

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОРАДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИВУ

Батракова А. Г., Шелкова І. С., Дорожко Є. В., Урдзік С. М., Назаренко І. В.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті розглянуто особливості залучення георадарного комплексу ОДЯГ-1 для післяремонтного контролю якості дорожнього покриття. Виявлено структурні аномалії у відремонтваній зоні та підтверджено високу точність методу для діагностики прихованих дефектів дорожніх конструкцій.

Ключові слова: георадар, георадарний комплекс ОДЯГ-1, карта поточного ремонту, контроль якості, дорожній покрив

Вступ

Сучасні транспортні мережі України перебувають у складних умовах експлуатації через постійне збільшення інтенсивності руху, перевантаження автотранспорту, вплив кліматичних факторів та обмежене фінансування на утримання й ремонт. У таких умовах особливого значення набувають своєчасне виявлення дефектів дорожнього покриття та контроль якості ремонтних робіт.

Традиційні методи діагностики мають низьку суттєвих недоліків: вони є руйнівними, потребують значних матеріальних витрат і часу, а також призводять до пошкодження дорожнього полотна. Саме тому протягом останніх десятиліть активно розвиваються неруйнівні методи діагностики, зокрема георадарні технології [1–2].

Георадар дозволяє визначити товщину шарів дорожнього одягу, виявляти порожнини, зони підвищеної вологості тощо. Його ключові переваги – швидкість зйомки, можливість роботи в міських умовах без перекриття руху, відносно висока точність і невисока вартість, як порівняти з руйнівними методами [3].

Особливо актуальним є застосування георадара під час післяремонтного контролю. Важливо не тільки зафіксувати початкову якість укладання нового покриття, але й мати засоби для подальшого моніторингу його стану в часі. Це дозволяє своєчасно виявити дефекти, які можуть призвести до повторних руйнувань.

Аналіз публікацій

Протягом останніх років георадарні технології суттєво розвинулися: з'явилися нові типи антен, багаточастотні системи, методи оброблення інформації і програмне забезпечення. Зокрема розглядаються методи засто-

сування широкого спектра антен – від низькочастотних (10–100 МГц) для глибокого сканування до високочастотних (1–2 ГГц) для детального обстеження верхніх шарів (що забезпечує роздільну здатність до ~5–10 см). Розвивається виробництво подвійних (поляризованих) масивних антен, що забезпечують одночасний збір сигналів на двох орієнтаціях поляризації. Наприклад, дослідження [4] продемонструвало ефективність двополяризованої георадарної системи для виявлення порожнин, тріщин і зон підвищеної вологості в дорожньому полотні: використання двох поляризацій підвищує загальну роздільність і глибину зондування.

У дорожній галузі відомі численні випадки практичного застосування георадара, зокрема для аналізу стану старих дорожніх покриттів у різних умовах вологості. Наприклад, в одному з досліджень [5] автори використовували георадар для розрахунку товщини шарів покриття двома методами (за відбиттям і за зондовими даними) й отримали середню похибку визначення товщини не більше ~3–9 %.

Методи інтерпретації георадарних даних активно інтегрують сучасні підходи машинного навчання. Так, у дослідженні [6] зазначають, що георадарні дані широко використовуються для виявлення дефектів дорожнього покриття, а отже, застосування нейромереж значно підвищує ефективність аналізу великих обсягів інформації.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є контроль якості дорожнього одягу на ділянці вулиці Чернишевської у місті Харків способом застосування георадарного комплексу ОДЯГ-1.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– здійснити калібрування георадара, провівши вимірювання відкритих шарів дорожнього одягу перед початком ремонтних робіт;

– провести вимірювання після ремонту: від ділянки карти поточного ремонту в обидва боки, над ділянкою карти, а також уздовж усієї ділянки;

– визначити товщини шарів дорожнього одягу;

– сформувані висновки щодо можливості застосування георадара для післяремонтного контролю та подальшого моніторингу стану покриття.

Виклад основного матеріалу

Товщина конструктивних шарів дорожнього одягу значною мірою визначає несну здатність автомобільної дороги. Від цього параметра залежить допустиме навантаження та види робіт, які необхідно здійснювати під час реконструкції, капітального або поточного ремонту [7–8]. У процесі нового будівництва важливо забезпечити однорідність за товщиною кожного конструктивного шару дорожнього одягу. У всіх перелічених випадках необхідно вимірювати цей параметр як в окремих точках, так і безперервно вздовж всієї протяжності автомобільної дороги.

