможливість точного задання параметрів моделі. Це зумовлює необхідність переходу до чисельних методів, які забезпечують гнучкість і універсальність при моделюванні хвильових процесів.

По-друге, чисельне моделювання є ключовим інструментом для дослідження поведінки акустичних і сейсмічних хвиль у складних середовищах. Серед розглянутих чисельних підходів метод кінцевих об'ємів вирізняється як найбільш придатний для задач хвильової динаміки завдяки своїй консервативності, стійкості до різких змін параметрів середовища, здатності працювати зі складними геометріями та можливості розширення на мультифізичні моделі.

По-третє, аналіз інтелектуальних методів обробки даних показав, що традиційні алгоритми машинного навчання є обмеженими через залежність від ручного формування ознак і недостатню здатність працювати з високорозмірними сирими сигналами. Натомість методи глибокого навчання, зокрема згорткові нейронні мережі, забезпечують автоматичне виділення інформативних ознак, високу стійкість до шумів і кращу узагальнювальну здатність.

Поєднання акустичного методу зондування зі згортковими нейронними мережами створює ефективний інструментарій для розпізнавання підземних порожнин у складних умовах, де класичні методи є непридатними. Такий підхід дозволяє інтегрувати фізичну природу хвильових процесів із адаптивними можливостями штучного інтелекту, що відкриває перспективи створення точних, стійких і масштабованих систем підповерхневого моніторингу.

Отримані висновки формують науково-методологічну основу для подальших досліджень, спрямованих на розробку комплексних систем розпізнавання

підземних порожнин із використанням чисельного моделювання та нейронних мереж, а також підтверджують доцільність обраного напрямку дослідження.

Список літератури:

