

Оригинальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-03>

УДК 535.361:535.555:535.573+577.3.0

Д.О. БАТРАКОВ<sup>1</sup>, д.ф.-м. наук, проф.

e-mail: [batrakov@karazin.ua](mailto:batrakov@karazin.ua) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6726-8162>

М. М. КОВАЛЬОВ<sup>1</sup>, аспірант

e-mail: [nikolak791@gmail.com](mailto:nikolak791@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0083-5000>

А.О. МАСЛЕННИКОВ<sup>1</sup>, студент 6 курсу

e-mail: [djanton2011@gmail.com](mailto:djanton2011@gmail.com): ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7728-6559>

А.Г. БАТРАКОВА<sup>2</sup>, д. тех. наук, проф.

e-mail: [agbatr@ukr.net](mailto:agbatr@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4067-4371>

С.М. УРДЗІК<sup>2</sup>, к.тех.наук

e-mail: [urdzick@gmail.com](mailto:urdzick@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6914-1221>

<sup>1</sup>Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, факультет радіофізики, біомедичної електроніки й комп'ютерних систем, пл. Свободи 4, Харків, 61022, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет (ХНАДУ), 61002, Україна, м.Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

## НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕОРАДАРІВ (ОГЛЯДОВА СТАТТЯ, ЧАСТИНА I)

**Актуальність.** Актуальність досліджень, викладених у статті, обумовлена їхньою спрямованістю на реалізацію державної стратегії забезпечення надійності та подовження залишкового ресурсу транспортних та інженерних споруд, реалізація якої пов'язується з методами та засобами отримання інформації та її обробки у реальному масштабі часу; методами оцінки стану інженерних споруд, особливістю яких є значна неоднорідність геометричних та фізико-механічних параметрів, що ускладнює використання результатів діагностики. При очевидних перевагах хвильових методів зондування їх застосування стримується складністю завдань інтерпретації отриманих результатів і пов'язаними з цим похибками у визначенні параметрів конструкцій; багатofакторністю задач оцінки параметрів багатокомпонентних матеріалів конструкцій, недосконалістю методів дефектоскопії.

**Мета роботи** – огляд можливостей сучасних георадарів та засобів обробки надширококутних сигналів спільно з комп'ютерно-орієнтованими системами чисельного моделювання, оптимізація методів обробки георадарних даних для вирішення задач виявлення та ідентифікації підповерхневих неоднорідностей у будівельних конструкціях, що являють собою плоскошарове середовище.

**Матеріали та методи.** У першій частині статті наведено короткий огляд основних методів обробки наборів даних, які отримуються за допомогою імпульсних георадарів. Запропоновано новий метод обробки даних із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення GeoVizu. Також коротко розглянуто можливості застосування методів сучасної теорії дифракції та методів аналізу сигналів у просторово-часовій області для вирішення задач дефектоскопії.

**Результати.** Основу отриманих у роботі результатів становлять дані дистанційного зондування, запропоновані математичні моделі та методи обробки даних зондування. За результатами проведеного порівняльного аналізу можливостей георадарів запропоновано практичні рекомендації щодо підвищення надійності одержуваних наборів даних, обґрунтовано можливі напрями подальших досліджень.

**Висновки.** Отримані в роботі результати чисельного моделювання та проведені лабораторні експерименти підтвердили теоретичні припущення про рівень впливу ключових параметрів надширококутних георадарів на достовірність отримуваних результатів. Значимість отриманих нових наукових результатів полягає не тільки у використанні нових засобів зондування і нових моделей обробки та подальшої інтерпретації отриманих даних, а також й у розглянутих перспективах щодо розвитку засобів неруйнівного контролю та діагностики.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** імпульсні надширококутні георадари, комп'ютерні програми обробки даних, дистанційне зондування.

**Як цитувати:** Батраков Д.О., Ковальов М.М., Масленніков А.О., Батракова А.Г., Урдзік С.М. Неруйнівний контроль автомобільних доріг за допомогою георадарів (оглядова стаття, частина I). Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2021;35:30-40. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-03>

**In cites:** Batrakov DO, Kovalov MM, Maslennikov AO, Batrakova AG, Urdzik, SN. Non-destructive control of roads by georadars (review article, part I). Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2021;35:30-40. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-03>

© Батраков Д. О., Ковальов М. М., Масленніков А.О., Батракова А.Г., Урдзік С.М., 2021

**Open access.** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

## ВСТУП

У статті розглянуто питання застосування надширококутових георадарів для контролю стану автомобільних доріг з нежорстким покриттям. Такі завдання є комплексними, оскільки потребують послідовного вирішення кількох окремих завдань. У дорожній галузі до них відносяться:

- оцінка товщини шарів дорожнього покриття, у нашому випадку йдеться про нежорсткий дорожній одяг;
- виявлення підповерхневих дефектів;
- ідентифікація та позиціонування (визначення напрямку для тріщин) виявлених дефектів;
- оцінка поточного стану цієї ділянки покриття;
- побудова прогнозу подальшої еволюції, як усєї дороги, так і її окремих ділянок з урахуванням специфічних особливостей їх розташування;
- розроблення плану ремонтних заходів з урахуванням наявних ресурсів;
- вирішення задачі оптимізації витрат на утримання та ремонт мережі доріг.

Вирішенню перерахованих завдань присвячено велику кількість робіт [1-13], у тому числі й робіт авторів цієї статті [14-28], у яких викладено основні підходи та методи вирішення завдань оцінки та прогнозування стану дорожнього одягу за результатами георадарної діагностики. У той же час, як показує досвід практичного застосування імпульсних надширококутових георадарів, через певні природні обмеження та складність процесів взаємодії надширококутових сигналів георадару з багатоконструктивними матеріалами умовно плоскошарових середовищ (дорожнього одягу), немає універсального приладу (георадару), отже, і єдиного методу вирішення всіх зазначених завдань.

Основною **метою першої частини роботи** є розроблення методів обробки надширококутових сигналів сучасних георадарів з урахуванням специфічних особливостей таких приладів. Два розглянуті у статті георадари мають різні значення найважливішого параметра – центральної частоти. Цей параметр через фізичні особливості задач зондування плоскошаруватих середовищ визначає глибину зондування та їх роздільну здатність. Також георадари мають деякі принципові конструктивні відмінності. Зважаючи на обмеженість обсягу цієї статті, ми плануємо детальніше розглянути ці питання у другій частині роботи.

## ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ Й МЕТОД РІШЕННЯ

Постановка завдання, як було зазначено вище, складається з двох частин – отримання експериментальних наборів даних за допомогою двох зразків георадарного обладнання та подальшої обробки результатів зондування. Для отримання даних використовувалися два георадари, зовнішній вигляд яких наведено на Рис. 1, 2. Обидва прилади розроблено співробітниками відділу інтроскопії Інституту радіофізики та електроніки Національної академії наук України (ІРЕ НАН України).



Рис. 1. Георадар Одяг – 1. Етап калібровки сигналу.  
Fig. 1 Georadar ODYAG - 1. Signal calibration stage.

Підкреслимо, що ці прилади мають не тільки різні значення центральних частот, а й мають конструктивні

відмінності. Георадар Одяг-1 виконаний за схемою із компенсацією (диференціюванням). Диференціуюча приймально-передавальна антенна система реалізує метод повної частотно-незалежної розв'язки між передавальною та приймальною антенами. Це досягається використанням однієї передавальної антени (на Рис. 1. праворуч), та двох приймальних антен (на Рис. 1. ліворуч). Наявність двох приймальних антен за умови ретельного їх юстування забезпечує мінімізацію так званого сигналу прямого проходження, тобто, сигналу, що потрапив у приймальну антену, минаючи середовище, що зондується. Більш докладно принцип роботи такої системи описаний в [29, 30].

Другий прилад Одяг-4, як видно на Рис. 2, має дві антени – передавальну та приймальну, а ефект компенсації сигналу прямого проходження досягається завдяки наявності екранів конічної форми, які значно послаблюють сигнал прямого проходження. Слід зазначити, що відстань між приймальною та передавальною антенами істотно менше відстані до межі розділу середовища, що зондується. Це дозволяє відокремити дані сигналу на розгортці за часом і здійснити їх фільтрацію за допомогою стандартних алгоритмів, наприклад, що наведені в роботах [31, 32].

Процедура отримання вихідних даних для обох георадарів однаковий і складається з наступних етапів:

- калібрування приладу шляхом вимірювання сигналу, відбитого від листа металу;
- зондування на ділянках, про які заздалегідь відомо, що вони не містять підповерхневих неоднорідностей (дефектів) і надалі можуть вважатися еталонними;
- зондування ділянки покриття, що досліджується.



Рис. 2. Георадар Одяг – 4. Етап калібрування сигналу.

Fig. 2. Georadar ODYAG - 4. Signal calibration stage.

Порядок зондування детально описаний у роботах авторів [14, 17, 27]. Тому перейдемо до опису основних фізичних принципів, що створюють основу процесу обробки даних. Ці принципи спираються на пошарове відновлення значень діелектричної проникності з подальшим визначенням товщини кожного з шарів конструкції та подальшим застосуванням двох інтегральних перетворень. Основні принципи процесу пошарового відновлення діелектричної проникності матеріалу кожного шару докладно описано у роботах [14, 25-27]. Тому ми лише коротко зазначимо, що основу запропонованої в [14] схеми відновлення геометричних параметрів становить визначення коефіцієнта відбиття від межі верхнього шару і далі - відносної діелектричної проникності цього шару. У результаті це дозволяє отримати оцінку товщини верхнього шару. Далі процедура повторюється для наступного шару до підкладки. Зазначимо, що основу запропонованого підходу становить визначення

швидкості розповсюдження електромагнітної хвилі у верхньому шарі. Таким чином, укрупнено алгоритм обробки даних георадарного зондування складається з наступних етапів:

1. На основі первинної обробки даних зондування за допомогою перетворення Гільберта [19,26] визначаються часові затримки сигналів ( $\Delta t_n$ ), що потрапили до приймальної антени від нижніх границь плоскошаруватої конструкції, та їх амплітуди. Ця інформація є вхідною інформацією даного алгоритму.

2. За формулою

$$\sqrt{\varepsilon_{n+1}} = \sqrt{\varepsilon_j} \frac{A_{n,n+1} - A_{n+1,n}}{A_{n,n+1} + A_{n+1,n}} \quad (1)$$

визначається  $\sqrt{\varepsilon_1}$  та далі  $\varepsilon_1$ .

3. Далі за формулами (2-5)

$$T_{n\mp 1,n} = \begin{cases} \frac{2\sqrt{\varepsilon_{n-1}}}{\sqrt{\varepsilon_{n-1}} + \sqrt{\varepsilon_n}}, \\ \frac{2\sqrt{\varepsilon_n}}{\sqrt{\varepsilon_n} + \sqrt{\varepsilon_{n+1}}} \end{cases}, \quad (2)$$

$$P_1 = T_{0,1} \cdot T_{1,0} = \frac{2\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_1}} \cdot \frac{2\sqrt{\varepsilon_0}}{\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_1}} = 4 \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sqrt{\varepsilon_0}}{(\sqrt{\varepsilon_0} + \sqrt{\varepsilon_1})^2}, \quad (3)$$

$$C_1 = P_1 \cdot B_1 = (T_{0,1} \cdot T_{1,0}) \cdot A_0 \cdot R_{1,2}, \quad (4)$$

$$R_{n,n+1} = A_0^{-1} \cdot C_n / (P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n) = A_0^{-1} \cdot C_n / \prod_{n=1}^N P_n, \quad (5)$$

обчислюються  $T_{0,1}$ ,  $T_{1,0}$ ,  $A_{0,1}$  и  $A_{1,0}$ , а потім згідно (1) обчислюється  $\varepsilon_2$ .

4. Обчислення повторюються до останньої границі розділу середовищ, де визначається лише діелектрична проникність основи (грунту).

5. Координати меж шарів (границь розділу середовищ) визначають за формулою:

$$Z_n = \sum_{n=1}^I \frac{(t_n - t_{n-1}) \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_n}} = \sum_{n=1}^I \frac{\Delta t_n \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_n}}, \quad (6)$$

де  $Z_n$  - координата  $n$ -ї межі (верхня межа має індекс 0),  $t_n$ ,  $t_{n-1}$  - моменти проходження сигналом  $n$ -ї та  $(n-1)$ -ї межі відповідно, визначені на етапі 1,  $\varepsilon_n$  - діелектрична проникність  $n$ -го шару (визначена на етапі 2 або 3),  $c$  - швидкість поширення електромагнітних хвиль у вільному просторі (у повітрі).

6. Розраховуються значення товщини шарів  $h_n$  за формулою:

$$h_n = Z_n - Z_{n-1}; \quad Z_0 = 0, \quad n = 1, 2, \dots, I. \quad (7)$$

7. Отримані дані заносяться у файл для подальшої обробки.

Це у загальній постановці досить складне завдання. Тому в найпростішому випадку нехтують наявністю поглинання. За наявності поглинання може бути використаний підхід, запропонований у [18].

Наголосимо, що перетворення Гільберта є інтегральним перетворенням і для довільної дійсної функції  $x(t)$ ,  $(-\infty < t < \infty)$  може бути представлено як згортка  $x(t)$  з функцією  $hb(t) = 1/(\pi t)$ . У свою чергу, функцію  $1/(t - \tau)$  називають ядром перетворення Гільберта. Таке перетворення має особливість  $a = t - \tau \Rightarrow 0$ . У цій точці використовують головне значення по Коші:

$$\lim_{a \rightarrow 0} \left[ \int_{-\infty}^{t-a} \dots + \int_{t+a}^{\infty} \dots \right] \quad (8)$$



Тобто у вигляді:

$$\begin{aligned}\tilde{x}(t) &= TH[x(t)] = \\ &= x(t) * (1/\pi t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau.\end{aligned}\quad (9)$$

У літературі з обробки сигналів, перетворення Гільберта для аналогових сигналів часто пропонують представляти не як перетворення згортки оператора  $1/\pi t$ , а за допомогою спектрального уявлення аналітичної функції

$$\begin{aligned}z(t) &= x(t) + i\tilde{x}(t) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow X(\nu) + i\tilde{X}(\nu) &= Z(\nu).\end{aligned}\quad (10)$$

$$i = \sqrt{-1}.$$

Що стосується другого застосовуваного інтегрального перетворення, то спочатку воно було запропоновано у вигляді процедури обчислення дворазового інтеграла зі змінною верхньою межею у роботах [33, 34]. Однак, у цій роботі це інтегральне перетворення застосовується у вигляді одноразового інтеграла, що, у кінцевому підсумку, дозволяє підвищити ефективність його застосування.

На цьому закінчується етап визначення товщини шарів конструкції.

Для вирішення цього завдання у напівавтоматичному режимі використовується програма GeoVizu. Програма дозволяє проводити моделювання для найпростіших моделей плоскошарових середовищ [35] та здійснювати обробку даних зондування. Центральне вікно програми GeoVizu у режимі моделювання представлено на Рис. 3. На всіх наступних графіках на вертикальній осі відкладені значення амплітуди сигналів, а горизонтальній осі – час у наносекундах.

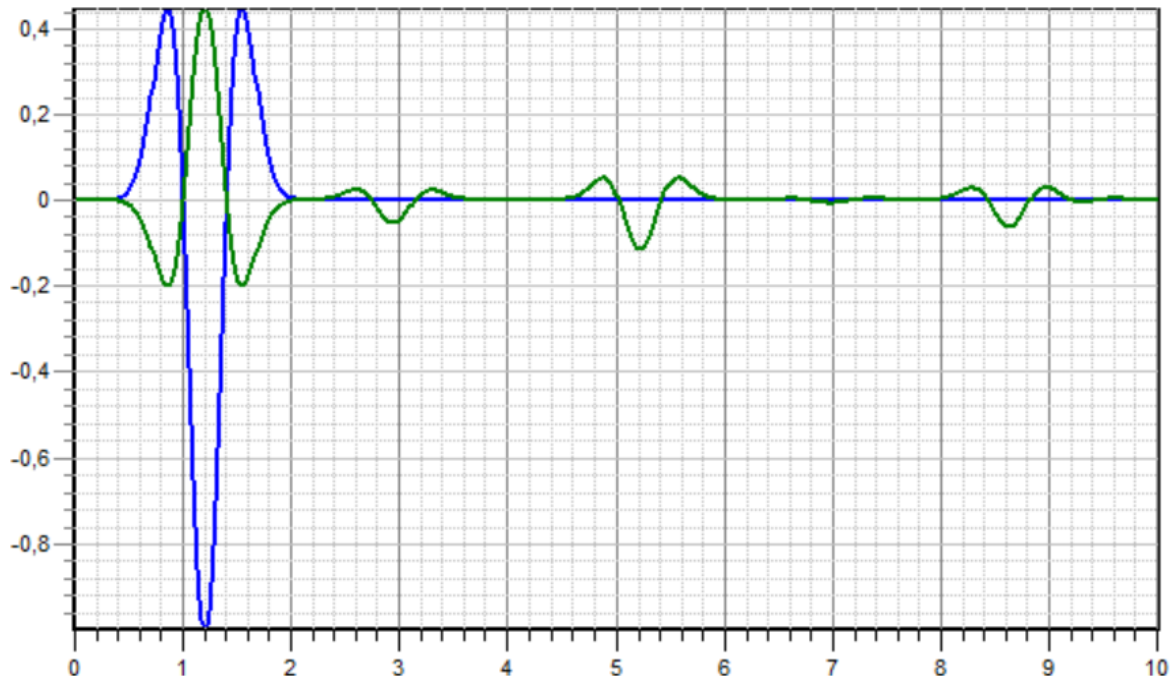


Рис. 3 Вікно програми GeoVizu в режимі моделювання.

Fig. 3. GeoVizu window in simulation mode.

Режим моделювання призначений для створення віртуальних наборів даних та їх подальшої обробки. Мета такого моделювання полягає в тому, що віртуальні штучно синтезовані сигнали мають форму, яка ідентична ідеальній формі імпульсного сигналу. Це дозволяє отримати практично неспотворені дані для перевірки можливості обробки. Для порівняння на Рис. 4. наведено зображення форми реальних сигналів, отриманих за допомогою георадара Одяг-4 в лабораторії Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Порівняння розподілів, що наведені на Рис. 3 та Рис. 4, наглядно демонструє різницю між штучно синтезованими сигналами (Рис. 3) та реально зареєстрованими сигналами від надширококутного георадара Одяг-4. Різниця, в першу чергу, полягає у наявності невеликих «шумів» (у науковій термінології це прийнято називати jitter), а

також деяким зсувом опорного сигналу, відбитого від листа металу (сигнал на Рис. 4 - червоного кольору), та сигналу, що отриманий при проїзді над конструкцією (сигнал на Рис. 4 зеленого кольору). Цей зсув обумовлений процесом прогріву приладу.