Для проведення георадарних досліджень конструкції дорожнього одягу на об'єкті використовувався георадарний комплекс ОДЯГ-1 (рис. 1).



Рис. 1. Георадарний комплекс ОДЯГ-1

Георадарна система складається з трьох основних функціональних частин:

– антенний блок: складається з передавальної та приймальної антен, які працюють на центральній частоті 1,2 ГГц. Висота встанов-

лення антенного блока над поверхнею покриття під час дослідження становила 0,35 м;

– блок реєстрації даних: для збереження отриманих результатів використовувався портативний ноутбук, який під'єднувався до антенного блока за допомогою спеціального кабельного інтерфейсу. Ноутбук здійснює функцію оперативної візуалізації і фіксації георадарних даних у реальному часі;

– блок управління: це електронний модуль, який забезпечує стабільну роботу георадарної системи. Він розташований безпосередньо на каркасі візка та з'єднаний із ноутбуком і антенами за допомогою кабелів живлення та передачі даних.

Каркас візка виготовлений із пластикових труб. Таке конструктивне рішення дозволяє:

– мінімізувати вплив металевих елементів на електромагнітний сигнал;

– зменшити вагу георадарного комплексу для зручності пересування;

– забезпечити фіксовану висоту розташування антенного блока над досліджуваною поверхнею.

Візок обладнаний чотирма колесами для забезпечення стабільного переміщення вздовж поверхні дорожнього покриття та узбіччя.

На ділянці вул. Чернишевської у місті Харків, між вулицями Ярослава Мудрого та Каразіна, поблизу Харківського національного автомобільно-дорожнього університету було здійснено комплексне георадарне обстеження конструкції дорожнього одягу. Проведення цих досліджень було зумовлене аварійними роботами з ліквідації прориву підземних комунікацій, після яких на проїжджій частині сформувалася карта поточного ремонту (рис. 2).



Рис. 2. Відкрита карта поточного ремонту

Утворена карта була ідеальним розкритвом конструкції дорожнього одягу, що дозволяв здійснити пряме візуальне обстеження й інструментальні вимірювання реальних геометричних параметрів шарів для подальшого калібрування георадіолокаційного обладнання (рис. 3).

У відкритій карті чітко візуалізувалися фрагменти асфальтобетонного покриття та шар основи зі щебеневого матеріалу з різною крупністю заповнювача.

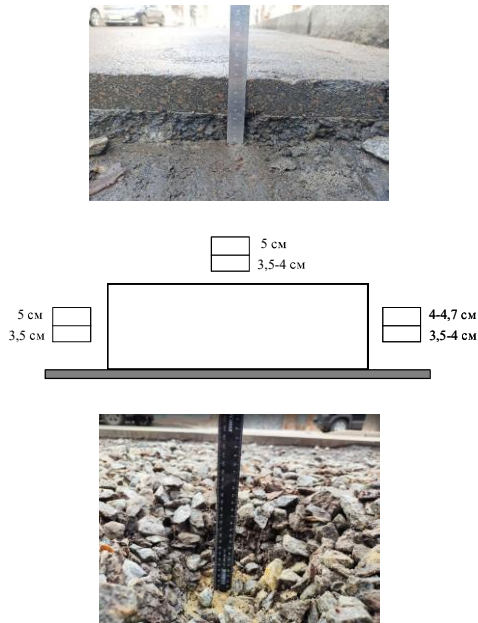


Рис. 3. Інструментальні вимірювання товщин конструктивних шарів дорожнього одягу

Отримана інформація була використана для калібрування георадарного комплексу ОДЯГ-1 перед проведенням подальших вимірювань.

Таким чином, ця ділянка стала еталонною базою, яка дозволила забезпечити коректність інтерпретації георадіолокаційних даних і створити підґрунтя для аналізу ефективності застосування георадара в післяремонтному контролі та подальшому моніторингу стану дорожнього покриття.

Після завершення прямих вимірювань у відкритій карті поточного ремонту було розпочато підготовчий етап для проведення георадіолокаційних досліджень методом безперервного профілювання на прилеглих ділянках автомобільної дороги. Завданням цього етапу було визначення товщини конструктивних шарів дорожнього одягу на суміжній території з використанням непрямого методу вимірювань через георадіолокацію.

Відповідно до методичних вимог було розроблено схему георадіолокаційного обстеження, яка містила систему контрольних точок з регулярним інтервалом для подальшого порівняльного аналізу результатів прямих і непрямих вимірювань (рис. 4).

Для забезпечення систематичності та повноти охоплення досліджуваної ділянки було здійснено детальну розмітку території навколо відкритої карти поточного ремонту. За допомогою мірної стрічки та білої крейди на асфальтобетонному покритті було нанесено поперечні позначки через кожні 3, 6, 9 та

12 метрів з обох боків від центральної точки відкритої карти. Така схема розмітки забезпечувала створення регулярної сітки точок зондування з кроком 3 метри, згідно з вимогами до кроку сканування під час пішої георадіолокаційної зйомки.

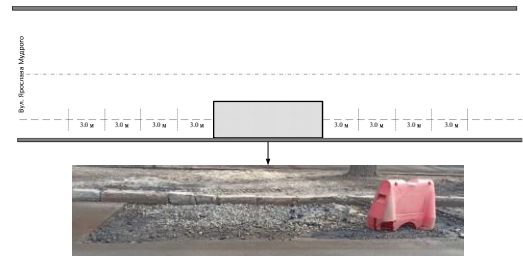


Рис. 4. Схема обстеження

Додатково було здійснено фотофіксацію загальної схеми розмітки для забезпечення можливості точної ідентифікації кожної точки зондування для подальшого оброблення георадарних даних та побудови радарограм.

Забезпечення високої точності георадарних вимірювань неможливе без проведення комплексного калібрування обладнання. Процес калібрування є складною сукупністю операцій, спрямованих на визначення чіткого співвідношення між еталонними значеннями фізичних величин і показами приладу з обов'язковим урахуванням невизначеностей вимірювань [9, 10].

Особливо актуальним це питання є для дослідження багатошарових конструкцій дорожніх одягів, де навіть незначні похибки можуть призвести до неправильної інтерпретації стану конструкції.

Основою методології калібрування є триетапний підхід, що забезпечує підготовку георадара ОДЯГ-1 до високоточних вимірювань.

Перший етап здійснюється у вільному просторі, де антенний блок розміщується на відстані від відбивальних поверхонь. Це дозволяє зареєструвати «чистий» сигнал прямого проходження, визначити форму зондувального імпульсу, рівень власних шумів і базові характеристики антенної системи.

Другий етап здійснюється з використанням металевого відбивача. Антенний блок встановлюють над плоским металевим листом, що забезпечує отримання опорного сигналу максимальної амплітуди (рис. 5).

Цей етап використовується для визначення «часової затримки» системи, від якої залежить точність розрахунку глибини шарів.



Рис. 5. Калібрування з використанням листа металу

Третій етап здійснюється на еталонній ділянці дорожнього одягу з відомими параметрами. Вимірювання дозволяють перевірити точність визначення товщини шарів і діелектричних властивостей матеріалів (рис. 6).

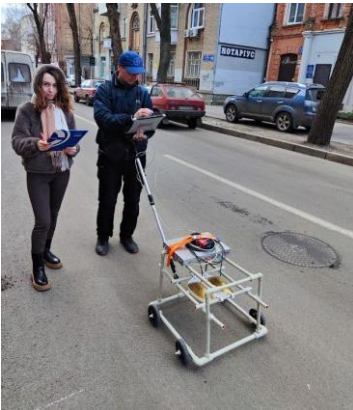


Рис. 6. Калібрування еталонної ділянки

Відповідно до розробленої схеми обстеження (рис. 4) було розроблено систему поздовжніх профілів з обох боків від центру відкритої карти поточного ремонту. Георадарні профілі прокладалися паралельно поздовжній осі проїжджої частини на відстанях 3, 6, 9 та 12 метрів у напрямку до вулиці Ярослава Мудрого (правий бік) та на аналогічних відстанях у напрямку до вулиці Каразіна (лівий бік).

Загалом було здійснено 14 серій вимірювань, які склалися з таких етапів:

- калібрувальні тести (Test 1, 13, 14) для верифікації роботи обладнання;
- статичні вимірювання (Test 2, 7) на відстанях 3, 6, 9, 12 метрів;
- поздовжні профілі праворуч (Test 3, 4, 5) на відстанях 3, 6, 9, 12 метрів;
- поздовжні профілі ліворуч (Test 8, 9, 10) на відстанях 3, 6, 9, 12 метрів;
- поперечні профілі (Test 11, 12) перпендикулярно до осі проїжджої частини.

Оброблення георадарних даних є комплексним процесом, спрямованим на підви-

щення якості зображення, усунення перешкод та визначення геологічних або інженерних особливостей підповерхневої структури. Ефективне застосування методів цифрової оброблення сигналів дозволяє трансформувати вихідні, часто зашумлені та складні для інтерпретації дані, зрозумілі та інформативні зображення.