- [1] Rahimi, M., Wood, C. M., & Kallivokas, L. F. (2024). A comparative study of using geophysical methods for imaging subsurface voids of various sizes and at different depths. *Engineering Geology*, *341*, 107711. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107711>
- [2] Zhou, J., Feng, W., Guan, P., Liu, J., Zhang, H., & Wang, Z. (2025). Comprehensive detection of groundwater-affected ancient underground voids during old town renewal: A case study from Wuhan, China. *Water*, *17*(23), 3356. <https://doi.org/10.3390/w17233356>
- [3] Mevoli, F. A., Fazio, N. L., Perrotti, M., et al. (2024). Assessing the stability of underground caves through iSUMM (innovative, straightforward, user-friendly, mechanically-based method). *Geoenvironmental Disasters*, *11*, 10. <https://doi.org/10.1186/s40677-023-00264-3>
- [4] Steenkamp, C. (2022). The impact of tunnels on conflicts in the Middle East. *International Affairs*, *98*(2), 689–706. <https://academic.oup.com/ia/article/98/2/689/6530475>
- [5] Olson, K., & Morton, L. (2017). Why were the soil tunnels of Cu Chi and Iron Triangle in Vietnam so resilient? *Open Journal of Soil Science*, *7*, 34–51. <https://doi.org/10.4236/ojss.2017.72003>
- [6] Abuamer, M. (2024). Gaza's subterranean warfare: Palestinian resistance tunnels vs. Israel's military strategy. *Terrorism and Political Violence*. <https://doi.org/10.1080/1057610X.2024.2347843>
- [7] Dorsel, D. B. (n.d.). *Use of subterranean infrastructure in contemporary conflicts*. <https://oe.tradoc.army.mil/product/use-of-subterranean-infrastructure-in-contemporary-conflicts/>
- [8] Richemond-Barak, D. (n.d.). *From Gaza to Ukraine: Three principles of underground warfare*. <https://www.miryaminstitute.org/commentary-blog/from-gaza-to-ukraine-three-principles-of-underground-warfare>
- [9] Huning, L. S., Love, C. A., Anjileli, H., Vahedifard, F., Zhao, Y., Chaffe, P., Cooper, K., Alborzi, A., Pleitez, E., & Martinez, A. (2024). Global land subsidence: Impact of climate extremes and human activities. *Reviews of Geophysics*. <https://doi.org/10.1029/2023RG000817>
- [10] Ikuemonisan, F. E. (2025). An integrative review of land subsidence dynamics and monitoring in Nigeria. *Discover Environment*, *3*, Article 143.
- [11] Lee, S., Kang, J., & Kim, J. (2024). Prediction of ground subsidence risk in urban centers using underground characteristics information. *Applied Sciences*, *14*(23), 11044. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/23/11044>
- [12] Jacob, T., Pannet, P., Beaubois, F., Baltassat, J. M., & Hannion, Y. (2020). Cavity detection using microgravity in a highly urbanized setting: A case study from Reims, France. *Journal of Applied Geophysics*, *174*, 104113. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104113>
- [13] Pringle, J. K., Ruffell, A. H., Styles, P., et al. (2024). Forensic geoscience non-invasive detection and characterisation of underground clandestine complexes, bunkers, tunnels and firing ranges. *Forensic Science International*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379073824001142>
- [14] Paul, A., Jayapal, U. M., & Ayothiraman, R. (2025). A review of ground penetrating radar for underground utility detection and subsurface profiling: Challenges, strategies and a future-oriented framework. *Indian Geotechnical Journal*.
- [15] Hall, C. M. (n.d.). *An ominous effervescence: The Bayou Corne sinkhole*. <https://64parishes.org/an-ominous-effervescence>
- [16] Noshahri, H., Meijde, M., & Scholtenhuis, L. (2023). AI-assisted characterization of voids around sewer pipes using in-pipe GPR surveys. *SSRN*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4506855
- [17] Вижда, С. А., Рева, М. В., Онищук, І. І., & Онищук, В. І. (2013). *Електрометрія*. Київський університет.
- [18] Sutter, E. M., & Barounis, N. (2021). Underground void detection by applying electrical resistivity tomography (ERT) in a limestone quarry. *NZGS Symposium*.
- [19] Negri, S., & Barbolla, D. F. (2025). Challenges in the detection of water-filled cavities in karst environments using electrical resistivity tomography. *Geosciences*, *15*(9), 349. <https://doi.org/10.3390/geosciences15090349>
- [20] Liu, L., Shi, Z., Tsofilas, G. P., et al. (2022). Detection of karst voids by full-waveform inversion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *152*, 107048. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107048>
- [21] Jiang, W., Zelt, C. A., & Zhang, J. (2020). Detecting an underground tunnel using waveform inversion. *Journal of Applied Geophysics*, *174*, 103957. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103957>
- [22] Torrese, P. (2025). Near-surface cavity detection using ambient noise analysis. *Journal of Applied Geophysics*, *241*, 105858. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105858>
- [23] Ковальчук, В. В., Кравець, І. Б., & Лучко, Й. Й. (2019). Георадіолокація як неруйнівний метод моніторингу. *Дороги і мости*, 19–20, 117–137.
- [24] Allam, H., Metwally, A., Ismael, M., et al. (2025). Subsurface voids detection using GPR and ERT. *Pure and Applied Geophysics*, *182*, 4137–4167. <https://doi.org/10.1007/s00024-025-03805-z>
- [25] Lytvyn, V., Peleshchak, I., Peleshchak, R., et al. (2023). Hybrid neural network model for mine detection. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *3*(9), 78–85.
- [26] Dai, Q., Lee, Y. H., Sun, H., et al. (2023). 3DInvNet: A deep learning-based GPR data inversion. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2305.05425>
- [27] Zeng, A., Yan, L., Huang, Y., et al. (2021). Intelligent detection of small faults using SVM. *Energies*, *14*(19), 6242.
- [28] Yu, S., & Ma, J. (2021). Deep learning for geophysics. *Reviews of Geophysics*, *59*(3).
- [29] Xia, J., Peng, R., Li, Z., et al. (2023). Identification of underground artificial cavities. *Sensors*, *23*(19), 8169.
- [30] Vesala, G. T., Ghali, V. S., Subhani, S., et al. (2022). CNN-based subsurface anomaly detection. *SN Computer Science*, *3*, 219.
- [31] Vanga, M., Ojha, M. (2025). Modeling the seismic wave equation using a staggered grid finite-difference method optimized with a genetic algorithm. *Journal of Seismic Exploration*, *34*(2), 1–13. <https://doi.org/10.36922/JSE025290035>
- [32] Li, J., Wan, J., Wang, T., et al. (2022). Leakage simulation and acoustic characteristics. *Advances in Geo-Energy Research*, *6*(3), 181–191. <https://doi.org/10.46690/ager.2022.03.02>
- [33] Praditia, T., Karlbauer, M., Otte, S., et al. (2021). Finite volume neural network. *ICLR SimDL Workshop*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.06010>
- [34] Cen, J., & Zou, O. (2024). Deep finite volume method for PDEs. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.06863>
- [35] Li, T., Zou, Y., Zou, S., et al. (2025). Finite volume-informed neural networks. *Journal of Computational Physics*, *530*, 113919. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2025.113919>

Received (Надійшла) 10.12.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.01.2026

Publication date (Дата публікації) 27.03.2026