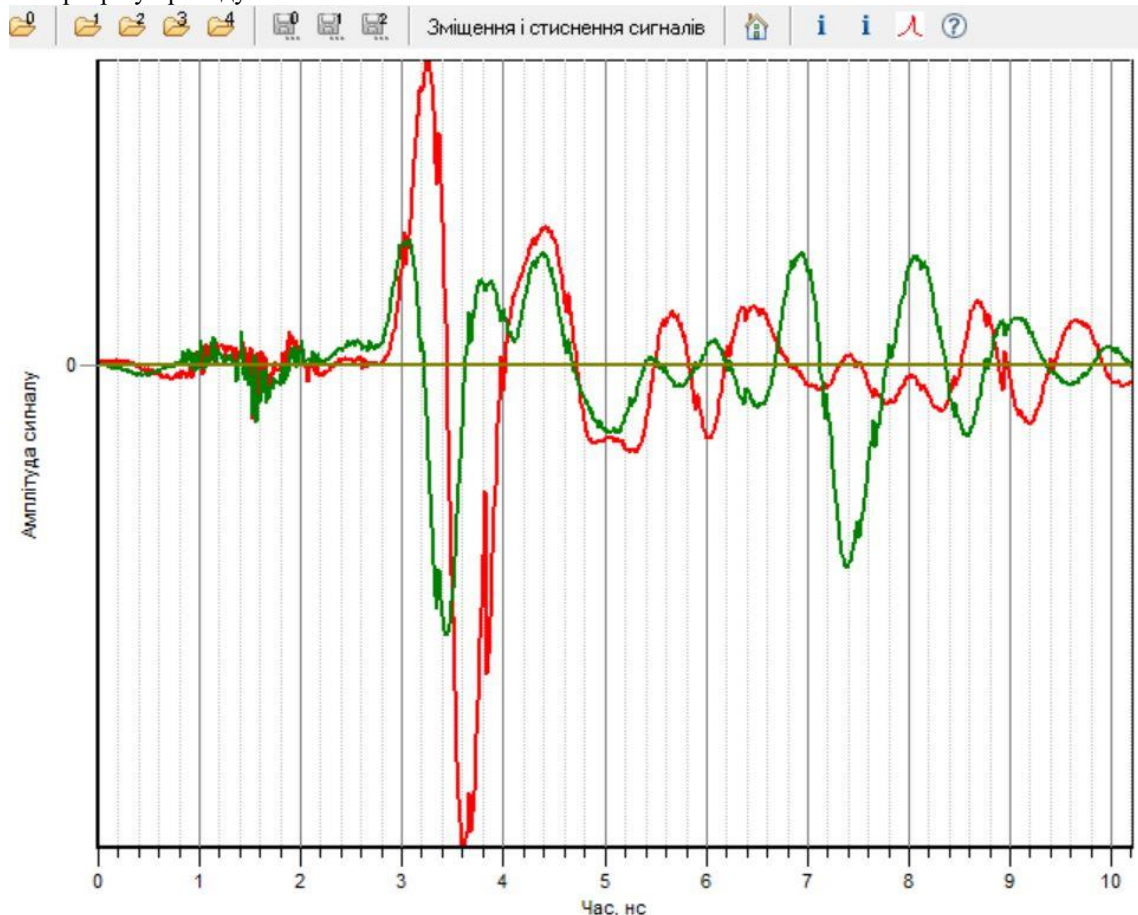


Рис. 4. Вікно програми GeoVizu при обробці даних георадару Одяг-4.  
Fig. 4. GeoVizu window when processing georadar data ODYAG-4.

Зважаючи на необхідність проведення вимірювань і на недостатньо прогрітому георадарі, у програмі GeoVizu передбачена можливість зсуву графіків та їх згладжування. Результат відповідних операцій наведено на Рис. 5. Параметри згладжування сигналу 1 мають значення 7, а сигналу 2 (зелений) – 8. Значення зсуву сигналу 1 праворуч дорівнює 21. Наступний етап - установка необхідних маркерів для початку процесу обробки в напівавтоматичному режимі. Відповідні результати представлені на Рис. 6. Важливо, що у цьому випадку використовується режим напівавтоматичної підготовки та обробки даних. На Рис. 7. наведено вигляд вікна нормування, де наглядно продемонстровані як процес установки маркера (відлік 344) так і головне визначення діелектричної проникності матеріалу верхнього шару в напівавтоматичному режимі. Отримане значення діелектричної проникності матеріалу шару з достатньою точністю збігається зі значенням, визначеним за результатами інших вимірювань, і, головне, добре узгоджується з результатами наступних вимірювань товщини верхнього шару, значеннями відносної діелектричної проникності та товщини шарів, що розташовані нижче.

Зрозуміло, дати детальний опис усіх можливостей програмного забезпечення GeoVizu через обмежений обсяг цієї статті неможливо. Автори розраховують відобразити ці питання у наступних публікаціях.

Нарешті, зазначимо, що раніше йшлося і про інші завдання, пов'язані з оцінкою поточного стану автомобільних доріг з нежорстким покриттям. До них належать: виявлення наявності підповерхневих дефектів; ідентифікація та позиціонування (визначення напрямку для тріщин) виявлених дефектів; оцінка поточного стану даної ділянки покриття; прогнозування поточного стану, як усїєї дороги, так й її окремих ділянок з урахуванням специфічних особливостей їх розташування; розроблення плану ремонтних заходів з урахуванням наявних ресурсів; розв'язання задачі оптимізації витрат на утримання та ремонт мережі доріг.

Це – перелік самостійних завдань, вирішення яких автори розраховують викласти у наступних публікаціях.

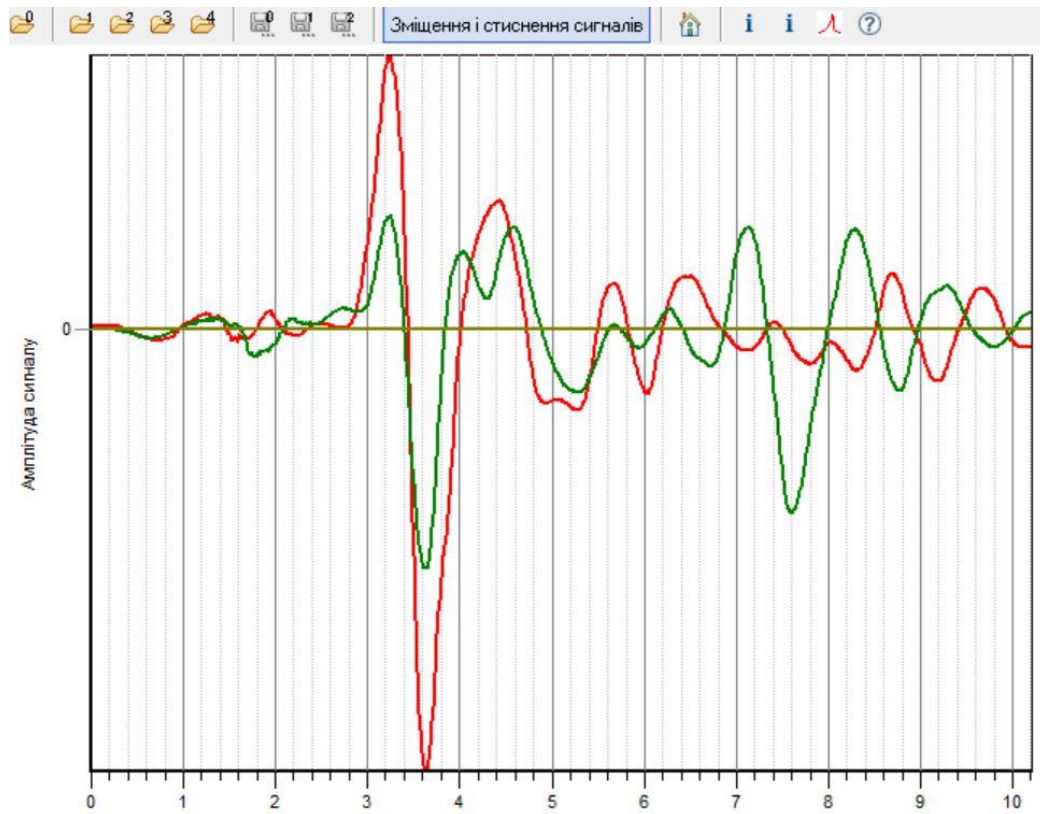


Рис. 5. Вікно програми GeoVizy при обробці даних георадара Одяг-4.  
Fig. 5. GeoVizy window when processing georadar data ODYAG -4.

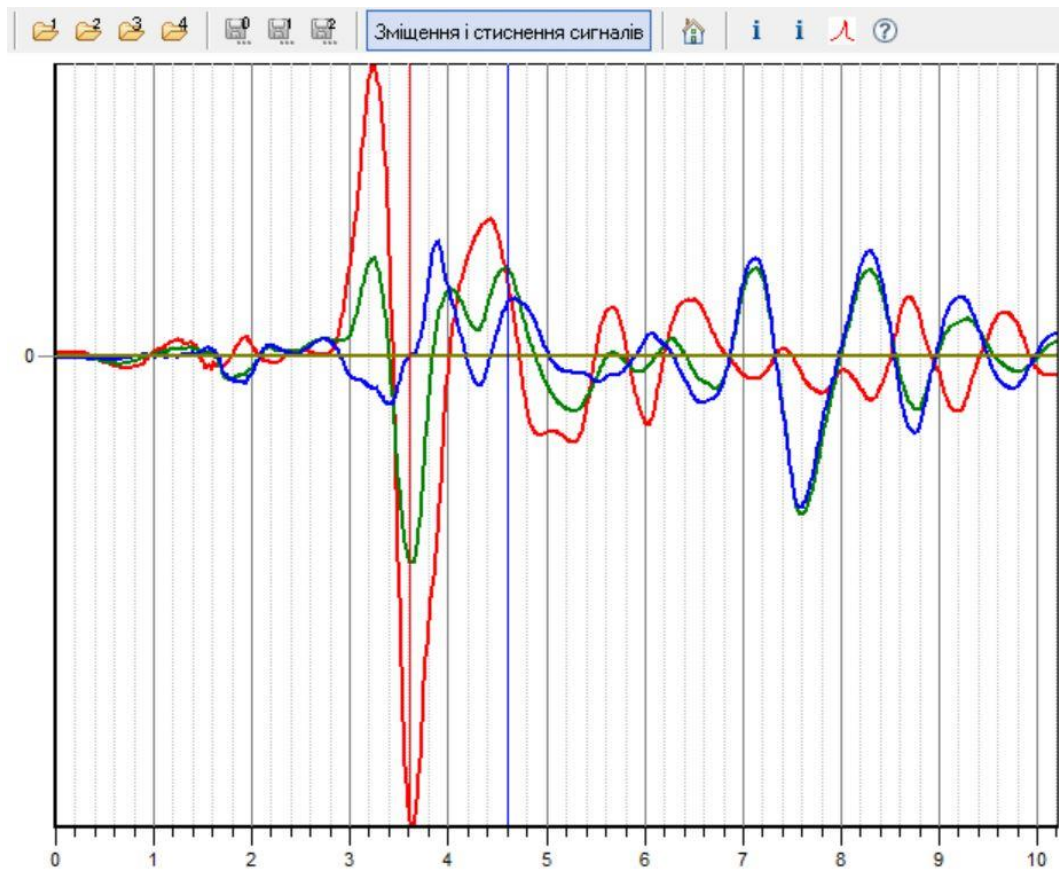


Рис. 6. Встановлення необхідних маркерів в напівавтоматичному режимі.  
Fig. 6. Installation of necessary markers in a semi-automatic mode.

Нормування 1						
Відлік №	344	Max	Час, нс	3,4333	R01	-0,44558
dt 0, нс	3,4333	Min	Значення1	-0,18635	T01	0,55442
h 1, см			Значення2	-0,083032	T10	1,4456
Фкс <input type="checkbox"/>	ДП1				R1+T1	1
	6,7984					

Рис. 7. Приклад вікна нормування  
Fig. 7. Example of normalization window

## ВИСНОВКИ

У статті викладено результати досліджень, спрямованих на реалізацію стратегії забезпечення надійності та продовження ресурсу транспортних та інженерних споруд. Ця стратегія передбачає залучення методів та відповідних засобів отримання інформації з подальшою обробкою у реальному масштабі часу. Робота спирається на методи оцінки стану автомобільних доріг загального користування, що розвиваються авторами. Особливістю постановки завдання у найзагальнішому вигляді є значна неоднорідність геометричних та фізико-механічних параметрів, що ускладнює використання результатів діагностики стандартних методів діагностики, що застосовуються у дорожній галузі вже багато років. Підкреслимо, що за очевидних переваг хвильових методів зондування за допомогою надширококутних сигналів їх застосування стримується не тільки складністю завдань інтерпретації отриманих результатів, але й пов'язаними з цим похибками у визначенні параметрів конструкцій. Для подолання вказаних труднощів авторами запропоновано нові підходи до вирішення завдань визначення товщини конструктивних шарів нежорсткого дорожнього одягу. Особливу важливість з точки зору практичної реалізації має запропонований підхід до вирішення задачі пошарового визначення спочатку значень відносної діелектричної проникності шарів конструкції, а потім - рішення задачі визначення товщини шарів. Зважаючи на те, що завдання такого типу належать до класу так званих завдань оцінки параметрів шарів з багатокомпонентних матеріалів, вони мають значення не тільки для даної галузі знань, але і є важливими для розвитку суміжних областей. Дослідження, результати яких представлені в даній роботі, є важливою, але лише проміжною ланкою у процесі вдосконалення методів та технічних засобів неруйнівного контролю та оцінки стану автомобільних доріг.

## КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Singh AP, Sharma A, Mishra R, Wagle M, Sarkar AK. Pavement condition assessment using soft computing techniques. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2018 Nov;11(6):564–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.12.006>.
2. Zafar MS, Raza Shah SN, Memon MJ, Ali Rind T, Soomro MA. Condition Survey for Evaluation of Pavement Condition Index of a Highway. *Civil Engineering Journal*. 2019 Jun 23;5(6):1367–83. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091338>
3. Jose Roberto Medina Campillo. A Simplified Pavement Condition Assessment and its Integration to a Pavement Management System. Arizona State University; May 2018. 222 p.
4. Jol Harry M, editor. Ground penetrating radar, theory and applications. Amsterdam: Elsevier B.V; 2009. 508 p.
5. Evans RD. Optimising Ground Penetrating Radar (GPR) to assess Pavements. Loughborough University; August 2009, 219 p.
6. Xu Y, Sun L. Study on Permanent Deformation of Asphalt Mixtures by Single Penetration Repeated Shear Test. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2013 Nov;96:886–93. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.101>
7. Rasol MA, Pérez-Gracia V, Fernandes FM, Pais JC, Santos-Assunção S, Santos C, et al. GPR laboratory tests and numerical models to characterize cracks in cement concrete specimens, exemplifying damage in rigid pavement. *Measurement*. 2020 Jul;158:107662. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107662>.
8. Payntar George. Method of test for obtaining deflection measurements and layer thickness information for rehabilitation design of hot mix asphalt surfaced pavements using mechanistic-empirical design and analysis procedures. State of California—business, transportation and housing agency, department of transportation division of engineering services Transportation Laboratory 5900 Folsom Boulevard Sacramento, California 95819 – 4612, California Test 357, March 2014, p. 1-12. <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/engineering/documents/californiatestmethods-ctm/ctm-357-a11y.pdf>
9. Gudmarsson A, Ryden N, Di Benedetto H, Sauzéat C, Tapsoba N, Birgisson B. Comparing Linear Viscoelastic Properties of Asphalt Concrete Measured by Laboratory Seismic and Tension–Compression Tests. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2014 Jul 16;33(4):571–82. <http://dx.doi.org/10.1007/s10921-014-0253-9>



10. Ryden N. Seismic pavement testing. International Conference on Engineering Geophysics, Al Ain, United Arab Emirates, 15-18 November 2015. 2015 Nov 18; p. 1-5. <https://doi.org/10.1190/iceg2015-005>
11. Lachowicz J, Rucka M. Numerical modeling of GPR field in damage detection of a reinforced concrete footbridge. *Diagnostyka*. 2016;17(2):3-8
12. Mezgeen A. Rasol Vega Pérez-Gracia, Mercedes Solla, Jorge C. Pais, Francisco M. Fernandes, Caio Santos, Sam Roberts. Early cracking observation in road pavements with Ground Penetrating Radar: Field and numerical study. November 2019, Conference: 1st International conference on ground penetrating radar applications for solving engineering problems at: Wroclaw, Poland, Project: New Methodologies for GPR Assessment of Soil Response and Cement Concrete Pavements, PP. 1-11.
13. Krysiński L, Sudyka J. GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. *Journal of Applied Geophysics*. 2013 Oct;97:27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.010>.
14. Батраков ДО. Алгоритмы поиска дефектов инженерных сооружений с помощью георадара (Обзорная статья, часть I) *Вестник радиофизики и электроники, Национальный университет им. В. Н. Каразина*. 2019;31:16-26. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-02>.
15. Батракова АГ. Методика моніторингу нежестких дорожних одежд с применением георадиолокационных технологий. Харьков; 2014. 397с.
16. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016.
17. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev AV, Batrakov AG. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 2017 Jun; Edinbourg, Scotland, IEEE Conference Publications; p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2017.7996072>
18. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev AV, Batrakov AG. Remote sensing of plane-layered media with losses using UWB signals. 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). 2017 May; p. 370-373. <https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972666>
19. Batrakov DO, Golovin DV, Simachev AA, Batrakov AG. Hilbert transform application to the impulse signal processing. 2010 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. 2010 Sep; p. 113 – 115. <https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2010.5609110>
20. Batrakov AG, Urdzik SM, Batrakov DO. Modeling and assessment of the condition of pavements with through cracks in the pavement. *HNADU Bulletin: Sb. scientific. tr.* 2019;85:48-58. (In Russian).
21. Batrakov, Angelika G.; Batrakov, Dmitry O.; Antyufeyeva, Mariya S.. Pavement deterioration model based on GPR datasets. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*. Mar. 2018;17(1):55-71. ISSN 2449-769X. <http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.018.004>
22. Батракова АГ, Урдзік СМ, Батраков ДО. Динамические и эконометрические модели прогнозирования состояния автомобильных дорог *Вестник ХНАДУ: Сб. научный. тр.* 2019;85:59-65.
23. Батраков ДО. Радиофизические методы решения задач неразрушающего контроля и дистанционного зондирования в частотной области. *Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, Серия "Радиофизика и электроника"*. 2018;28:8-15.
24. Батраков ДО, Диюн У, Белошенко КС, Антюфеева МС, Батракова АГ. Сравнительный анализ двух алгоритмов измерения толщины плоскостных сред с помощью импульсного георадара. *Вестник Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, Серия "Радиофизика и электроника"*. 2018;28:16-23.
25. Batrakov DO, Beloshenko KS, Antyufeyeva MS, Batrakov AG, Urdzik SN. COMPARATIVE STUDY OF SIGNAL PROCESSING OF TWO UWB GPR ANTENNA UNITS. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019;78(2):109–16. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.20>
26. Batrakov D, Batrakov A, Antyufeyeva M. Combined GPR data analysis technique for diagnostics of structures with thin near-surface layers. *Diagnostyka*. 2018 Sep 10;19(3):11–20. <https://doi.org/10.29354/diag/91489>
27. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakov AG, Troyanovsky VV, Pilicheva MO. UWB Signal Processing for the Road Pavements Assessment. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2019 Jul; p. 1-4. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879866>
28. Batrakov AG, Troyanovsky VV, Batrakov DO, Pilicheva MO, Skrypnyk NS. Prediction of the road pavement condition index using stochastic models. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*. 2020;19(3):225-242. <https://doi.org/10.7409/rabdim.020.015>.
29. Kopylov YA, Masalov SA, Pochanin GP. Method for decoupling between transmitting and receiving modules of antenna system. Patent UA 81652. Jan 25, 2008.
30. Pochanin GP, Ruban VP. Stroboscopic method of recording signals. Patent UA 96241, Dec 07, 2010.
31. Variantsia-Roshchupkina LA, Pochanin GP, Pochanina IYe, Masalov SA. Comparison of different antenna configurations for probing of layered media. 2015 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 2015 Jul; Florence, Italy. <http://dx.doi.org/10.1109/IWAGPR.2015.7292644>

32. Varyanitzha-roshchupkina L. Software for Image Simulation in Ground Penetrating Radar Problems. 2006 3rd International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. 2006 Sep; Sevastopol, Ukraine. p. 150-155. <https://doi.org/10.1109/UWBUS.2006.307172>
33. Astanin LY, Kostylev AA. Ultrawideband Radar Measurements: Analysis and Processing. London, UK: The Institution of Electrical Engineering; 1997. 256 p.
34. Astanin LY, Kipke MV, Kostyleva VV. The structural features of ultrawideband signals. 2008 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. 2008 Sep. p. 180-182. <https://doi.org/10.1109/UWBUS.2008.4669402>
35. Born M, Wolf E. Principles of optics. Pergamon press; 1968.

#### REFERENCES

1. Singh AP, Sharma A, Mishra R, Wagle M, Sarkar AK. Pavement condition assessment using soft computing techniques. International Journal of Pavement Research and Technology. 2018 Nov;11(6):564–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.12.006>.
2. Zafar MS, Raza Shah SN, Memon MJ, Ali Rind T, Soomro MA. Condition Survey for Evaluation of Pavement Condition Index of a Highway. Civil Engineering Journal. 2019 Jun 23;5(6):1367–83. <https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091338>
3. Jose Roberto Medina Campillo. A Simplified Pavement Condition Assessment and its Integration to a Pavement Management System. Arizona State University; May 2018. 222 p.
4. Jol Harry M, editor. Ground penetrating radar, theory and applications. Amsterdam: Elsevier B.V; 2009. 508 p.
5. Evans RD. Optimising Ground Penetrating Radar (GPR) to assess Pavements. Loughborough University; August 2009, 219 p.
6. Xu Y, Sun L. Study on Permanent Deformation of Asphalt Mixtures by Single Penetration Repeated Shear Test. Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2013 Nov;96:886–93. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.101>
7. Rasol MA, Pérez-Gracia V, Fernandes FM, Pais JC, Santos-Assunção S, Santos C, et al. GPR laboratory tests and numerical models to characterize cracks in cement concrete specimens, exemplifying damage in rigid pavement. Measurement. 2020 Jul;158:107662. . <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107662>.
8. Payntar George. Method of test for obtaining deflection measurements and layer thickness information for rehabilitation design of hot mix asphalt surfaced pavements using mechanistic-empirical design and analysis procedures. State of California—business, transportation and housing agency, department of transportation division of engineering services Transportation Laboratory 5900 Folsom Boulevard Sacramento, California 95819 – 4612, California Test 357, March 2014, p. 1-12. <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/engineering/documents/californiatestmethods-ctm/ctm-357-a11y.pdf>
9. Gudmarsson A, Ryden N, Di Benedetto H, Sauzéat C, Tapsoba N, Birgisson B. Comparing Linear Viscoelastic Properties of Asphalt Concrete Measured by Laboratory Seismic and Tension–Compression Tests. Journal of Nondestructive Evaluation. 2014 Jul 16;33(4):571–82. <http://dx.doi.org/10.1007/s10921-014-0253-9>
10. Ryden N. Seismic pavement testing. International Conference on Engineering Geophysics, Al Ain, United Arab Emirates, 15-18 November 2015. 2015 Nov 18; p. 1-5. <https://doi.org/10.1190/iceg2015-005>
11. Lachowicz J, Rucka M. Numerical modeling of GPR field in damage detection of a reinforced concrete footbridge. Diagnostyka. 2016;17(2):3-8
12. Mezgeen A. Rasol Vega Pérez-Gracia, Mercedes Solla, Jorge C. Pais, Francisco M. Fernandes, Caio Santos, Sam Roberts. Early cracking observation in road pavements with Ground Penetrating Radar: Field and numerical study. November 2019, Conference: 1st International conference on ground penetrating radar applications for solving engineering problemsat: Wroclaw, Poland, Project: New Methodologies for GPR Assessment of Soil Response and Cement Concrete Pavements, PP. 1-11.
13. Krysiński L, Sudyka J. GPR abilities in investigation of the pavement transversal cracks. Journal of Applied Geophysics. 2013 Oct;97:27–36. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.010>.
14. Batrakov DO. Algorithms for searching defects in engineering structures using GPR (Review article, Part I). Visnyk of VN Karazin Kharkiv National University, series “Radio Physics and Electronics.” 2019;(31):16-26. (In Russian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2019-31-02>.
15. Batrakov AG. Methodology for monitoring non-rigid road pavements with the use of ground-penetrating radar technologies. Kharkiv; 2014. 397p. (In Russian)
16. Guidelines for the inspection of buildings and structures to determine and assess their technical condition. DSTU-N B V.1.2-18: 2016. (In Ukrainian).
17. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev AV, Batrakov AG. GPR data processing for evaluation of the subsurface cracks in road pavements. 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 2017 Jun; Edinbourg, Scotland, IEEE Conference Publications; p. 1-6. <https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2017.7996072>
18. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Antyufeyev AV, Batrakov AG. Remote sensing of plane-layered media with losses

- using UWB signals. 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). 2017 May; p. 370-373. <https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972666>
19. Batrakov DO, Golovin DV, Simachev AA, Batrakova AG. Hilbert transform application to the impulse signal processing. 2010 5th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. 2010 Sep; p. 113 – 115. <https://doi.org/10.1109/UWBUSIS.2010.5609110>
  20. Batrakova AG, Urdzik SM, Batrakov DO. Modeling and assessment of the condition of pavements with through cracks in the pavement. *HNADU Bulletin: Sb. scientific. tr.* 2019;85:48-58. (In Russian).
  21. Batrakova, Angelika G.; Batrakov, Dmitry O.; Antyufeyeva, Mariya S.. Pavement deterioration model based on GPR datasets. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty.* Mar. 2018;17(1):55-71. ISSN 2449-769X. <http://dx.doi.org/10.7409/rabdim.018.004>
  22. Batrakova AG, Urdzik SM, Batrakov DO. Dynamic and econometric models for predicting the state of highways *Vestnik KhNADU: Sb. scientific. tr.* 2019;85:59-65. (In Russian).
  23. Batrakov DO. Radiophysical Methods for solving problems of non-destructive testing and remote sensing in the frequency domain. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Radio Physics and Electronics".* 2018;28:8-15. (In Russian).
  24. Batrakov DO, U Diyun, Beloshenko KS, Antyufeyeva MS, Batrakova AG. Comparative analysis of two algorithms for thickness measurement of plane-layered media using pulsed GPR. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Radio physics and electronics".* 2018;28:16-23. (In Russian).
  25. Batrakov DO, Beloshenko KS, Antyufeyeva MS, Batrakova AG, Urdzik SN. COMPARATIVE STUDY OF SIGNAL PROCESSING OF TWO UWB GPR ANTENNA UNITS. *Telecommunications and Radio Engineering.* 2019;78(2):109–16. <https://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v78.i2.20>
  26. Batrakov D, Batrakova A, Antyufeyeva M. Combined GPR data analysis technique for diagnostics of structures with thin near-surface layers. *Diagnostyka.* 2018 Sep 10;19(3):11–20. <https://doi.org/10.29354/diag/91489>
  27. Batrakov DO, Antyufeyeva MS, Batrakova AG, Troyanovsky VV, Pilicheva MO. UWB Signal Processing for the Road Pavements Assessment. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2019 Jul; p. 1-4. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879866>
  28. Batrakova AG, Troyanovsky VV, Batrakov DO, Pilicheva MO, Skrypnyk NS. Prediction of the road pavement condition index using stochastic models. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty.* 2020;19(3):225-242. <https://doi.org/10.7409/rabdim.020.015>
  29. Kopylov YA, Masalov SA, Pochanin GP. Method for decoupling between transmitting and receiving modules of antenna system. Patent UA 81652. Jan 25, 2008.
  30. Pochanin GP, Ruban VP. Stroboscopic method of recording signals. Patent UA 96241, Dec 07, 2010.
  31. Varyanytsia-Roshchupkina LA, Pochanin GP, Pochanina IYe, Masalov SA. Comparison of different antenna configurations for probing of layered media. 2015 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 2015 Jul; Florence, Italy. <http://dx.doi.org/10.1109/IWAGPR.2015.7292644>
  32. Varyanitza-roshchupkina L. Software for Image Simulation in Ground Penetrating Radar Problems. 2006 3rd International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. 2006 Sep; Sevastopol, Ukraine. p. 150-155. <https://doi.org/10.1109/UWBUS.2006.307172>
  33. Astanin LY, Kostylev AA. *Ultrawideband Radar Measurements: Analysis and Processing.* London, UK: The Institution of Electrical Engineering; 1997. 256 p.
  34. Astanin LY, Kipke MV, Kostyleva VV. The structural features of ultrawideband signals. 2008 4th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. 2008 Sep. p. 180-182. <https://doi.org/10.1109/UWBUS.2008.4669402>
  35. Born M, Wolf E. *Principles of optics.* Pergamon press; 1968.

Стаття надійшла до редакції: 16 вересня 2021 р.

Рекомендовано до друку: 18 жовтня 2021 р.

#### NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF ROADS BY GEORADARS (REVIEW ARTICLE, PART I)

**D.O. Batrakov<sup>1</sup>, M. M. Kovalov<sup>1</sup>, A.O. Maslennikov<sup>1</sup>, A.G. Batrakova<sup>2</sup>, S.N. Urdzik<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine*

<sup>2</sup>*Kharkiv National Automobile and Highway University (KNAHU), 25, Yaroslava Mudrogo St, Kharkiv, 61002, Ukraine*

**Relevance.** The relevance of the studies outlined in the article is due to their focus on the implementation of the state strategy for ensuring the reliability and extending the resource of transport and engineering structures, the implementation of which is associated with the methods and means of obtaining information and processing it in real time; methods for assessing the state of engineering structures, a feature of which is a significant heterogeneity of geometric and physical-mechanical parameters, which complicates the use of diagnostic results. With the obvious advantages of wave sounding methods, their application is constrained by the complexity of the tasks of interpreting the results obtained and the associated errors in determining the parameters of structures; the multifactorial

nature of the problems of evaluating the parameters of multicomponent materials of structures, the imperfection of flaw detection methods.

**Purpose of work** – a review of the capabilities of modern georadars and means of processing ultra-wideband signals together with computer-oriented systems for numerical modeling, optimization of methods for processing georadar data for solving problems of detecting and identifying subsurface irregularities in building structures that are a flat-layered medium.

**Materials and methods.** The first part of the article provides a brief overview of the main methods of processing data sets obtained using pulsed GPR. A new method of data processing using specialized software is proposed GeoVizy. The possibilities of using the methods of the modern theory of diffraction and methods of signal analysis in the space-time domain for solving the problems of flaw detection are also briefly considered.

**Results.** The results obtained in this work are based on remote sensing data, proposed mathematical models and methods for processing sensing data. Based on the results of the comparative analysis of the capabilities of georadars, practical recommendations were proposed to improve the reliability of the data sets obtained, and possible directions for further research were substantiated.

**Conclusions.** The results of numerical modeling and laboratory experiments obtained in this work confirmed the previously stated theoretical assumptions about the degree of influence of the key parameters of ultra-wideband GPR on the reliability of the results obtained. The significance of the new scientific results obtained consists not only in the use of new sensing means and new models of processing and subsequent interpretation of the data obtained, but also in the considered prospects for progress in the field of non-destructive testing and diagnostics.

**KEYWORDS:** pulse ultra-wideband georadars, computer programs for data processing, remote sensing.

The article was received by the editors: September 16 2021.

The article is recommended for printing: October 18 2021.