

УДК 625.12:550.837.7

¹Ковальчук В. В., канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0003-4350-1756>

²Кравець І. Б., <https://orcid.org/0000-0002-2239-849X>

³Лучко Й. Й., д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-3675-0503>

¹Львівська філія Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Львів, Україна

²Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро, Україна

³Львівський національний аграрний університет, м. Дубляни, Україна

ГЕОРАДІОЛОКАЦІЯ ЯК НЕРУЙНІВНИЙ МЕТОД МОНІТОРИНГУ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Анотація

Вступ. У вступі коротко наведено основні фактори, що діють на земляне полотно залізничних і автомобільних доріг, котрі спричиняють виникнення та розповсюдження різного роду дефектів та деформацій. Надано коротку характеристику методу георадіолокації, описано загальний принцип дії георадара.

Проблематика. Застосування руйнівних методів моніторингу земляного полотна не дозволяє виявити зародження дефектів земляного полотна на ранніх стадіях, що в подальшому призводить до виникнення аварійних ситуацій та збільшення витрат на поточне утримання. У той же час застосування неруйнівних методів ускладнено у зв'язку з незначним досвідом їх застосування. Одним із таких неруйнівних методів є георадіолокація.

Мета. Метою роботи є огляд та аналіз існуючих досліджень, які присвячені методу георадіолокації, як одного з перспективних неруйнівних методів діагностики земляного полотна.

Матеріали і методи. Використано методи аналізу та синтезу при вивченні існуючого досвіду застосування георадіолокаційних досліджень, які наведено в літературних джерелах.

Результати. На основі аналізу досліджень у напрямі застосування георадіолокаційного методу встановлено історичний розвиток та фізичну сутність зазначеного методу. Приведено особливості поширення хвиль у гірських породах з урахуванням їх характеристик. Розглянуто основні залежності та припущення, що використовуються при обстеженнях (дослідженні) різних споруд та об'єктів георадіолокаційним методом. Описано та проаналізовано результати обстежень методом георадіолокації. Показано можливість контролю якості виконаних робіт та порівняння з проектними рішеннями.

Висновки. Аналіз світового та вітчизняного досвіду застосування георадіолокаційного методу показує, по-перше, що георадари можуть ефективно використовуватися для загального обстеження протяжних ділянок земляного полотна. Їх основними перевагами є оперативність проведення робіт і низька трудоемкість. По-друге, застосування георадара, зокрема при дослідженні залізничних перегонів, є ефективним інструментарієм виявлення в земляному полотні дефектів різного типу і своєчасного ліквідування виявлених недоліків.

У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею є проведення досліджень та розробка рекомендацій щодо георадіолокаційного моніторингу і оцінки технічного стану земляного полотна.

Ключові слова: георадіолокація, моніторинг, георадар, земляне полотно, електромагнітна хвиля.

Вступ

Під час експлуатації земляне полотно як залізничних, так і автомобільних доріг зазнає різних впливів: динамічне навантаження від рухомих одиниць, температурних, атмосферних опадів, що призводить до виникнення та розповсюдження дефектів, деформацій і пошкоджень, які в подальшому становлять загрозу безпеці руху транспорту.

На даний час існує велика кількість методів для дослідження стану земляного полотна, як руйнівним так і неруйнівним методами, одним із таких методів є георадіолокація. Даний метод дозволяє швидко та економічно вигідно діагностувати стан земляного полотна. Георадіолокація (підповерхневе радіолокаційне зондування; англ. Ground-penetrating radar, GPR) – метод, заснований на випромінюванні імпульсів електромагнітних хвиль і реєстрації сигналів, відбитих від різних об'єктів досліджуваного середовища. На вході середовища генерується електромагнітний імпульс, а на виході приймальною антеною сприймається відгук середовища, що є сукупністю хвиль, які відрізняються між собою часом проходження, інтенсивністю і формою. У кінематичних і динамічних характеристиках цих хвиль міститься інформація про середовище. Прилад, в якому реалізовані принципи георадіолокації, називається георадаром. Принцип дії георадара заснований на випромінюванні надширококутових імпульсів метрового і дециметрового діапазону електромагнітних хвиль і приймальної відгуку – сигналу, що є суперпозицією амплітуд прямих, відображених і заломлених хвиль, які досягли прийомної антени.

Для визначення можливості та перспектив використання георадіолокації як неруйнівного методу моніторингу земляного полотна необхідно провести огляд існуючих досліджень в у зазначеному напрямі.

Виклад основного матеріалу

Аналіз робіт в області георадіолокаційних досліджень

В середині 50-х років А. Г. Тархов та інші, розробляли метод, заснований на напруженості електромагнітного поля віддалених радіостанцій від геологічної будови даної ділянки місцевості. Аналогічні дослідження були проведені Дж. Вейтом, який теоретично обґрунтував різні випадки розповсюдження радіовипромінювання в слоїстих середовищах [1], та Л. М. Бреховских [2]. В кінці 50-х років [3] А. Д. Петровський створив апаратуру радіопросвічування, Г. Я. Черняк досліджував радіохвильове профілювання з використанням методики настройки антен, а також станцій радіохвильового зондування на основі інтерференційного методу.

Для середовищ з великим затуханням радіохвиль широко використовували в радіолокації діапазони дециметрового і тим більше сантиметрового хвиль виявилися непридатними. Потрібен був перехід в метровий і декаметровий діапазони, що погіршило б роздільну здатність методу по дальності. У зв'язку з цим було прийнято застосування радіоімпульсів, що включають декілька і навіть один період височастотних коливань (одноперіодні імпульси, або моноімпульси). Для формування таких імпульсів ефективним виявилось запропоноване Дж. Куком в 1956 р. збудження широкополосної антени перепадом напруги – ударним збудженням антен.

Наземні радіолокатори підповерхневого зондування, в яких застосовується ударне збудження антен, працюють переважно в інтервалі частот 15 - 500 МГц, причому нижня межа частіше всього близько 100 МГц. Цей метод успішно застосовано для зондування у вапняку та вугіллі [4], в сухому доломіті товщиною 75 м [5], а також для виявлення закритих труб та інших подібних предметів на глибині до 8 м у прісній воді, мерзлих та звичайних ґрунтах [4]. Під час зондування мерзлих ґрунтів було показано можливість картування структурних неоднорідностей в інтервалі глибин 3 - 30 м [6].

Теоретичним та практичним аспектам підповерхневого радіолокаційного зондування присвячено велику кількість наукових робіт [3, 6-14]. Вагомий внесок у розвиток радіолокаційного підповерхневого зондування внесли вчені: А. Р. Annan (Канада); J. L. Davis (США); J. D. Daniels (Великобританія); М. Vano (Франція); Т. Dahlin (Швеція); М. И. Финкельштейн, М. Л. Владов, А. В. Старовойтов, С. В. Изюмов, С. В. Дручинин, А. С. Вознесенский, А. Ю. Гринев (Росія); Д. М. Ваврів, В. Г. Сугак, О. О. Вертій, А. М. Куделя (Україна) та інші.

Дослідженнями в області застосування методу георадіолокації, як і інших геофізичних методів при діагностиці земляного полотна залізничних і автомобільних доріг займалися вчені: Г. Г. Коншин, А. Г. Круглий, Е. С. Ашпиз, В. А. Явна, В. И. Грицьк, А. М. Кулижников (Росія); В. Д. Петренко [15,16], А. Г. Батракова [17] (Україна).

Відомими компаніями та організаціями, які займаються розробкою георадарів та програмного забезпечення, є: Transient Technologies, EASYRAD GPR (Україна); ООО «Геологоразведка», ОАО «ВНИИСМИ», ООО «ТАЙМЕР», ООО «ЛОГИС» (Росія); GSSI (США); Sensor and Software Inc (Канада); Geoscanners AB та MALA (Швеція); US Radar Inc (Великобританія); Radar Systems (Латвія); OYO corporation та NTT (Японія); GEOZONDAS (Литва) та інші.

На даний час область застосування методу георадіолокації (рис. 1) достатньо обширна та швидко розвивається: цивільна інженерія [18]; археологія [19]; гідрологія [20]; громадська безпека та криміналістика [21]. У транспортному будівництві метод застосовується для неруйнівного контролю залізничних та автомобільних доріг; для контролю якості під час будівництва насипів; для оцінки внутрішнього стану дорожніх конструкцій; для оцінки стану покриття в аеропортах; при діагностиці залізничного та автомобільного земляного полотна та його основи; для визначення ступеня забрудненості баластного шару і виявлення місць розташування баластних заглиблень в основній площадці залізничного земляного полотна; для встановлення рівня ґрунтових вод; для встановлення меж промерзання земляного полотна; при обстеженні підпірних стін, мостів та тунелів, [7, 10, 11, 22–31, та інші].

У працях [32, 33] наведено застосування георадарів, у гірничій галузі, інженерами для забезпечення безпеки гірничих робіт, вимірювання глибини залягання корінних порід, картографування піщано-гравійних покладів, визначення товщини порід, а також пошуку корисних копалин. Автори [34] пропонують застосовувати георадаріолокацію як самостійний геофізичний метод, так і в комплексі з іншими геофізичними методами для: побудови геологічних розрізів, визначення меж пластів; прогнозування потенційно викиднебезпечних зон тектонічних порушень; моніторингу стану вугільних пластів і вміщуючих їх порід покрівлі та подошви; випереджуюче сканування масиву порід в процесі проходки виробок (транспортних, дренажних, вентиляційних виробок, лав, тощо); визначення точного положення підземних об'єктів перед бурінням або початком роботи в забої; визначення рівня ґрунтових вод, зон надлишкового обводнення; визначення виходів корінних порід і т.д.; виявлення ділянок розвитку небезпечних геологічних процесів – карстових порожнин, порожнин, суфозії, зсувів, тектонічних порушень і зон тріщинуватості, зон розущільнення, меж лінз, пливунів; побудова детальних геологічних розрізів між геологорозвідувальними свердловинами; контроль товщини бетонних стін шахтних стволів, шурфів, пошук дефектів кріплення.

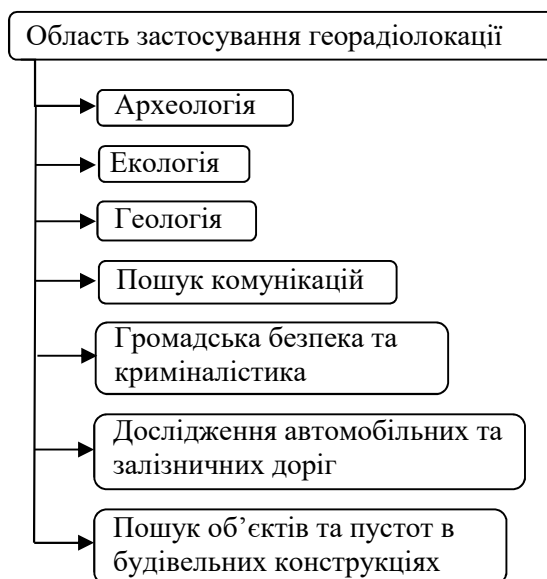


Рисунок 1 – Область застосування методу георадіолокації

У праці [35] наведено результати георадарних обстежень насипів при доповненні до традиційних технологій інженерних вишукувань, що дозволяють виявляти підтоплені місця і ступінь їх пошкодження, що є необхідним для призначення відповідних заходів щодо запобігання подальшого розвитку пошкоджень. Показано можливість контролю якості виконаних робіт і відповідність проектних рішень дійсності. Автор зазначає, що необхідно формувати електронну базу даних для систематизації та зберігання інформації, яка містить результати георадіолокаційного обстеження насипу, для створення ефективної системи моніторингу за підтопленими насипами, потенційно схильними до руйнування.

У праці [36] зазначено результати обстеження земляного полотна за допомогою георадіолокаційного зондування на об'єктах реконструкції і капітального ремонту залізниць. Автор зазначає, що застосування георадіолокаційного зондування створює передумови для обґрунтованого проектування заходів по оздоровленню земляного полотна: влаштування шарів з геотекстилю та георешіток, глибока вирізка баласту і планування основної площадки, осушення баластних лож і мішків, відсипання контрбанкетів, влаштування контрфорсів і габіонів, підпірних стінок, присипок і ін. Економічний ефект при виконанні інженерно-геологічних вишукувань із застосуванням георадарів для обстеження земляного полотна залізниць досягається за рахунок скорочення бурових робіт і підвищення якості одержуваної інформації за результатами досліджень. Достовірність обстеження земляного полотна із застосуванням георадарних технологій збільшується в середньому в кілька разів. Кількість свердловин контрольного буріння необхідно визначати за результатами георадіолокаційного зондування з урахуванням того, в яких місцях виникають труднощі при інтерпретації радарограм. Згідно аналізу радарограм та результатів інженерно-геологічних робіт (з відбором проб), встановлено, що за допомогою аналізу амплітуд сигналу в кожній точці зондування можна визначати вологість як ґрунтів, що складають земляне полотно, так і баластної призми, що дозволяє, в свою чергу, попереджувати деформації основної площадки земляного полотна та баластної призми.

У праці [37] окреслено результати контролю якості закріплення просадкових ґрунтів за допомогою георадіолокаційного обстеження масиву з подальшою обробкою отриманих даних в автоматизованому режимі з побудовою розрізів добротності поля зворотнього розсіювання. Показано, що проведення робіт по запропонованій методиці дозволяє з одного боку підвищити якість закріплення ґрунтів, а з іншого – знизити витрати на виконання робіт. Розглянуто результати натурних спостережень за змінами значень добротності при ін'єкційному зміцненні ґрунту основи в режимі гідророзриву. Таким чином, застосування георадіолокації згідно запропонованої методики, може стати одним з ефективних засобів визначення якості закріплення ґрунтів основ фундаментів. В роботі показано, що сучасні комп'ютерні програми обробки георадіолокаційних спостережень дозволяють на більш високому технологічному рівні вирішувати практичні завдання на будівельних об'єктах, зокрема в методах неруйнівного контролю. Отримувані з їх допомогою дані показують наявність ін'єкційного розчину в масиві, його просторовий розподіл, розташування розущільнених зон ґрунту, в тому числі і на контакті з фундаментом, дозволяють переходити до значень щільності.

У праці [38] наведено приклад виконання геофізичних досліджень методами георадіолокації і електротомографії в межах інженерних вишукувань на ділянці будівництва залізничної естакади. Особливістю ділянки є підвищений рівень техногенних перешкод, які мають значний вплив на польові дослідження електророзвідувальних робіт, збільшуючи похибку вибору електротомографічної моделі, тим самим знижуючи однозначність геологічної інтерпретації на етапі камеральної обробки. Розглядається підхід до спільної обробки та інтерпретації геофізичних даних, коли при розрахунку електротомографічної моделі в якості апріорних даних використовуються літологічні межі, виділені за даними георадіолокації.

Автори зазначають, що розрахунок геоелектричних моделей з урахуванням георадіолокаційних даних дозволив знизити неоднозначність розв'язання оберненої задачі, обумовленої впливом техногенних перешкод, на ділянці смуги відведення діючої залізниці, тим самим підвищивши достовірність геологічної інтерпретації геофізичних даних.

У праці [39] проведена апробація і впровадження сучасної технології георадіолокації для вирішення інженерно-технічної задачі в процесі проектних і будівельних робіт на прикладі вивчення стану вертикальної підпірної стінки на зсувному схилі. Встановлено, що: контакт стіни з ґрунтом можна вважати відносно рівномірно щільним, причому для бічної стіни нижня частина більш щільна, ніж верхня, а для лицьової стіни спостерігається менш щільний контакт в діапазоні 20–25 метрів від лівого краю стіни; бетонна стіна споруджена на пальовій основі з металевих шпунтів (сталевих труб).

Автори зазначають, що перевага сучасної технології георадіолокації при виявленні дефектів бетонних конструкцій полягає в мобільності натурних спостережень і в створенні нових програмних продуктів обробки радарограм, що дозволяє поряд з аналізом первинної хвильової картини створювати її математичну фільтрацію за допомогою побудови наближеної моделі середовища в параметрах електромагнітного поля і тим самим виділити об'єкти на фоні перешкод. Недоліком георадіолокаційних вимірювань, на відміну від ультразвукових і сейсмоакустичних, є відсутність на даний момент кількісних кореляційних залежностей, що дозволяють оцінювати фізико-механічні властивості бетону.

Актуальним завданням вдосконалення методів неруйнівного контролю вертикальних бетонних споруд є розробка: технологій безперервного запису параметрів поля в русі за допомогою використання спеціальних гідравлічних подушок в ультразвукових і акустичних приладах; малогабаритних багаточастотних ультразвукових, акустичних і георадарних апаратних комплексів, що містять два і більше приймальних блоки, рівновіддалених від генератора.

У праці [40] запропоновано методику безперервного визначення властивостей конструкційних шарів, що базується на георадіолокаційному методі, тарованого прямими

вимірюваннями властивостей конструкції. Розглянуто різні методи визначення діелектричної проникності піщано-гравійної суміші і її змін, пов'язаних зі зміною характеристик ґрунту в процесі ущільнення. Також визначено значення усадки ґрунту в процесі ущільнення з урахуванням змінного значення діелектричної проникності, отримано залежність щільності ґрунтів в різних шарах по глибині від кількості проходів котка. Ефективність запропонованих методів перевірена на ділянці земляного полотна при пробному ущільненні.

Основні історичні дані та характеристики георадіолокаційного методу

Георадіолокація є одним із прогресивних методів дослідження стану інженерних споруд і таким, що викликає інтерес серед фахівців, що займаються неруйнівними дослідженнями. У 1910-1911 рр. німецькими вченими Г. Леві та Г. Леймбахом встановлено, що деякі гірські породи (кам'яна сіль, гіпс, сухий пісок) можна дослідити за допомогою радіохвиль без проблем, а для інших (наприклад, для глини) виникають певні обмеження. Вони також запропонували в 1912 році інтерференційний метод для пошуку води та руд. Якщо змінити частоту генератора при певній відстані між приймальною та передавальною антенами, що розташовані на поверхні землі, то в приймачі фіксуються максимуми та мінімуми сигналів, викликані інтерференцією прямої і відбитої від підповерхневого шару хвиль. Застосуванням цього методу до льодовиків експериментально досліджував німецький вчений В. Штерн (1929 р.), а для визначення рівня ґрунтових вод у пустині – Ель-Саїд (1956 р.) [3].

Фізична сутність георадіолокації

У 1873 році шотландський математик-фізик Джеймс Клерк Максвелл узагальнив експериментальні закони Кулона, Біо-Савара-Лапласа, Ампера, Фарадея і сформулював рівняння які стали фундаментом всієї електродинаміки. Максвелл запропонував теорію електромагнітного поля, яка класифікує світло як електромагнітне явище так само, як електрика і магнетизм. Закон Кулона показує, що електричний заряд оточений електричним полем, який діє на інші заряди, змушуючи їх пересуватися, якщо вони вільно це роблять. Закон Ампера показує, що електричний заряд (або струм), що рухається в провіднику, створює магнітне поле, пропорційне швидкості заряду. Якщо електричне поле збільшується, так що заряд прискорюється, його швидкість зміни призводить до зміни магнітного поля, що, у свою чергу, індукує інше електричне поле в провіднику (закон Фарадея) і тим самим впливає на рух прискореного заряду. З'єднання електричного та магнітного полів називається електромагнетизмом. Якщо два провідники покладені наскрізними і поєднані послідовно, вони діють як електричний диполь. Змінне електричне поле, що застосовується до провідників, призводить до коливання диполя, що діє як антена для випромінювання хвилі ЕМ. Електромагнітні 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.

У методі георадіолокації поширення електромагнітних хвиль в середовищі описується фундаментальними рівняннями електродинаміки Максвелла (1–4), щоб отримати повну систему рівнянь електромагнітного поля до рівнянь (1–4) додають матеріальні рівняння (5–7), що враховують властивості середовища:

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (4)$$

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (6)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (7)$$

де \vec{H} – напруженість магнітного поля, А/м;
 \vec{D} – електрична індукція, Кл/м²;
 \vec{j} – щільність струму провідності, А/м²;
 \vec{E} – напруженість електричного поля, В/м;
 \vec{B} – магнітна індукція, Тл;
 ρ – щільність електричного заряду, Кл/м³;
 ∇ – диференціальний оператор Набла;
 ϵ – відносна діелектрична проникність середовища;
 ϵ_0 – електрична постійна, $8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;
 μ – відносна магнітна проникність середовища;
 μ_0 – магнітна постійна, $1.257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м;
 σ – питома провідність середовища, См/м (сіменс на метр).

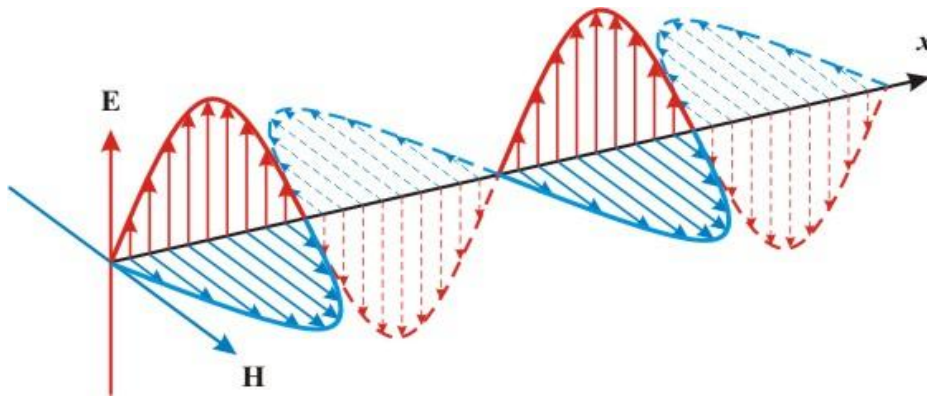


Рисунок 2 – Електромагнітна хвиля

Урахування електрофізичних характеристик гірських порід

При застосуванні радіолокаційних досліджень необхідно враховувати загасання, швидкості поширення радіовипромінювання, частотну дисперсію та інші параметри у різних середовищах: ґрунті, піску, суглинку, воді, повітрі, льоді, конструкційних матеріалах, середовищах з різною вологістю тощо [2, 7, 8].

Питоме загасання, яке визначає глибинність зондування, та швидкість поширення електромагнітних хвиль в середовищі визначаються її електричними властивостями і є найбільш важливими параметрами, які характеризують можливості застосування методу георадіолокації. Оскільки всі речовини, окрім металів, можуть бути віднесені до діелектриків із кінцевою провідністю, то вводиться комплексна відносна діелектрична проникність:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'', \quad (8)$$

де ϵ – комплексна відносна проникність;
 ϵ' – дійсна частина, пов'язана з поляризацією діелектрика під дією прикладеного поля;
 ϵ'' – уявна частина, пов'язана з кінцевою провідністю діелектрика (в Ом/м):

$$\sigma = \omega \varepsilon'' \varepsilon_0, \quad (9)$$

де ω – частота прикладеного електромагнітного поля.

Для характеристики діелектричних втрат застосовують тангенс кута діелектричних втрат, яка визначається як відношення уявної та дійсної частини відносної діелектричної проникності:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon' \varepsilon_0}, \quad (10)$$

де $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат.

Для георадіолокації необхідно також знати дисперсію діелектричної проникності її залежність від частоти прикладеного електромагнітного поля. Цю складову визначають експериментальним шляхом. Від діелектричної та магнітної проникності залежить швидкість поширення електромагнітних хвиль в діелектриках. Оскільки для більшості гірських порід [7] значення магнітної проникності приблизно становить 1 і не залежить від частоти, то фазова швидкість поширення хвилі становитиме

$$V = \frac{c}{\operatorname{Re} \varepsilon} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon'}}, \quad (11)$$

де c – швидкість поширення електромагнітних хвиль у вакуумі.

Співвідношення (12) – одне з найбільш важливих для радарних досліджень, оскільки V – вимірювана величина, а ε' – властивість речовини.

При цьому коефіцієнт загасання буде

$$\alpha = (\omega/c) \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon}, \quad (12)$$

довжина хвилі в середовищі дорівнюватиме

$$\lambda = c/\omega \sqrt{\varepsilon'}, \quad (13)$$

звідси питоме загасання, тобто загасання хвилі на одиницю довжини шляху в децибелах на метр (дБ/м) буде

$$\tilde{A} = (54,6/\lambda) \sqrt{\varepsilon}. \quad (14)$$

Для практичного застосування формулу (15) розбивають на дві – для випадків з малими діелектричними втратами коли $\operatorname{tg} \delta < 0,3$ і з великими діелектричними втратами $\operatorname{tg} \delta \geq 0,3$ [7]

$$\tilde{A} = \begin{cases} \frac{27,3}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}, & \text{при } \operatorname{tg} \delta < 0,3 \\ \frac{38,6}{\lambda} \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}, & \text{при } \operatorname{tg} \delta \geq 0,3 \end{cases}. \quad (15)$$

Швидкість поширення імпульсу визначається як групова швидкість хвилі за рівнянням Релея

$$\frac{1}{V_{\Gamma}} = \frac{1}{V_{\Phi}} + \left(\frac{f}{c}\right) \frac{dn}{df}, \quad (16)$$

де n – комплексний коефіцієнт заломлення.

У слабо поглинальних середовищах відмінності між фазовою і групою швидкостями будуть невеликі. Отже, у результаті припущень про малість втрат, час пробігу хвилі через шар товщиною h буде визначатись за формулою $2h/V$ (а не за формулою $2h/V_{\Phi}$), де V – швидкість пробігу зондувального сигналу в шарі.

Проте аналіз показав, що залежність комплексної діелектричної проникності від частоти, визначається часом поляризації τ [41].

На рис. 3 показано кілька експериментальних залежностей, де для хвиль метрового діапазону – $f \approx 10^8$ Гц і більше значення діелектричної проникності вже практично не змінюються.

У результаті аналізу великої кількості лабораторних та натурних експериментів встановлено, що у діапазоні метрових хвиль дійсна частина комплексної діелектричної проникності ϵ' , а отже і швидкість поширення електромагнітних хвиль, практично не залежать від частоти і типу ґрунтів, а дуже сильно залежать від їх вологості. Вченими встановлено, що величина питомого опору породи також залежить від частоти електромагнітної хвилі, типу породи, її вологовмісту і мінералізації. Загальною закономірністю є зменшення питомого опору з ростом частоти, вологості і мінералізації води в породи глинястості породи.

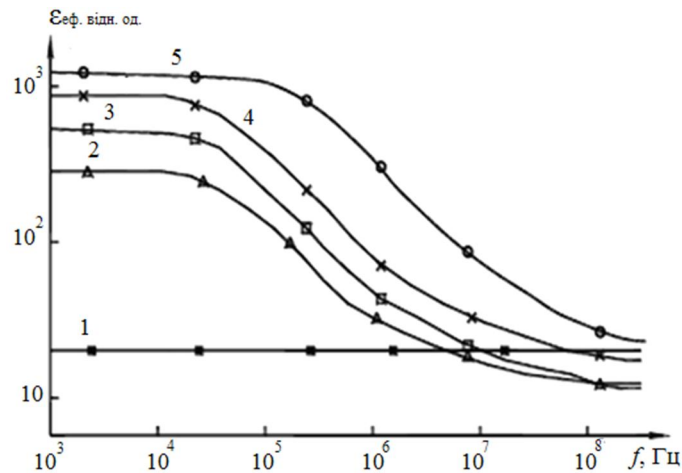


Рисунок 3 – Залежність діелектричної проникності різних порід від частоти [42]: 1 – пісок; 2 – суглинок (вологість 10 %); 3 – суглинок (вологість 20 %); 4 – суглинок (вологість 30 %); 5 – глина

Поширення електромагнітних хвиль в середовищі.

Поширення електромагнітних хвиль метрового діапазону, характерного для георадарних досліджень, розглядається в рамках законів геометричної оптики відповідно для плоских хвиль на великих віддальх від джерела і для сферичних хвиль на малих віддальх від джерела. Враховуючи контраст по діелектричній проникності штучних або природних шарів, можна їх відрізнити один від одного. Встановивши взаємозв'язок між діелектричною проникністю та характеристиками речовин стало можливим розв'язати інженерні задачі георадіолокації.

При визначенні швидкостей поширення і амплітуд хвиль у рамках допустимих похибок, діють принципи Ферма, Гюйгенса, Френеля і закон Снеліуса. Згідно [7] припускається, що в ізотропному середовищі промінь перпендикулярний фронту хвилі, і можливі геометричні побудови шляхів хвиль в середовищі з подальшим обчисленням параметрів середовища за вимірними кінематичними і динамічними характеристиками записів хвиль (радарограм).

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:

$$K_{\text{відб}} = (\sqrt{\epsilon'_1} - \sqrt{\epsilon'_2}) / (\sqrt{\epsilon'_1} + \sqrt{\epsilon'_2}). \tag{17}$$

Коефіцієнт заломлення (проходження через границю) буде рівний:

$$K_{\text{пр}} = 1 - K_{\text{відб}} = \frac{2 \sqrt{\varepsilon_2'}}{\sqrt{\varepsilon_1'} + \sqrt{\varepsilon_2'}}. \quad (18)$$

При дворазовому проходженні через границю, наприклад, при відбитті від більш глибокої границі, сумарне зменшення амплітуди сигналу буде дорівнює $1 - K_{\text{відб}}^2$.

Надзвичайно важливим для георадіолокаційних досліджень є явище дифракції, яке 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.

Факторами, що впливають на зменшення амплітуди зондувального сигналу (загасання сигналу), є [7]: відбиття і заломлення на проміжних границях; втрати, пов'язані з загасанням сигналу в середовищі; геометричне розсіювання фронту хвилі.

Останній фактор має значення на невеликих відстанях від джерела коливань в перші періоди хвиль, коли хвилю можна вважати сферичною і щільність потоку енергії від джерела зменшується обернено пропорційно площі поверхні фронту, а амплітуда, відповідно, обернено пропорційна радіусу сфери або відстані до джерела:

$$K_{\text{розх}} = \frac{1}{R}, \quad (19)$$

де R – відстань до джерела.

Для розрахунку зменшення амплітуди відбитої хвилі за рахунок розбіжності сферичного фронту R дорівнюватиме подвоєній глибині границі відбиття. Необхідно також враховувати, що в різних середовищах швидкість поширення хвиль різна.

Згідно [9] задачі, які вирішуються за допомогою георадіолокації, можна об'єднати в чотири основні групи: 1) вивчення геологічної будови перерізу; 2) пошук різноманітних об'єктів; 3) дослідження різних конструкцій; 4) вивчення фізико-механічних властивостей матеріалів і об'єктів.

Приклади застосування георадіолокаційного обстеження в різних галузях

При пошуку різноманітних об'єктів.

Задачі з пошуку різних об'єктів є одними із основних напрямків георадіолокаційних досліджень. До них відносяться пошук трубопроводів, кабелів, валунів, залишки будівельних конструкцій, емностей, порожнин, археологічних об'єктів і ін. більше інформації в даному напрямку наведено у [7, 9, 11, 43 та інші].

Найбільш проста хвильова картина спостерігається при георадіолокаційному профілюванні над трубами, як правило на радарограмі видно тільки теоретична вершини гіперболи (рис. 4). Аналіз досвіду дослідників, які займаються питаннями георадіолокації, показує, що інформативність георадарного знімання залежить не тільки від складу породи, але і від її зволоженості та погодних умов. На рис. 5. наведено фрагмент георадіолокаційного профілю, виконаний над трубою діаметром 20 см, яка знаходиться на глибині 50 см. a – в суху погоду, b – після дощу. Вимірювання проводили з інтервалом у 2 тижні, використовували антену 500 МГц. Стрілками показано положення труби. З рисунку видно, що осі синфазності від труби добре простежуються в сухому ґрунті a , ніж у вологому b [9].

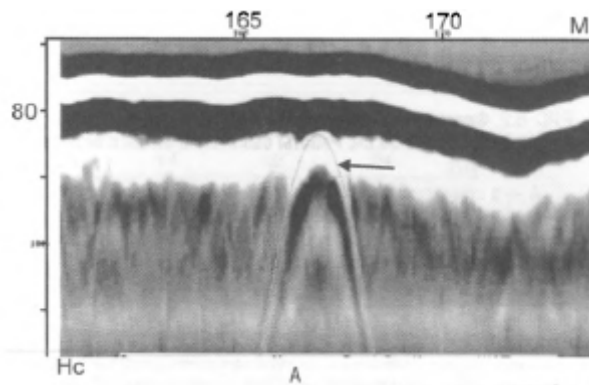


Рисунок 4 – Фрагмент георадіолокаційного профілю, стрілкою показана теоретична гіпербола, це свідчить про наявність труби [9]

При обстеженнях дорожнього покриття та злітно-посадкових смуг. Дане георадіолокаційне дослідження включає в себе: пошук порожнин під покриттями; пошук місць з підвищеною вологістю; пошук ділянок розущільнення; пошук тріщин в покриттях і основах; визначення товщини покриття; визначення внутрішнього стану покриття і ін., більше інформації в даному напрямку наведено у [9, 11, 35, 43, 44, та інших].

Як зазначено у [11], однією з проблем експлуатації доріг є ліквідація просадок і провалів дорожнього полотна, що викликають, як правило, порушення режимів руху, а в деяких випадках і серйозні аварії. Причин утворення просадок і провалів досить багато, але основними є: порушення технології спорудження ґрунтової основи і дорожнього одягу, неякісно проведена зворотна засипка при прокладці комунікацій відкритим способом, аварії і нештатні ситуації під час прокладання під дорогою комунікацій за допомогою безтраншейних технологій, аварії на підземних водоносних комунікаціях, прояви карстово-суффозійних і зсувних процесів. Виявлення конкретних причин просадок дорожнього полотна сприяють прийняттю найбільш раціональних інженерних рішень для їх ліквідації.

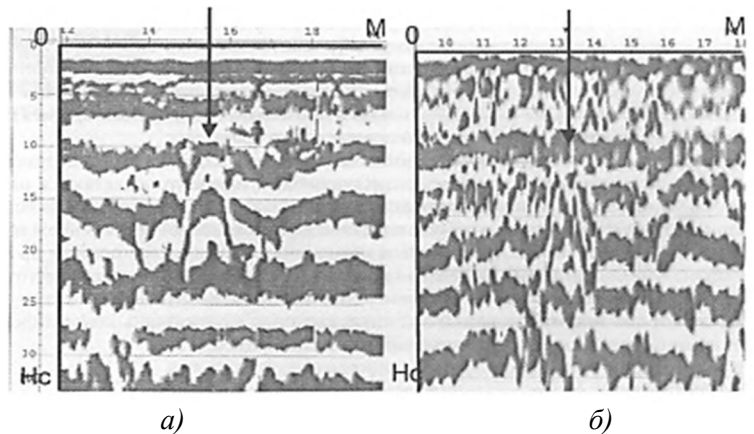


Рисунок 5 – Фрагмент георадіолокаційного профіля [9]: *а)* – суха погода; *б)* – після дощу
На рис. 6 приведено приклад георадіолокаційного зондування ділянки провалу на автодорозі та результат обробки.

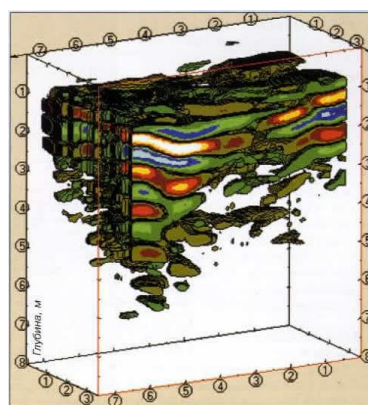


Рисунок 6 – Зондування місця провалу на автодорозі та його результат [43]

Із матеріалів, приведених у [9], видно, що використання антен з різною частотою дозволяє успішно визначати причини деформацій покриттів і за необхідності проводити моніторинг як дорожнього так і злітно-посадкового полотна.

При обстеженнях залізничного земляного полотна. В процесі експлуатації земляного полотна залізниці та підвищення навантаження в ньому виникають деформаційні процеси. Метою георадіолокаційних досліджень є пошук та попередження причин деформаційних процесів для їх уникнення та усунення. Задачі, що вирішуються при дослідженні: визначення товщини основних шарів земляного полотна; вивчення контурів шарів для виявлення просідань, баластних заглиблень, корит і ін.; виявлення місць скупчення грязевих гнізд або лінз, що приводять до утворення виплесків; пошук місць локального перезволоження; визначення товщини баластних шлейфів на відкосах; та ін.. більше інформації в даному напрямку наведено у [9, 10, 11, 15, 16, 43, 44, 45, 46, 47 та інших].

Поширеним дефектом баластної призми є утворення грязевих гнізд або лінз, що в подальшому веде до перезволоження, та під дією динамічного навантаження утворюється виплеск. На рис. 7. приведено забруднений баласт та радарограму на якій виділені місця забрудненого баласту (стрілкою на радарограмі показано верх забрудненого баласту, що відповідає лінії на фото).



а)



б)

Рисунок 7 – Фрагмент радарограми і розкопаний забруднений баластний шар [9]: а) – радарограма; б) – забруднений баластний шар

Однією з головних переваг георадіолокації у порівнянні з бурінням є можливість вести неперервну зйомку, тобто отримані дані становлять просторово-часовий переріз рис. 8.

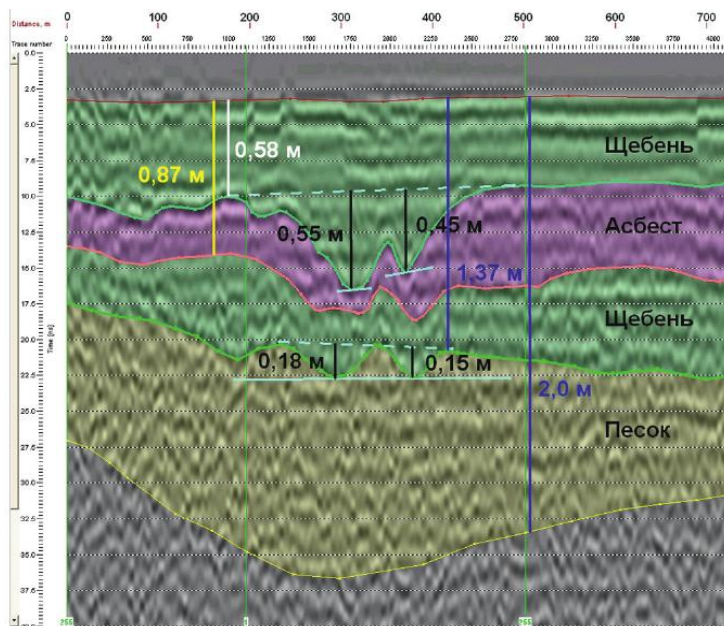


Рисунок 8 – Фрагмент радарограми насипу залізничної колії після інтерпретації [46]

Це дозволяє простежити стан і потужність ґрунтів насипу вздовж усього профілю, а не в його окремих точках. На даній ділянці наявні деформації земляного полотна, що становлять, в основному, просадки залізничної колії та розповзання насипу. Дані деформації усувались шляхом підсилення щебеню, що добре простежується на радарограмі. Щоб отримати дані про товщину щебеню класичним методом, довелося би пробурити не один десяток свердловин, які потребують значних витрат коштів і часу.

Висновки

На даний момент як на автомобільних, так і на залізничних дорогах найпоширенішими методами оцінки їх стану є візуальні огляди, які не завжди ефективні та надійні, їх результати у значній мірі залежать від кваліфікації інженера, що здійснює огляд. Дану ситуацію можна покращити методами використання засобів неруйнівного контролю оцінки технічного стану транспортних споруд, які експлуатуються на залізничних та автомобільних дорогах України.

Як показує аналіз застосування георадарів у країнах ЄС вони можуть ефективно використовуватися для загального обстеження протяжних ділянок земляного полотна автомобільних доріг та залізничних перегонів. Їх основними перевагами є оперативність проведення робіт і низька трудоемкість. Вони сприяють підвищенню достовірності інженерно-геологічної інформації і тим самим покращують якість і знижують вартість як проектної документації, так і будівельних, ремонтних і експлуатаційних робіт.

Застосування георадара, зокрема в інженерно-геологічних умовах залізниць України дозволить виявляти в земляному полотні дефекти різного типу і прийматись своєчасні рішення із метою усунення хворих місць. Використання георадіолокації дозволить простежити стан і потужність ґрунтів насипу вздовж усього профілю, а не в його окремих точках.

На сьогоднішній день немає практичних рекомендацій із оцінки технічного стану земляного полотна георадіолокаційним методом. Тому напрямком подальшої науково-дослідної роботи є проведення фундаментальних досліджень, щодо ефективності застосування георадарних технологій в різних середовищах при різній температурі, щільності та вологості ґрунту.

У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею є проведення досліджень та розробка рекомендацій щодо георадіолокаційного моніторингу і оцінки технічного стануземляного полотна.

Список літератури

1. Wait J. R. *Electromagnetic Waves in Stratified Media*. Macmillan. New York, 1962. Ch. 2. 515 p.
2. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. Москва, 1973. 344 с.
3. Финкельштейн М. И., Кутев В. А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. Москва, 1986. 128 с.
4. Cook J. C. Radar Transparencies of Mine and Tunnel Rocks. *Geophysics*. United States, 1975. Vol. 40. N 5. P. 865-885. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1440573> (дата звернення: 26.02.2019).
5. Lambert T. Dolphin, Robert L. Bollen, and George N. Oetzel. An underground electromagnetic sounder experiment. *Geophysics*. United States, 1974. Vol. 39. N 1. P. 49-55. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1440411> (дата звернення: 26.02.2019).
6. Annan A. P., Davis J. L. Impulse radar sounding in permafrost. *Radio Science*. 1976. Vol. 11. Issue 4. P. 383-394. DOI: <https://doi.org/10.1029/RS011i004p00383> (дата звернення: 26.02.2019).
7. Владов М. Л. Введение в георадиолокацию. Москва, 2004. 153 с.
8. Финкельштейн М. И., Кутев В. А., Метелкин В. Н. Подповерхностная радиолокация. Москва, 1994. 216 с.
9. Старовойтов А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. Москва, 2008. 192 с.
10. Гринев А. Ю. Вопросы подповерхностной радиолокации. Москва, 2005. 416 с.
11. Изюмов С. В., Дручинин С. В., Вознесенский А. С. Теория и методы георадиолокации. Москва, 2008. 196 с.
12. Финкельштейн М. И., Мендельсон В. А., Кутев В. А. Радиолокация слоистых земных покровов. Москва, 1977. 176 с.
13. Daniels D. J. Ground Penetrating Radar. *Institution of Electrical Engineers*. London, 2009. 734 p.
14. Jol H. M. Ground penetrating radar: theory and applications. Amsterdam: *Elsevier Science*, 2008. 508 p.
15. Петренко В. Д., Харлан В. И., Косяк В. Н., Ковалевич В. В. Применение георадиолокационного метода при исследовании дефектов высоких насыпей железнодорожного земляного полотна. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Днепропетровск, 2011. Вып. 61. С. 312-316.
16. Petrenko V. D., Kovalevych V. V. The results of the defect places investigation of Donetsk railway road bed by ground penetrating radar complex. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. Дніпропетровськ, 2014. N 5 (53). С. 83-91. URL: <https://studfiles.net/preview/8163899/> (дата звернення: 26.02.2019).
17. Батракова А. Г., Процюк В. О. Визначення вологості ґрунту земляного полотна із застосуванням польового георадару. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2017. Вип. 100. С. 48-56. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtdorogi_i_stroitelstvo/100/048-056.pdf (дата звернення: 26.02.2019).

18. Benedetto A, Pajewski L. Civil engineering applications of ground penetrating radar. Springer: Transactions in Civil and Environmental Engineering. 2015. 371 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0> (дата звернення: 26.02.2019).
19. Бондар К. М., Бобровський Т. А., Цюпа І. В. Вивчення ефективності георадарних досліджень на території Національного заповідника «Софія Київська» для вирішення археологічних завдань. *Геоінформатика*. Київ, 2016. №4(60). С. 75-82. URL: <http://www.geology.com.ua/UK/geoinformatika-2016-460-75-82/> (дата звернення: 26.02.2019).
20. Бобров, Н. Ю., Крылов С. С., Киселев Е. Ю., Пряхина Г. В., Федорова И. В. Применение георадиолокации в гидрологии. *Записки Горного института*. Санкт-Петербург, 2009. Том 183. С. 219-223. URL: <http://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/1884/1959> (дата звернення: 26.02.2019).
21. John J. Schultz, Mary E. Collins, Anthony B. Falsetti. Sequential Monitoring of Burials Containing Small Pig Cadavers Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Forensic Sciences*. United States, 2006. Vol. 53. Issue 3. p. 607-616. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00129.x> (дата звернення: 26.02.2019).
22. Ашпиз Е. С. Мониторинг земляного полотна при эксплуатации железных дорог: монография. Москва, 2002. 112 с.
23. Коншин Г. Г. Методы и средства диагностики земляного полотна. Москва, 2004. 213 с.
24. Фоменко Н. Е., Гапонов Д. М., Капустин В. В., Попов В. В., Фоменко Л. Н. Возможности георадарного метода при обследовании подпорных стен и ограждающих конструкций. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. Томск, 2017. Том. 328. №3. С. 37-45. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1858> (дата звернення: 26.02.2019).
25. Казарин А. Б., Казарин Б. А., Гусев Д. Е., Пастушков Г. П., Пастушков В. Г., Жихарев Д. В. Практика использования георадарных технологий при обследовании тоннелей. *Наука та прогрес транспорту*. Дніпропетровськ, 2008. Вип. 21. С. 113-116. URL: <http://stp.diit.edu.ua/article/view/16294/15006> (дата звернення: 26.02.2019).
26. Набатов В. В., Гайсин Р. М., Вознесенский А. С. Георадиолокационная оценка качества контакта «грунт-обделка» в условиях тоннелей метрополитенов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. Москва, 2013. №9. С. 157-163. URL: <http://www.giab-online.ru/catalog/10794> (дата звернення: 26.02.2019).
27. Benedetto A, Manacorda G, Simi A, Tosti F. Novel perspectives in bridges inspection using GPR. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2012. Vol. 27. Ussue 3. P. 239-251. DOI: <https://doi.org/10.1080/10589759.2012.694883> (дата звернення: 26.02.2019).
28. Amir A. M., Aboutalebi M., Kilic G. Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment. *Journal of Applied Geophysics*. 2013. Vol. 97. P. 45-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.04.009> (дата звернення: 26.02.2018).
29. Su J., Zhang W, Xiang H, Guo X. Application and Analysis of Ground Penetrating Radar in Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Airport Runway. *Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 153. 2: 032011. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/153/3/032011> (дата звернення: 26.02.2019).
30. Масалов С. О., Почанін Г. П., Рубан В. П., Холод П. В. Радиолокаційний моніторинг технічного стану підповерхневої частини інженерних споруд. *Техническая диагностика и*

неразрушающий контроль. Київ, 2016. N 1. С. 17-23. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.01.03> (дата звернення: 26.02.2019).

31. Фоменко Н. Е., Гапонов Д. А., Капустин В. В., Попов В. В., Фоменко Л. Н. Возможности георадарного метода при обследовании подпорных стен и ограждающих конструкций. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. Томск, 2017. Т. 328. N 3. С. 37-45. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1858> (дата звернення: 26.02.2019)

32. Francke J. A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource evaluations. *Journal of Applied Geophysics*. 2012. Vol. 81. P. 29-37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.020> (дата звернення: 26.02.2019)

33. Peter Hatherly. Overview on the application of geophysics in coal mining. *International Journal of Coal Geology*. 2013. Vol. 114. P. 74-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.02.006> (дата звернення: 26.02.2019)

34. Медяник В. Ю., Довбніч М. М., Янкін Д. В. Моніторинг структур масивів гірських порід із застосуванням георадарів нового технічного рівня при підземній розробці газовугільних родовищ. Форум гірників - 2017: матеріали міжнародної конференції (4-7.10.2017 р., м. Дніпро,). Дніпро, 2017. С. 46-50.

35. Семашкин К. В. Практика инженерно-геологического обследования подтопленной дорожной насыпи методом георадиолокации. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. Волгоград, 2013. Вып. 30 (49). С. 320-327. URL: http://vgasu.ru/attachments/30_49-03-2013.pdf (дата звернення: 26.02.2019)

36. Греховодов А. А. Практика применения георадара при обследовании земляного полотна. *Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО Гипродорнии*. 2012. N. 3. С. 34-41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18068529> (дата звернення: 26.02.2019)

37. Гапонов Д. А., Фоменко Л. Н., Шеремет Р. Д. Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов. *Инженерный вестник Дона*. Ростов-на-Дону, 2016. N 3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3724> (дата звернення: 26.02.2019).

38. Лаломов Д. А., Артюгин А. И. Особенности совместной обработки и интерпретации данных электротомографии и георадиолокации в условиях влияния техногенных помех на объектах транспортного строительства. *Георесурсы*. Казань, 2014. N 3 (58). С. 37-40. DOI: <http://dx.doi.org/10.18599/grs.58.3.7> (дата звернення: 26.02.2019).

39. Шаповалов В. Л., Явна В. А., Окост М. В., Хакиев З. Б., Морозов А. В. Подходы к определению плотности грунтов земляного полотна георадиолокационным методом при его строительстве. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. Ростов-на-Дону, 2018. N 1. С. 100-110.

40. Аузин А. А., Зацепин С. А. О дисперсии диэлектрической проницаемости геологической среды (применительно к интерпретации материалов георадиолокации). *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. Воронеж, 2015. N 4. С. 122-127. URL: http://www.vestnik.vsu.ru/content/heologia/2015/04/toc_ru.asp (дата звернення: 26.02.2019).

41. Талалов А. Д., Даев Д. С. О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород. *Физика Земли*. Москва, 1996. N 8. С. 56-66.

42. Изюмов С. В., Дручинин С. В. Использование георадаров серии «ТР-ГЕО» в инженерной геофизике и строительстве. *Техника и технология: подземное пространство мира*. Санкт-Петербург, 2005. N 6. С. 14-21. URL: http://www.trgeo.ru/article_wus_6N_05_rus.htm (дата звернення: 26.02.2019).

43. Maślakowski Maciej, Zbiciak Artur, Józefiak Kazimierz, Piotrowski Tomasz. Diagnostyka stanu podłoża i podtorza kolejowego metodą georadarową (GPR). *Technika Transportu Szynowego*. 2015. Vol. 22. P. 1045-1048.

44. Явна В. А., Шаповалов В. Л., Морозов А. В., Ермолов К. М. Определение засоренности балластного материала железнодорожного пути методом георадиолокации. *Инженерные изыскания*. Москва, 2015. N 10-11. С. 60-65. URL: http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenernye-izyskaniya-10-112015/ (дата звернення: 26.02.2019).

45. Жуков О. Х., Дмитриевцев Д. В. Применение георадара для изучения состояния земляного полотна. *Путь и путевое хозяйство*. Москва, 2011. N. 12. С. 27-29.

46. Лучко Й. Й., Кравець І. Б. Застосування георадіолокаційного методу на залізницях України. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. Одеса, 2018. Вип. 71. С. 169-175. URL: <http://odaba.edu.ua/library/periodicals/professional-editions/bulletin-of-the-odaba/issue-archive> (дата звернення: 26.02.2019).

REFERENCES

1. Wait J. R. *Electromagnetic Waves in Stratified Media*. Macmillan. New York, 1962. Ch. 2. 515 p. [in English].

2. Brehovskih L. M. *Volnyi v sloistyih sredah (Waves in layered media)*. Moscow, 1973. 344 p. [in Russian].

3. Finkelshteyn M. I., Kutev V. A., Zolotarev V. P. *Primenenie radiolokatsionnogo podpoverhnostnogo zondirovaniya v inzhenernoy geologii (The use of radiolocation subsurface sensing in engineering geology)*. Moscow, 1986. 128 p. [in Russian].

4. Cook J. C. *Radar Transparencies of Mine and Tunnel Rocks*. Geophysics. United States, 1975. Vol. 40. N 5. P. 865-885. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1440573> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].

5. Lambert T., Dolphin, Robert L., Bollen, and George N. Oetzel. *An underground electromagnetic sounder experiment*. Geophysics. United States, 1974. Vol. 39. N 1. P. 49-55. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1440411> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].

6. Annan A. P., Davis J. L. *Impulse radar sounding in permafrost*. Radio Science. 1976. Vol. 11. Issue 4. P. 383-394. DOI: <https://doi.org/10.1029/RS011i004p00383> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].

7. Vladov M. L. *Vvedenie v georadiolokatsiyu (Introduction to georadiolocation)*. Moscow, 2004. 153 p. [in Russian].

8. Finkelshteyn M. I., Kutev V. A., Metelkin V. N. *Podpoverhnostnaya radiolokatsiya (Subsurface radiolocation)*. Moscow, 1994. 216 p. [in Russian].

9. Starovoytov A. V. *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh (Interpretation of georadiolocation data)*. Moscow, 2008. 192 p. [in Russian].

10. Grinev A. Yu. *Voprosy podpoverhnostnoy radiolokatsii (Issues of subsurface radiolocation)*. Moscow, 2005. 416 p. [in Russian].

11. Izyumov S. V., Druchinin S. V., Voznesenskiy A. S. Teoriya i metodyi georadiolokatsii (Theory and methods of georadiolocation). Moscow, 2008. 196 p. [in Russian].
12. Finkelshteyn M. I., Mendelson V. A., Kutev V. A. Radiolokatsiya sloistyyih zemnyih pokrovov (Radiolocation of layered earth covers). Moscow, 1977. 176 p. [in Russian].
13. Daniels D. J. Ground Penetrating Radar. Institution of Electrical Engineers. London, 2009. 734 p. [in English].
14. Jol H. M. Ground penetrating radar: theory and applications. Amsterdam: Elsevier Science, 2008. 508 p. [in English].
15. Petrenko V. D., Harlan V. I., Kosyak V. N., Kovalevich V. V. Primenenie georadiolokatsionnogo metoda pri issledovanii defektov vyisokih nasyipey jeleznodorojnogo zemlyanogo polotna (The use of georadiolocation method in the study of defects in high embankments of railway subgrade). Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie (Construction, materials science, engineering). Dnepropetrovsk, 2011. Vol. 61. P. 312-316. [in Russian].
16. Petrenko V. D., Kovalevych V. V. The results of the defect places investigation of Donetsk railway road bed by ground penetrating radar complex. *Nauka ta progres transportu*. Dnipropetrovsk, 2014. N 5 (53). P. 83-91. URL: <https://studfiles.net/preview/8163899/> (Last accessed: 26.02.2019) [in English]
17. Batrakova A. Gh. Procjuk V. O. Determination of moisture content of the soil subgrade with the use of field GPR. *Avtomobil'ni dorogi i dorozhne budivnictvo*. Kyiv, 2017. 100. P. 48-56. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/100/048-056.pdf (Last accessed: 26.02.2019) [in Ukrainian].
18. Benedetto A, Pajewski L. Civil engineering applications of ground penetrating radar. Springer: Transactions in Civil and Environmental Engineering. 2015. 371 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0> (Last accessed: 26.02.2019).
19. Bondar K., Bobrovskiy T., Tsiupa I. Efficiency of gpr survey for archaeological targets detection in the national conservation area of "St. Sophia of Kyiv". *Geoinformatika* Kyiv, 2016. N 4(60). P. 75-82. URL: <http://www.geology.com.ua/UK/geoinformatika-2016-460-75-82/> (Last accessed: 26.02.2019) [in Ukrainian].
20. Bobrov N. Yu., Krylov S. S., Kiselev E. Yu., Priakhina G. V., Fedorova, I. V. Application of georadiolocation in hydrology. *Zapiski Gornogo instituta*. St. Petersburg, 2009. Vol. 183. P. 219-223. URL: <http://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/1884/1959> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
21. John J. Schultz, Mary E. Collins, Anthony B. Falsetti. Sequential Monitoring of Burials Containing Small Pig Cadavers Using Ground Penetrating Radar. *Journal of Forensic Sciences*. United States, 2006. Vol. 53. Issue 3. p. 607-616. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2006.00129.x> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
22. Ashpiz E. S. Monitoring zemlyanogo polotna pri ekspluatatsii jeleznyih dorog (Monitoring subgrade during the operation of railways): monograph. Moscow, 2002. 112 p. [in Russian].
23. Konshin G. G. Metody i sredstva diagnostiki zemlyanogo polotna (Methods and tools for the diagnosis of earthen cloth instruments). Moscow, 2004. 213 p. [in Russian].
24. Fomenko N. Ye., Gaponov D. A., Kapustin V. V., Popov V. V., Fomenko L. N. Vozmozhnosti georadarnogo metoda pri obsledovanii podpornykh sten i ograzhdayushchikh konstruktsiy. *Izvestiâ Tomskogo politehničeskogo universiteta. Inžiniring georesursov*. Tomsk, 2017 Vol. 328. N 3. P. 37-45. URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1858> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].

25. Kazarin O., Kazarin B., Husiev D., Pastushkov H., Pastushkov V., Zhykharev D. The practice of using GPR technology in the examination tunnel. *Nauka ta progres transportu (Science and Transport Progress)*. Dnipropetrovsk, 2008. Vol. 21. P. 113-116. URL: <http://stp.diit.edu.ua/article/view/16294/15006> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
26. Nabatov V. V., Gaysin R. M., Voznesenskiy A. S. Geo radar data-based assessment of ground-and-lining contact surface quality in underground railway tunnels. *Gornyy informacionno-analitičeskij būlleten'*. Moscow, 2013. Vol. 9. P. 157-163. URL: <http://www.giab-online.ru/catalog/10794> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
27. Benedetto A, Manacorda G, Simi A, Tosti F. Novel perspectives in bridges inspection using GPR. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2012. Vol. 27. Ussue 3. P. 239-251. DOI: <https://doi.org/10.1080/10589759.2012.694883> (Last accessed: 26.02.2019) [inEnglish].
28. Alani A. M., Aboutalebi M., Kilic G. Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment. *Journal of Applied Geophysics*. 2013. Vol. 97. P. 45-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.04.009> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
29. Su J., Zhang W, Xiang H, Guo X. Application and Analysis of Ground Penetrating Radar in Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Airport Runway. *Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 153. 2: 032011. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/153/3/032011> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
30. Masalov S. O., Pochanin Gh. P., Ruban V. P., Kholod P. V. Radiolokacijnyj monitoring htekhnichnogho stanu pidpoverkhnevoji chastyny inzhenernykh sporud. Tehničeskaâ diagnostika i nerazrušâšij kontrol' (*Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*). Kyiv, 2016. Vol. 1. P. 17-23. [in Ukrainian].
31. Fomenko N. Ye., Gaponov D. A., Kapustin V. V., Popov V. V., Fomenko L. N. Vozmojnosti georadarnogo metoda pri obsledovanii podpornyih sten i ograjdayuschih konstruktsiy (Possibilities of the georadar method when examining retaining walls and enclosing structures). *Izvestiâ Tomskogo politehničeskogo universiteta. Inžiniring georesursov*. Tomsk, 2017. T. 328. N 3. P. 37-45. <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/1858> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
32. Francke J. A review of selected ground penetrating radar applications to mineral resource evaluations. *Journal of Applied Geophysics*. 2012. Vol. 81. P. 29-37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.020> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
33. Peter Hatherly. Overview on the application of geophysics in coal mining. *International Journal of Coal Geology*. 2013. Vol. 114. P. 74-84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.02.006> (Last accessed: 26.02.2019) [in English].
34. Medjanyk V. Ju., Dovbnich M. M., Jankin D. V. Monitoringh struktur masyviv ghirsjkykh porid iz zastosuvannjam gheoradariv novogho tekhnichnogho rivnja pry pidzemnij rozrobci ghazovughiljnykh rodovyshh (Monitoring of structures of rock masses with the use of new technical level radar radars in the underground development of coal fields). *Forum hirnykiv (Miners' Forum) - 2017: a collection of International Conference (4-7 October 2017, Dnipro, Ukrainian)*. Dnipro, 2017. P. 46-50 [in Ukrainian].
35. Semashkin K. V. Praktika injenerno-geologicheskogo obsledovaniya podtoplennoy dorojnoy nasyipi metodom georadiolokatsii (Practice of engineering-geological survey of submerged road embankment by the method of georadiolocation). *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriâ: Stroitel'stvo i arhitektura*. Volgograd, 2013. Is. 30 (49). P. 320-327. URL: http://vgasu.ru/attachments/30_49-03-2013.pdf (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].

36. Grehovodov A. A. Praktika primeneniya georadara pri obsledovanii zemlyanogo polotna (Practice of use of a georadar at survey of a ground cloth). *Aktual'nye voprosy proektirovani avtomobil'nyh dorog*. Yekaterinburg, 2012. N. 3. P. 34-41. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18068529> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
37. Gaponov D. A., Fomenko L. N., SHeremet R. D. Primenenie georadara dlya kontrolya kachestva zakrepleniya gruntov (The use of georadar to control the quality of soil consolidation). *Inzhenernyj vestnik Dona*. Rostov-on-Don, 2016. N 3. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2016/3724> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
38. Lalomov D. A., Artiugin A. I. Combined data processing and interpretation of electrical resistivity tomography and ground penetrating radar (GPR) under the influence of anthropogenic interference on the facilities of transport construction. *Georesursy*. Kazan, 2014. N 3 (58). P. 37-40. DOI: <http://dx.doi.org/10.18599/grs.58.3.7> (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
39. Shapovalov V. L., Yavna V. A., Okost M. V., Khakiev Z. B., Morozov A. V. Approaches to determination of the density of soils by gpr method during its construction. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobsheniâ*. Rostov-on-Don, 2018. N 1. P. 100-110 [in Russian].
40. Auzin A. A., Zatsepin S. A. About the dispersion of dielectric permeability of the geological environment (in connection with interpretation of gpr materials). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Geologiya*. Voronezh, 2015. N 4. P. 122-127. URL: http://www.vestnik.vsu.ru/content/heologia/2015/04/toc_ru.asp (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
41. Talalov A. D., Daev D. S. O strukturnom mekhanizme chastotnoy dispersii elektricheskikh svoystv geterogennykh gornyykh porod (On the structural mechanism of the frequency dispersion of the electrical properties of heterogeneous rocks). *Fizika zemli*. Moscow, 1996. N 8. P. 56-66 [in Russian].
42. Izumov S. V., Drouchinin S. V. Implementation of TR-GEO tipe georadars in engineering geophysics and in construction. *Tehnika i tehnologiya: podzemnoe prostranstvo mira (Technique and technology: world underground space)*. St. Petersburg, 2005. N 6. P. 14-21. URL: http://www.trgeo.ru/article_wus_6N_05_rus.htm (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
43. Maślakowski Maciej, Zbiciak Artur, Józefiak Kazimierz, Piotrowski Tomasz. Examination of railway subgrade conditions using ground penetrating radar. *Technika Transportu Szynowego*. 2015. Vol. 22. P. 1045-1048. [in Polish].
44. Yavna V. A., Shapovalov V. L., Morozov A. V., Ermolov K. M. Determination of clogion of railway ballast material by ground penetrating radar. *Inzhenernye izyskaniâ*. Moscow, 2015. N 10-11. P. 60-65. URL: http://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-inzhenernye-izyskaniya-10-112015/ (Last accessed: 26.02.2019) [in Russian].
45. Zhukov O. Kh., Dmitrievtsev D. V. Primenenie georadara dlya izucheniya sostoyaniya zemlyanogo polotna (The use of GPR to study the condition of the subgrade). *Put' i putevoe hozâjstvo (Railway Track and Facilities)*. Moscow, 2011. N 12. P. 27-29 [in Russian].
46. Luchko J. J., Kravets I. B. Application of the ground penetrating radar method for the ukrainian railways. *Visnik Odes'koï derzhavnoï akademii budivnictva ta arhitekturi (Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture)*. Odesa, 2018. Vol. 71. P. 169-175. URL: <http://odaba.edu.ua/library/periodicals/professional-editions/bulletin-of-the-odaba/issue-archive> (Last accessed: 26.02.2019) [in Ukrainian].

¹Vitalii Kovalchuk, Ph.D, <https://orcid.org/0000-0003-4350-1756>

²Ivan Kravets, <https://orcid.org/0000-0002-2239-849X>

³Josef Luchko, D.Sc., Professor, <https://orcid.org/0000-0002-3675-0503>

¹Lviv branch Dniprovsky National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lviv, Ukraine

²Dniprovsky National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine

³Lviv National Agrarian University, Dubliany, Ukraine

GPR METHOD AS A NON-DESTRUCTIVE METHOD FOR SUBGRADE MONITORING

Abstract

Introduction. The introduction briefly describes the main factors influenced the subgrades of railways and roads which cause the formation and distribution of various defects and strains. A brief description of the GPR method is provided, the general principle of the Ground-penetrating radar (GPR) operation is described.

Problem Statement. The use of destructive methods of subgrade monitoring doesn't allow detecting the formation of defects in the subgrade on early stages which in the future leads to emergencies and increases costs for current maintenance. At the same time, the use of non-destructive methods is complicated due to the insignificant experience of their application. One of such non-destructive methods is GPR method.

Purpose. The purpose of the work is to review and analyze existing research related to the GPR method as one of the prospective non-destructive methods for subgrade diagnostics.

Materials and methods. The methods of analysis and synthesis are used in the study of existing experience of the use of GPR researches which are presented in the literature.

Results. On the basis of the research analysis of the use of GPR method, it was determined the historical development and the physical nature of the indicated method. The features of wave's distribution in rocks taking into account their characteristics were given. The main dependencies and assumptions used during surveys (researches) of various facilities and objects by GPR method were considered. The results of surveys using GPR method were described and analyzed. The possibility of quality control of performed work and comparison with design decisions is shown.

Conclusions. Analysis of the world and national experience of the use of GPR method shows, firstly, that GPR can be effectively used for general survey of extended sections of subgrades. Their main advantages are efficiency of work performance and low laboriousness. Secondly, the use of GPR method, in particular during the study of railway haul is an effective tool for detecting various types of defects in the subgrades and timely eliminating the identified disadvantages.

У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею є проведення досліджень та розробка рекомендацій щодо георадіолокаційного моніторингу і оцінки технічного стану земляного полотна.

Due to this, the actual scientific and technical task is carrying out the research and developing recommendations for GPR monitoring and evaluation of subgrades technical state.

Key words: GPR method, monitoring, ground-penetrating radar (GPR), subgrades, electromagnetic wave.