Швидкість поширення електромагнітної хвилі v у середовищі залежить від діелектричної проникності, яка визначається за (1):

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}. \quad (1)$$

Діелектрична проникність визначає здатність матеріалу до поляризації в присутності електричного поля і є одним з двох основних електричних властивостей, що впливають на георадарні сигнали. Для типових дорожніх матеріалів діелектрична проникність варіює в таких межах: повітря – 1, асфальт – 4–12, бетон – 6–12, ґрунт – 3–40.

Метод декомпозиції, застосований у роботі, базується ґрунтується на сигналі відбиття від асфальту S як суми відбиттів від шарів:

$$S = s1 + s2 + s3. \quad (2)$$

Складові $s1$, $s2$ знаходяться як копії випроміненого сигналу M з коефіцієнтами пропорційності та затримками:

$$S1(t) = R1 \times M(t + d1) \quad (3)$$

$$S2(t) = R2 \times Tr1 \times M(t + d2),$$

де $R1$, $R2$ – коефіцієнти відбиття сигналу 1-го та 2-го шарів; $d1$, $d2$ – затримки між випроміненим і відбитими сигналами; $Tr1$ – коефіцієнт сигналу 1-го шару.

Ця методика дозволяє виділити відбиття від окремих шарів дорожньої конструкції, зокрема у випадках, коли їхні спектральні характеристики перекриваються.

Процес оброблення георадарних даних починається з імпорту файлів і створення паспорта зйомки, що містить ключові параметри: дата та час зйомки, параметри антен, крок зондування та текстовий опис умов вимірювання. Така структуризація даних значно спрощує їхню подальшу ідентифікацію, категоризацію й архівування.

Test 2 (дискретний збір даних, рух від краю ремонтної ділянки вздовж дороги про-

ти напрямку руху транспорту) дозволив визначити товщини шарів дорожнього одягу під час аналізу відображень георадарного сигналу в окремих дискретних точках профілю. Отримані результати розрахунків товщин дорожніх шарів наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку товщин шарів дорожнього одягу за результатами Test 2

Відстань від краю ділянки, м	Проникність 1-го шару	Товщина 1-го шару, см	Проникність 2-го шару	Товщина 2-го шару, см
0	5.5	10.0	3.6	9.0
3	5.1	10.0	3.6	9.0
6	5.0	10.0	3.6	9.0
9	5.2	10.0	3.7	9.0
12	5.2	10.0	3.7	8.0

Test 7 (дискретний збір даних, рух від краю ремонтної ділянки вздовж дороги за рухом транспорту) дозволив визначити товщини шарів дорожнього одягу під час аналізу відображень георадарного сигналу в окремих дискретних точках профілю. Отримані результати розрахунків товщин дорожніх шарів наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку товщин шарів дорожнього одягу за результатами Test 7

Відстань від краю ділянки, м	Проникність 1-го шару	Товщина 1-го шару, см	Проникність 2-го шару	Товщина 2-го шару, см
0	4.7	11.0	3.19	9.0
3	4.64	10.0	3.06	9.0
6	4.9	10.0	3.46	9.0
9	5.09	10.0	3.62	8.0
12	4.78	10.0	3.54	8.0

На рис. 7 наведено радарограму виокремленого сигналу s_3 , що відображає відбиття від нижньої межі другого шару дорожньої конструкції. Вимірювання здійснювалися в напрямку, протилежному до руху транспорту.

На рис. 8 наведено радарограму виокремленого сигналу s_3 , що відображає відбиття від нижньої межі другого шару дорожньої

конструкції. Вимірювання здійснювалися в напрямку за рухом транспорту.

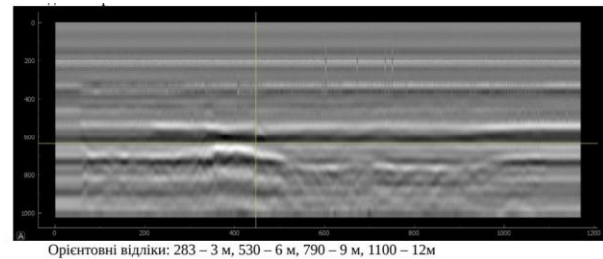


Рис. 7. Радарограма Test 3

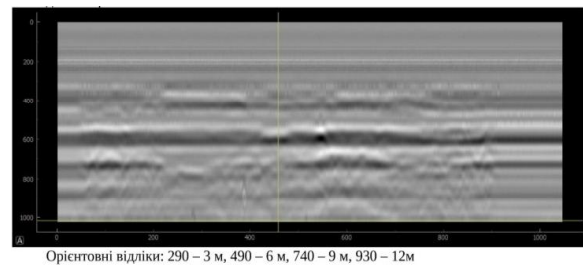


Рис. 8. Радарограма Test 8

Після завершення ремонтних робіт (рис. 9) з відновлення дорожнього одягу в зоні аварійного прориву підземних комунікацій було проведено повторні георадарні дослідження для контролю якості. Основною метою цього етапу було визначення товщини новоукладених конструктивних шарів і порівняння отриманих результатів з попередніми вимірюваннями на суміжних територіях.



Рис. 9. Ділянка для георадарного обстеження

Георадарні вимірювання здійснювалися тим самим георадарним комплексом ОДЯГ-1 з антенним блоком центральної частоти 1,2 ГГц за аналогічних технічних параметрів зйомки. Висота встановлення антенного блоку над поверхнею дорожнього покриття становила 0,35 м.

Додатково було здійснено інструментальне вимірювання геометричних розмірів відремонтованої ділянки. Загальна довжина латки становила 5,85 м, що було поділено на сегменти по 1,0 м з останнім 0,85 м для детального профілювання конструкції нового покриття.

Програма контрольних вимірювань складається з серій тестів:

– калібрувальні тести (Test 1, 2) з використанням атенюатора для верифікації стабільності роботи обладнання;

– статичні вимірювання (Test 3, 5) на відстанях 3, 6, 9, 12 метрів, відповідно;

– поздовжні профілі (Test 4, 6) паралельно поздовжній осі проїжджої частини з обох боків від латки;

– поздовжній профіль (Test 7) паралельно поздовжній осі проїжджої частини вздовж всієї відремонтованої ділянки.

Поздовжні георадарні профілі прокладалися на тих самих відстанях 3, 6, 9 і 12 метрів від центру латки, що забезпечувало можливість прямого порівняння з результатами попередніх вимірювань. Траєкторія проходу георадара була позначена для точної ідентифікації місць зондування.

Test 3 (дискретний збір даних, рух від краю ремонтної ділянки вздовж дороги проти напрямку руху транспорту) дозволив визначити товщини шарів дорожнього одягу способом аналізу відображень георадарного сигналу в окремих дискретних точках профілю.

Отримані результати розрахунків товщин дорожніх шарів наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати розрахунку товщин шарів дорожнього одягу за результатами Test 3

Відстань від краю ділянки, м	Проникність 1-го шару	Товщина 1-го шару, см	Проникність 2-го шару	Товщина 2-го шару, см
0	5.4	10.0	3.7	9.0
3	5.2	10.0	3.6	9.0
6	5.0	10.0	3.6	9.0
9	5.1	10.0	3.6	9.0

Test 5 (дискретний збір даних, рух від краю ремонтної ділянки вздовж дороги за рухом транспорту) дозволив визначити товщини шарів дорожнього одягу способом аналізу відображень георадарного сигналу в окремих дискретних точках профілю. Отри-

мані результати розрахунків товщин дорожніх шарів наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунку товщин шарів дорожнього одягу за результатами Test 5

Відстань від краю ділянки, м	Проникність 1-го шару	Товщина 1-го шару, см	Проникність 2-го шару	Товщина 2-го шару, см
0	4.9	11.0	3.41	9.0
3	4.7	10.0	3.20	8.0
6	4.9	10.0	3.62	9.0
9	4.9	10.0	3.05	9.0

На рис. 10 наведено радарограму виокремленого сигналу s_3 , що відображає відбиття від нижньої межі другого шару дорожньої конструкції. Вимірювання здійснювалися в напрямку проти руху транспорту.

На радарограмі спостерігається відбиття приблизно на мітці 5 нс та наступне відбиття, яке змінюється в інтервалі між 7 та 8 нс.

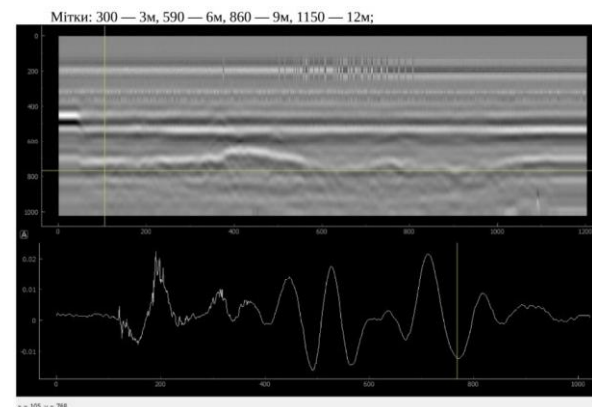


Рис. 10. Радарограма Test 4

На рис. 11 наведено радарограму виокремленого сигналу s_3 , що відображає відбиття від нижньої межі другого шару дорожньої конструкції. Вимірювання здійснювалися в напрямку за рухом транспорту.

На 800-му відліку радарограми спостерігається локальне відбиття з глибини, що може свідчити про наявність підземної комунікації.

На радарограмі прослідковується відбиття приблизно на мітці 5 нс та наступне відбиття, яке змінюється в інтервалі між 7 та 8 нс.

На відліках від 400 до 700 прослідковується відбиття на 4.2 нс.

На рис. 12 наведена радарограма, отримана під час неперервного збору даних

вздовж усього маршруту в напрямку, протилежному до руху транспорту, зокрема проїзду над ділянкою поточного ремонту.

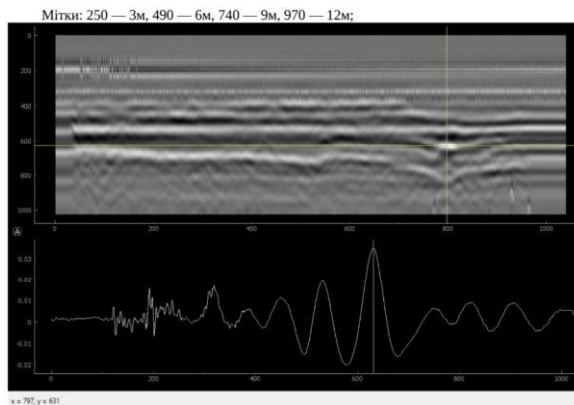


Рис. 11. Радарограма Test 6

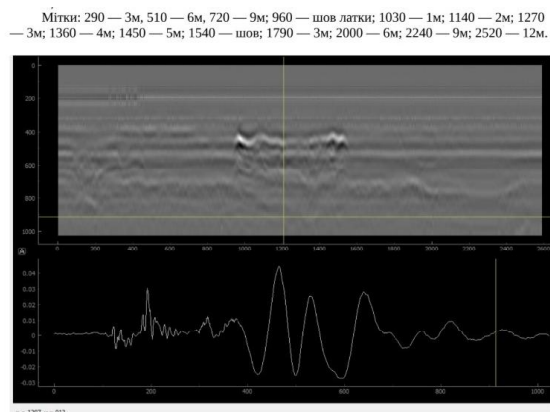


Рис. 12. Радарограма Test 7

Висновки

Результати повторних вимірювань на незмінених ділянках поза зоною ремонту демонструють підвищення точності георадарного комплексу ОДЯГ-1 після калібрування за еталонними значеннями відкритої карти. Порівняння Test 2 (до оптимізації) з Test 3 (після оптимізації) у напрямку проти руху демонструє стабілізацію товщини першого шару на рівні 10 см за незначного звуження діапазону діелектричної проникності з 5,0–5,5 до 5,0–5,4. Так само в напрямку за рухом (Test 7 vs Test 5) діелектрична проникність стабілізувалась у межах 4,7–4,9, як порівняти з початковим діапазоном 4,64–5,09, що доводить ефективність калібрування та зменшення похибок вимірювань.

Оптимізоване калібрування особливо позитивно вплинуло на точність визначення параметрів другого шару основи. На незмінених ділянках спостерігаються більш стабільні значення діелектричної проникності (3,05–3,7 після оптимізації, як порівняти з

3,06–3,7 до оптимізації), та більш чітке визначення меж шарів.

Радарограма Test 7 (рис. 12) є ключовою для аналізу стану всієї досліджуваної ділянки з з відремонтованою латкою. Аналіз демонструє кардинальні відмінності між незміненими ділянками та зоною ремонту. На ділянках поза ремонтом спостерігається відносно однорідна структура відбиттів, що підтверджує стабільність конструкції. Натомість у зоні латки (відліки 400–700) чітко проявляється аномальне відбиття на глибині 4,2 м, що вказує на структурні порушення відновленого покриття – можливі порожнини, недостатнє ущільнення або зміну щільності матеріалів.

Виявлені в зоні ремонту дефекти потребують негайного втручання для запобігання руйнуванню покриття, що доводить незамінність георадарного моніторингу для забезпечення довговічності відремонтованих ділянок автомобільних доріг.

Фінансування

Дослідження проведено за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проекту «Розроблення комплексу методів і засобів георадарної діагностики для оцінювання надійності об'єктів критичної транспортної інфраструктури».

Література

1. Батракова А. Г., Батраков Д. О. *Георадарні та геодезичні технології в дорожній галузі*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 212 с. ISBN 978-6137383087.
2. *GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights*. Construction and Building Materials / М. А. Rasol et al. 2022. Vol. 324. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126686.
3. *Assessment of the influence of cracking parameters on the condition of non-rigid highway pavements* / А. Batrakova et al. Eureka. 2025. (4). 164–79. <https://journal.eu-jr.eu/engineering/article/view/3915>
4. Zou L., Li Y., Alani A. M. *Utilizing dual polarized array GPR system for shallow urban road pavement foundation in environmental studies: a case study*. Remote Sensing. 2024. Vol. 16. № 23. P. 4396. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16234396>
5. *Application of Ground Penetrating Radar in the Assessment of Aged Roads: Focus On Complex Structures Under Different Weather Conditions* / E. Abdelsamei et al. Pure Appl Geophys. 2024. 181. 3633–3651. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03604-y>

6. *Research on the improvement method of imbalance of ground penetrating radar image data* / L. Cao et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article number: 2859. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02063-1>
7. ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування [Чинний від 2019-06-01]. Київ: Міністерство інфраструктури України, 2019. (Галузеві будівельні норми України).
8. ДСТУ 8954:2019. Автомобільні дороги. Оцінювання рівня дефектності дорожнього одягу [Чинний від 2021-01-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. (Національний стандарт України).
9. Спосіб калібрування та видалення паразитних відбиттів при неруйнівному контролі верхнього шару асфальтобетону за допомогою георадара: пат. 118408 Україна, МКИ E01C 23/01 (2006.01), G01V 3/12 (2006.01), G01S 13/88 (2006.01), G01R 29/08 (2006.01) / Батраков Дмитро Олегович, Батракова Анжеліка Геннадіївна; власники: Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т, Батраков Дмитро Олегович, Батракова Анжеліка Геннадіївна. N а 2017 05444; заявл. 02.06.2017; опубл. 10.01.2019, Бюл. N 1. 6 с.
10. GSSI Academy: Understanding the Dielectric Constant: веб-сайт. URL: <https://www.geophysical.com/gssi-academy-understanding-the-dielectric-constant> (дата звернення: 11.08.2025).

References

1. Batrakova, A. H., & Batrakov, D. O. (2018). *Heoradarni ta heodezychni tekhnologii v dorozhni haluzi* [Ground-penetrating radar and geodetic technologies in the road sector]. LAP LAMBERT Academic Publishing, ISBN 978-6137383087.
2. Rasol, M. A. et al. (2022). GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights. *Construction and Building Materials*, 324, 126686. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126686>
3. Batrakova, A., Urdzik, S., Dorozhko, Y., Shelkova, I., & Nazarenko, I. (2025). Assessment of the influence of cracking parameters on the condition of non-rigid highway pavements. *Eureka*, (4), 164–179. <https://journal.eu-jr.eu/engineering/article/view/3915>
4. Zou, L., Li, Y., & Alani, A. M. (2024). Utilizing dual polarized array GPR system for shallow urban road pavement foundation in environmental studies: A case study. *Remote Sensing*, 16(23), 4396. <https://doi.org/10.3390/rs16234396>
5. Abdelsamei, E., Sheishah, D., Runa, B. et al. (2024). Application of ground penetrating radar in the assessment of aged roads: Focus on complex structures under different weather conditions. *Pure and Applied Geophysics*, 181, 3633–3651. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03604-y>
6. Cao, L., Liu, L., Lu, C., & Chen, R. (2025). Research on the improvement method of imbalance of ground penetrating radar image data. *Scientific Reports*, 15, 2859. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02063-1>
7. Ministerstvo infrastruktury Ukrainy. (2019). *HBN V.2.3-37641918-559:2019. Avtomobilni dorohy. Dorozhni odiah nezhorstkyi. Proektuvannia* [Automobile roads. Flexible pavement. Design]. Kyiv. (Haluzevi budivelni normy Ukrainy).
8. DP «UkrNDNTs». (2019). *DSTU 8954:2019. Avtomobilni dorohy. Otsiniuvannia rivnia defektnosti dorozhnoho odiahu* [Automobile roads. Evaluation of pavement defect level]. Kyiv. (Natsionalnyi standart Ukrainy).
9. Batrakov, D. O., & Batrakova, A. H. (2019). *Sposib kalibruvannia ta vydalennia parazytnykh vidbyttiv pry neruivnomu kontroli verkhnoho sharu asfaltobetonu za dopomohoiu heoradara* [Method of calibration and removal of parasitic reflections in non-destructive testing of the upper layer of asphalt concrete using GPR]: pat. of Ukraine No. 118408.
10. GSSI Academy. (2025). *Understanding the dielectric constant*. Retrieved August 11, 2025, from <https://www.geophysical.com/gssi-academy-understanding-the-dielectric-constant>

Батракова Анжеліка Геннадіївна, д.т.н., проф. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, agbatr@ukr.net, тел.

+38 050-323-13-78,

Шелкова Ірина Сергіївна, асист. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою, irinagunko98@gmail.com,

+38 099-481-32-19,

Дорошко Євген Вікторович, к.т.н., доц. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою,

evgeniy.dorozhko@gmail.com,

+38 068-069-97-22,

Урдзик Сергій Миколайович, к.т.н., доц. каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою,

urdzick@gmail.com,

+38 067-593-50-92,

Назаренко Ірина Валентинівна, аспірант каф. проектування доріг, геодезії і землеустрою,

iryna379nazarenko@gmail.com,

+38 066-828-86-39,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого,

25, 61002, Україна.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, Україна.

Application of ground penetrating radar technologies for road pavement quality control

Abstract. Problem. Modern transport networks of Ukraine operate under challenging conditions due to constant growth of traffic intensity, vehicle overloading, climatic factors influence, and limited funding for maintenance and repair. In such conditions, the timely detection of road pavement defects and quality control of repair works becomes particularly important. Traditional diagnostic methods have significant disadvantages: they are destructive, require considerable material costs and time, and cause damage to the road surface. Therefore, non-destructive diag-

nostic methods, particularly ground penetrating radar technologies, have been actively developing in recent decades. **Goal.** The aim of this work is to control the quality of road pavement on Chernyshevska Street section in Kharkiv city by applying the ODYAG-1 ground penetrating radar complex. The study focuses on post-repair quality control and establishing the effectiveness of GPR technology for monitoring pavement condition after reconstruction works. **Methodology.** The research utilized the ODYAG-1 ground penetrating radar complex with antennas operating at 1.2 GHz central frequency. The methodology included three-stage calibration: free space measurements, metal reflector calibration, and reference section verification. A comprehensive survey scheme was developed with control points at regular 3-meter intervals. The signal decomposition method was applied based on representing the reflection signal from asphalt as a sum of reflections from individual layers. Data processing involved digital signal processing methods to enhance image quality, eliminate interference, and emphasize subsurface structural features. **Results.** The study successfully determined layer thicknesses of road pavement structure through analysis of GPR signal reflections. Before repair, measurements showed the first layer thickness of 10.0–11.0 cm with dielectric permittivity ranging from 4.64–5.5, and the second layer thickness of 8.0–9.0 cm with permittivity 3.06–3.7. Post-repair measurements revealed structural anomalies in the repaired zone, including abnormal reflection at 4.2 ns depth, indicating possible voids, insufficient compaction, or material density changes. Calibration optimization significantly improved measurement accuracy and stabilized dielectric permittivity values within narrower ranges. **Originality.** The research demonstrates the high accuracy of the GPR method for diagnosing hidden defects in road structures and establishes the effectiveness of the ODYAG-1 complex for post-repair quality control. The study provides a practical methodology for calibration and systematic surveying of road pavements using non-

destructive testing approaches. **Practical Value.** The developed approach enables rapid surveying with the possibility of operation in urban conditions without traffic interruption, relatively high accuracy, and low cost compared to destructive methods. The detected defects in the repair zone require immediate intervention to prevent pavement destruction, emphasizing the irreplaceable value of GPR monitoring for ensuring the durability of repaired road sections. The methodology provides a foundation for continuous monitoring of pavement conditions over time and early detection of defects that may lead to repeated failures.

Key words: ground penetrating radar, ODYAG-1 radar complex, current repair patch, quality control, road pavement

Batrakova Angelika, Professor, Doct. of Science, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4067-4371>,
agbatr@ukr.net,

Shelkova Iryna, assistant, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2562-2175>,
irinagunko98@gmail.com,

Dorozhko Yevhen, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2894-2131>,
evgeniy.dorozhko@gmail.com,

Urdzik Serhii, Ph.D., Assoc. Prof. Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6914-1221>,
urdzick@gmail.com

Nazarenko Iryna, PhD student, Department of Highway Design, Geodesy and Land Management,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8516-1433>,
iryna379nazarenko@gmail.com

Kharkov National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine.