

УДК 625.7/.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2024.44.1>**Батракова А.Г.**

д.т.н., професор кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків

Урдзік С.М.

к.т.н., доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків

ЗАЛУЧЕННЯ ГЕОРАДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ У ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ

***Анотація.** В публікації наведено аналіз досліджень можливості та актуальності впровадження у практику обстеження автомобільних доріг неруйнівні технології, такі як георадарні системи. Розглянуто та проаналізовано перспективи розвитку даного наукового напрямку. Сформульовано задачі, які можуть бути вирішені за допомогою георадарного обладнання при обстеженні дорожнього одягу та земляного полотна автомобільних доріг, а також проаналізовано основні причини, що перешкоджають більш динамічному впровадженню георадарних технологій в будівельній галузі. Приведено зразок георадарного обладнання та програмного забезпечення, розроблених вітчизняними науковцями та призначеного для проведення експериментальних досліджень, що спрямовані на розробку сучасних методик товщинометрії та дефектоскопії конструктивних шарів дорожнього одягу та земляного полотна. Приведено результати експериментальних лабораторних досліджень, що підтверджують адекватність запропонованої методики, яка дозволяє з досить високою точністю відновлювати товщину конструктивного шару дорожнього одягу, що досліджується. Наведено результати польових та лабораторних досліджень по визначенню товщини конструктивних шарів автомобільної дороги, що знаходиться на етапі будівництва. За результатами георадарного обстеження, з високою точністю встановлено товщину залізобетонної плити, яка є конструктивним елементом автомобільної дороги. Запропоновано методику дефектоскопії асфальтобетонних шарів дорожнього одягу, а також послідовність дій для вирішення завдання пошуку локальних включень та арматури в конструктивних шарах дорожнього одягу. За результатами проведених наукових досліджень можна зробити висновок, що георадарне обладнання в поєднанні з відповідним програмним забезпеченням та відповідною методикою проведення досліджень може вирішувати складні завдання, що стоять перед дорожньо-будівельними організаціями та організаціями з утримання та експлуатації автомобільних доріг.*

***Ключові слова:** георадар, радарограма, дорожній одяг, діелектрична проникність, дефектоскопія, товщинометрія, локальні включення.*

Постановка проблеми. На етапі будівництва автомобільної дороги, замовнику важливо мати можливість контролювати технологічні процеси, дотримання будівельниками вимог нормативних документів, відповідність будованого об'єкту проектним даним.

Наступним важливим етапом є експлуатація автомобільних доріг. Для організацій з утримання та експлуатації автомобільних доріг важливою є інформація про поточний технічний стан як всієї дорожньої конструкції, так і її окремих складових. Можливість визначення ділянок, що містять підповерхневі

дефекти, локальні включення та встановлення фізико-механічних властивостей шарів дорожнього одягу неруйнівними методами дозволяє вчасно розробляти ремонтні заходи з метою недопущення появи дефектів та подальшого руйнування дорожньої всієї дорожньої конструкції. В сучасних умовах це дозволяє значно заощади фінансові ресурси через можливість прогнозувати розвиток деформацій на початковій стадії їх появи, розробляти проекти з поточного та капітального ремонту автомобільних доріг на основі повної та достовірної інформації про досліджуваний об'єкт.

Аналіз останніх досліджень. У багатьох дослідженнях [1, с. 2; 2, с. 6; 3, с. 8; 4, с. 8] зазначається, що одним із актуальних завдань сучасної будівельної галузі є розробка та впровадження георадарних технологій у практику проведення проектно-вишукувальних робіт та робіт з контролю якості будівництва, що дозволяє оперативним чином визначати стан будівельних конструкцій без порушення їх цілісності. Впровадження даної технології спрямоване на зниження матеріаломісткості, раціональний розподіл матеріальних та фінансових ресурсів, а також забезпечення несучої здатності дорожніх конструкцій.

Метою статті є проведення аналізу можливості залучення георадарного обладнання для проведення робіт з обстеження конструктивних шарів дорожнього одягу та земляного полотна автомобільних доріг, що знаходяться в експлуатації та на етапі будівництва.

Результати досліджень. Авторами статті проведено низку лабораторних досліджень [5, с. 68], які дозволили з достатньо високою точністю встановлювати значення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу. Для шарів з істинною товщиною 9 см, 15 см і 20 см, відновлені за результатами обробки радарограм значення склали 9,1 см, 15,05 см, 20,15 см відповідно.

Наступним етапом досліджень є апробація запропонованої схеми визначення товщини конструктивних шарів дорожніх одягів на різних ділянках автомобільних доріг, що будуються. Розглянемо приклад визначення товщини тротуарних залізобетонних плит. Реальна товщина залізобетонної плити склала 14 см. Рух трасою здійснювався з постійною швидкістю і виконувався на різних розгортках. На рисунку 1 наведено загальний вигляд досліджуваної ділянки автомобільної дороги. На рисунку 2 зображено радарограму, отриману за профілем досліджуваної структури при розгортці 10 нс. «Розмиті ділянки» радарограми відповідають стикам плит.

Значення діелектричної проникності бетону коливається в межах від 5,5 до 9 [6, с. 122]. Воно в першу чергу залежить від складу цементобетонної суміші (фракції щебеню, піску та ін.) та значення вологості.

В нашому дослідженні діелектрична проникність цементобетону була прийнята рівною 7. Обробка даної радарограми за допомогою алгоритму, заснованого на перетворенні Гільберта, дозволила визначити товщину тротуарної плити, яка склала 15 см, що свідчить про хорошу збіжність теоретичних розрахунків та результатів експериментальних досліджень. Перш за все, це стає можливим

за рахунок наявності необхідної інформації про досліджуваний об'єкт та його фізико-механічні властивості. Також великий вплив на точність отриманих результатів має алгоритм, що закладений у відповідний профільний програмний комплекс.

Результати обробки радарограми представлені на рисунку 3.



Рис. 1. Загальний вигляд досліджуваної ділянки автомобільної дороги

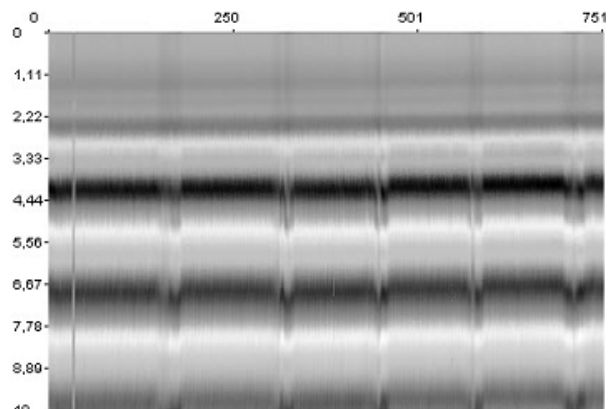


Рис. 2. Радарограма досліджуваної ділянки автомобільної дороги

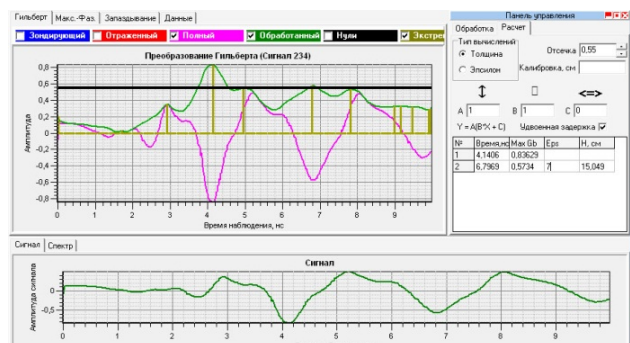


Рис. 3. Вікно обробки радарограми, отриманої при георадарному обстеженні тротуарних плит

Розробка методики дефектоскопії асфальтобетонних шарів дорожнього одягу, а також вирішення завдання пошуку локальних включень та арматури в конструктивних шарах дорожнього одягу вимагають якісно іншого підходу. В основу вирішення задачі пошуку підповерхневих дефектів у конструктивних шарах дорожнього одягу покладено ідеї реєстрації крос-поляризаційної компоненти сигналу. Дослідження проводяться з використанням антенного блоку, що реєструє крос-поляризаційну компоненту відбитого сигналу. Обробка отриманих радарограм в даному випадку зводиться до віднімання двох взаємно ортогональних компонентів сигналу, що дозволяє визначити ділянки середовища з анізотропними властивостями. В даному випадку під ізотропною розуміється середовище з однаковими електрофізичними характеристиками по всіх напрямках та відсутністю дефектів (тріщин, локальних включень).

У такій постановці завдання результуючий імпульс за відсутності дефектів матиме досить малу нормовану амплітуду, що наближається до «0» і може бути прийнятий як нормувальний або еталонний. За наявності дефектів в нижньому шарі покриття характер імпульсу буде істотно відрізнятися від еталонного. Проведення серії модельних експериментів дозволило підтвердити ефективність запропонованого алгоритму виявлення підповерхневих дефектів (рис. 4).

Відомо, що електрофізична контрастність підповерхневих дефектів може суттєво залежати не лише від характеру дефекту, а й від вологості [7, с. 218]. Це пов'язано з істотною різницею у величині діелектричної проникності повітря, матеріалу шару та води. Так, діелектрична проникність (її дійсна частина) повітря $\epsilon = 1$, асфальтобетону – $\epsilon = 7$, води – $\epsilon = 80$. Відмінність у діелектричній проникності середовищ асфальтобетон – вода – асфальтобетон призводить до значної зміни амплітуди, форми і часу проходження зондувального імпульсу, що дає можливість виділення на радарограмах підповерхневих дефектів після відповідної обробки (рис. 6).

Разом з тим, розв'язання задач дефектоскопії у дорожньому будівництві не вичерпується виявленням та позиціонуванням підповерхневих дефектів у вигляді локальних порушень цілісності та ділянок розшарування асфальтобетонних шарів. Досить актуальним є завдання виявлення та позиціонування

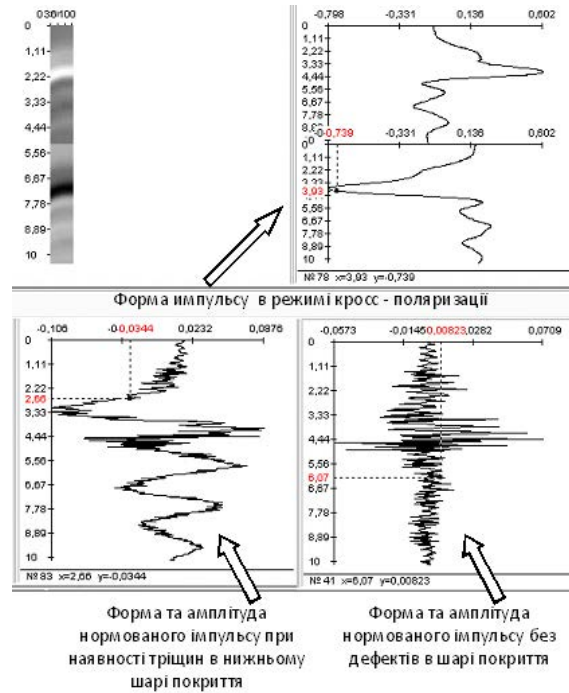


Рис. 4. Експериментальне визначення підповерхневих дефектів за допомогою антенного блоку в режимі крос-поляризації

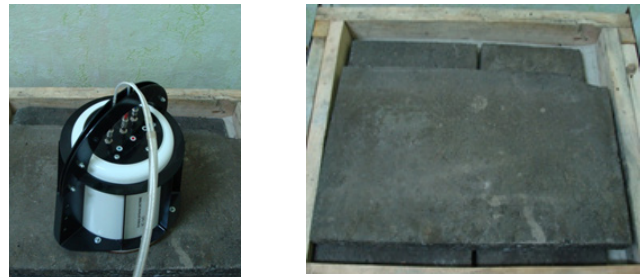


Рис. 5. Антенний блок та модель для пошуку підповерхневих тріщин

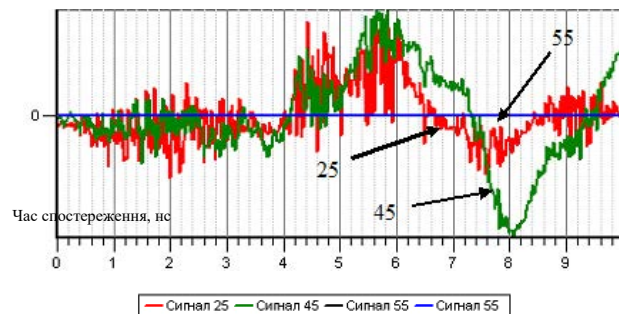


Рис. 6. Моделювання розповсюдження сигналу в нижньому шарі покриття
 – сигнал 55 – нормувальний – відсутність дефектів;
 – сигнал 45 – наявність тріщини, що заповнена водою;
 – сигнал 25 – наявність тріщини, що заповнена повітрям.

сторонніх включень, пошуку комунікацій, визначення місця розташування арматури у конструкціях дорожнього одягу та мостів. Розв'язання даних завдань полягає в вивченні явища дифракції хвиль на сторонніх включеннях досліджуваних середовищах. На радарограмах, одержаних під час проведення лабораторних досліджень, досить чітко позиціонуються металеві включення різного діаметра (рис. 7).

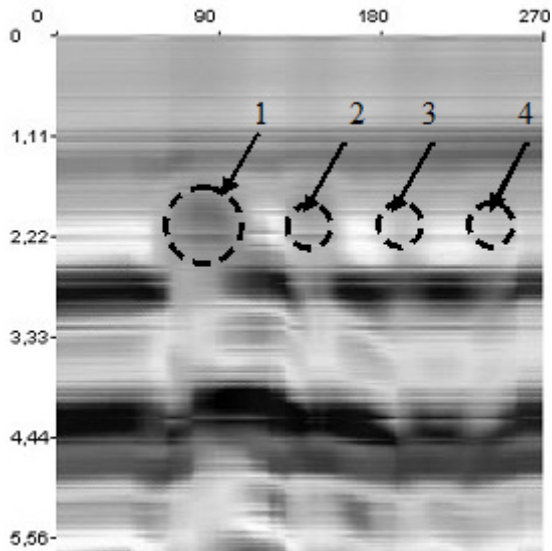


Рис. 7. Лабораторний експеримент з виявлення металеві арматури різного діаметру в шарі суглинку: 1 – пустотіла металева труба $d = 27$ мм, 2 – арматура $d = 11$ мм, 3 – металевий стрижень $d = 4$ мм, 4 – алюмінієва фольга $d = 45$ мм.

Проведені лабораторні дослідження показали, що форма та характер гіперболи дифрагованої хвилі суттєво залежать від глибини залягання, діаметра та матеріалу об'єкта. Тому подальші дослідження в цьому напрямку повинні бути спрямовані на вивчення форми дифрагованої хвилі, що в кінцевому підсумку дозволяє судити про глибину залягання та діаметр локального стороннього включення.

Слід зазначити також, що при пошуку та ідентифікації арматури у конструктивних шарах дорожнього одягу та елементах мостів виникають труднощі, пов'язані з кроком арматурної сітки. При малому кроці арматурної сітки, у випадку, коли довжина хвилі більша за крок арматурної сітки, відбиття від сусідніх стрижнів арматури зливаються в загальну суцільну границю і роблять практично нерозрізненими нижчі шари конструкції. Вирішення зазначених труднощів можливе шляхом удосконалення як приладової бази так

і алгоритмів з обробки та інтерпретації отриманих радарограм.

Таким чином, проведені теоретичні дослідження та обчислювальні експерименти дозволяють стверджувати, що розробка методик товщинометрії та дефектоскопії дорожнього одягу стане основою системи моніторингу дорожнього одягу з використанням методу підповерхневої георадіолокації. Для досягнення поставленої мети було вирішено низку наукових та практичних завдань, а саме:

- проаналізовано та адаптовано задачі товщинометрії плоскошаруватих середовищ з малою товщиною шарів моделі взаємодії електромагнітного випромінювання з плоскошаровими середовищами;

- розроблено алгоритм обробки імпульсних сигналів, відбитих від плоскошаровитих середовищ, заснований на перетворенні Гільберта;

- відпрацьовано методику моделювання поширення електромагнітного імпульсу в конструктивних шарах дорожнього одягу, у тому числі з малою товщиною шару;

- експериментально підтверджено відтворюваність результатів вимірювань та стабільність роботи алгоритму визначення товщини шарів дорожнього одягу за результатами георадарного зондування;

- запропоновано підхід до позиціонування підповерхневих дефектів у конструктивних шарах дорожнього одягу, заснований на аналізі крос-поляризаційної компоненти сигналу;

- ведуться роботи по ідентифікації підповерхневих дефектів;

- розпочато дослідження з формування бази даних електрофізичних характеристик матеріалів та ґрунтів з урахуванням їх дисперсійних властивостей, пов'язаних з вологістю та щільністю (залишковою пористістю).

Висновки та пропозиції подальших досліджень. На думку авторів, перспективними напрямками досліджень у цій галузі є:

- визначення кількісної оцінки зв'язку щільності і вологості матеріалів та ґрунтів земляного полотна з їх електрофізичними характеристиками;

- розв'язання зворотної задачі відновлення профілю діелектричної проникності плоскошарового середовища по набору значень розсіяного нею електромагнітного поля;

- розробка алгоритмів та програм автоматизованого розрахунку товщини конструктивних шарів дорожнього одягу, ідентифікації та позиціонування підповерхневих дефектів за результатами георадарного зондування.

Література

1. Josef Stryk. Road diagnostics – ground penetrating radar possibilities. Intersections Journal, 2008. Vol 5, No 1. 9 p.
2. Wong K.T., Urbaz E. Ground Penetrating Radar (GPR) – a Tool for Pavement Evaluation and Design. Shaping the future: Linking policy, research and outcomes: 25th ARRB Conference. Perth, Australia: Proceedings. 2012. P. 1-13.
3. Li Shengli, Wang Chaoqun, Sun Panxu, Wu Guangming, Wang Dongwei. A localization method for concealed cracks in the road base based on ground penetrating radar. 2016. № 8(12). P. 1-10.
4. M Miskiewicz, J Lachowicz, P Tysiac, P Jaskula, K Wilde. The application of non-destructive methods in the diagnostics of the approach pavement at the bridges. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 356. 8 p.
5. Батракова А.Г., Урдзік С.М. Застосування георадарних технологій при обстеженні дорожнього одягу. // Комунальне господарство міст: Технічні науки та архітектура, 2023. том 3, вип. 177, с. 68-73.
6. Saarenketo T., Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics. 2000. Vol. 43. PP. 119 – 138.
7. Батракова А.Г. Методологія моніторингу дорожніх одягів нежорсткого типу із застосуванням георадіолокаційних технологій: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.22.11 / ХНАДУ. Х., 2014. 390 с.

References

1. Josef Stryk. Road diagnostics – ground penetrating radar possibilities. Intersections Journal, 2008. Vol 5, No 1. 9 p.
2. Wong K.T., Urbaz E. Ground Penetrating Radar (GPR) – a Tool for Pavement Evaluation and Design. Shaping the future: Linking policy, research and outcomes: 25th ARRB Conference. Perth, Australia: Proceedings. 2012. P. 1-13.
3. Li Shengli, Wang Chaoqun, Sun Panxu, Wu Guangming, Wang Dongwei. A localization method for concealed cracks in the road base based on ground penetrating radar. 2016. № 8(12). P. 1-10.
4. M Miskiewicz, J Lachowicz, P Tysiac, P Jaskula, K Wilde. The application of non-destructive methods in the diagnostics of the approach pavement at the bridges. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 356. 8 p.
5. Batrakova A.G., Urdzik S.M. Application of ground-penetrating radar technologies in the examination of road clothing. // Municipal management of cities: Technical sciences and architecture, 2023. volume 3, issue 177, p. 68-73.
6. Saarenketo T., Scullion T. Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics. 2000. Vol. 43. PP. 119 – 138.
7. Batrakova A.G. Methodology for monitoring road traffic of a non-zhorsk type due to the stoppage of georadiolocation technologies: dis. ... Dr. tech. sciences: spec. 05.22.11 / KHNADU. H., 2014. 390 p.

THE INVOLVEMENT OF GEORADAR TECHNOLOGIES IN SOLVING THE PROBLEMS OF THE ROAD-CONSTRUCTION INDUSTRY

Abstract. *This work is a continuation of the study on determining the possibility of applying georadar technologies in the road construction industry. The authors of the article conduct research using an antenna unit that registers the cross-polarization component of the reflected signal.*

Also, the publication provides an analysis of research into the possibility and relevance of introducing non-destructive technologies, such as ground-penetrating radar systems, into the practice of highway inspection. The prospects for the development of this scientific direction were considered and analyzed. The tasks that can be solved with the help of georadar equipment during the survey of road wear and the ground surface of highways are formulated, and the main reasons that prevent a more dynamic introduction of georadar technologies in the construction industry are analyzed. A sample of ground-penetrating radar equipment and software developed by domestic scientists and intended for conducting experimental research aimed at the development of modern methods of thickness measurement and defectoscopy of structural layers of road wear and subgrade is given. The results of experimental laboratory studies are presented, which confirm the adequacy of the proposed method, which allows to restore the thickness of the structural layer of the road wear under investigation with a fairly high accuracy. The results of field and laboratory studies on determining the thickness of the structural layers of the road under construction are presented. According to the results of the ground-penetrating radar survey, the thickness of the reinforced concrete slab, which is a structural element of the highway, was determined with high accuracy. The method of flaw detection of asphalt concrete layers of road wear is proposed, as well as the sequence of actions for solving the task of finding local inclusions and reinforcement in structural layers of road wear. Based on the results of scientific research, it can be concluded that ground-penetrating radar equipment in combination with appropriate software and the appropriate research methodology can solve complex tasks facing road construction organizations and highway maintenance and operation organizations.

Key words: *ground penetrating radar, radarogram, non-rigid pavement, dielectric permeability, defectoscopy, thickness measurement, local inclusions.*

Batrakova A.G.

Doctor of Technical Sciences, Professor at the Road Design, Geodesy and Land Management Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv

Urdzik S.M.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Road Design, Geodesy and Land Management Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv