

УДК 535.3

*к.т.н., професор Човнюк Ю. В.,**ychovnyuk@ukr.net, orcid/ 0000-0002-0608-0203,**Національний університет біоресурсів і природокористування України,**к.т.н., доцент Діктерук М. Г., dicteruk@ukr.net, orcid/ 0000-0003-1889-0876,**доцент Чередніченко П. П., petro\_che@ukr.net, orcid / 0000-0001-7161-661x,**Соболевська Т. Г., tgsobolevskaya@gmail.com, orcid 0000-0003-4853-2367,**Київський національний університет будівництва і архітектури*

## ГЕОРАДІОЛОКАЦІЙНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ: ВСТАНОВЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТІВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА

Анотація: розглянуті та порівняні існуючі математичні моделі визначення діелектричної проникності ґрунтів, котрі є земляним полотном автомобільних доріг. Вказані моделі, зазвичай, використовуються у георадіолокаційній діагностиці автомобільних доріг і надзвичайно важливі при проектуванні ремонтів щодо посилення конструкції дорожнього одягу та забезпечення всіх необхідних транспортно-експлуатаційних характеристик самої дороги. Показаний вплив частоти сигналу на величину діелектричної проникності мінералів і води. Порівнюються електрофізичні властивості зв'язаної і вільної води. У результаті узагальнення наукових досліджень, проведених Судаковою М. С. та Криворучко Я. С. щодо розробки та застосування методики діелектричних вимірювань з використанням польового георадара у лабораторних умовах, запропонований метод, який дозволяє визначати ефективну діелектричну проникність гетерогенних середовищ й оцінювати вміст вологи у ґрунтах. Авторами роботи зроблений висновок, що з даними експериментальних досліджень діелектричних властивостей ґрунту задовільно збігаються результати розрахунків за моделлю Бірчака та Шмугге (Birchak J. R., Schmugge T. J.). Саме ці моделі є основою для вдосконалення математичної моделі, яка встановлює діелектричну проникність ґрунтів/дорожнього одягу автомобільних доріг із урахуванням різних розрахункових станів ґрунту і частоти електромагнітних хвиль, які генеруються георадаром.

Ключові слова: ґрунт, діелектрична проникність, частота, математична модель.

### **Постановка проблеми.**

Встановлення розрахункових характеристик ґрунтів земляного полотна автомобільних доріг є дуже важливим й актуальним питанням під час діагностики доріг України та задля проектування ремонтів щодо підсилення

конструкції дорожнього одягу і забезпечення всіх необхідних транспортно-експлуатаційних характеристик доріг.

Серед добре відомих і надійних методів для встановлення розрахункових характеристик ґрунтів існують нові прогресивні методи, які мають низку переваг – безконтактність, а, отже, забезпечення цілісності дорожньої конструкції, швидкість та оперативність діагностики. Саме такого результату можна досягти завдяки використанню поверхневої/підповерхневої георадіолокації.

Проте, як і всі інші методи, георадіолокаційні також мають свої недоліки, пов'язані із: 1) складністю інтерпретації даних, отриманих в процесі зондування конструкції дорожнього одягу й ґрунтів земляного полотна; 2) недостатньою кількістю математичних залежностей електрофізичних характеристик від фізичних та міцнісних характеристик ґрунтів; 3) відсутністю достатньої бази даних електрофізичних характеристик ґрунтів.

#### **Аналіз публікацій за темою дослідження.**

Значні й всебічні дослідження електрофізичних характеристик матеріалів ґрунтів були зроблені Боярським Д.А., Віняйкіним Є.Н., Золотаревим В. М., Криворучко Я.С., Судаковою М.С. та іншими [1, 5, 6, 12, 13].

Дослідження зв'язаної та вільної води, яка наявна у ґрунтах земляного полотна, наведені у роботах Боярського Д.А., Корольова В. А., Шутка А. М., Черняка Г. Я. та інших [1, 7, 8, 10].

#### **Мета і завдання дослідження.**

Діелектричні властивості ґрунтів визначаються діелектричними властивостями компонент, які входять до його складу: мінеральної частини скелета ґрунту, води і повітря. Дійсні частини діелектричної проникності  $\epsilon$  трьох фаз ґрунту суттєво різняться, маючи наступні значення: для повітря –  $\text{Re } \epsilon = 1$ ; для мінеральної частини скелета ґрунту –  $\text{Re } \epsilon = 3 \dots 4$ ; для води –  $\text{Re } \epsilon = 81$ . Ці суттєві відмінності зумовлюють можливість вимірювання вологості ґрунтів.

Для обґрунтування моделі діелектричних властивостей ґрунтів розглянемо діелектричні властивості компонент ґрунту, як трифазної системи.

#### **Виклад основного змісту дослідження.**

Згідно з аналізом, який провів Д.А. Боярський у [1], дійсна величина діелектричної проникності ( $\text{Re } \epsilon$ ) таких мінералів як кварц, польові шпати, монтморилоніт, каолінит тощо у діапазоні частот  $f = 1 \dots 50$  ГГц має величину  $\sim 3,6$  [2–4], а уявна частина ( $\text{Im } \epsilon$ ) у цьому ж діапазоні (сантиметрових та міліметрових електромагнітних хвиль)  $\sim 0,05 \dots 0,25$  [4, 5]. При більш високих частотах (500 ГГц) дійсна частина діелектричної проникності цих мінералів ( $\text{Re } \epsilon$ ) становить  $\sim 2,5 \dots 5$ , а уявна частина ( $\text{Im } \epsilon$ ) зменшується до

значень  $\sim 000,1$  [6]. (Частотам  $f \sim 500$  ГГц відповідає субміліметровий діапазон електромагнітних хвиль з довжиною хвилі  $\lambda \sim 0,6 \cdot 10^{-3}$  м).

У зв'язку зі складністю проведення експериментальних досліджень діелектричних властивостей зв'язаної води, ці її властивості вивчені доволі недосконало [7, 8], мають досить суперечливий характер для позитивних температур (повітря навколишнього середовища). Більшість дослідників дійшли до висновку, що ці властивості визначаються в основному властивостями самої поверхні, з якою взаємодіє вода, і ступенем зв'язку води з цією поверхнею [6, 9]. Професор Корольов В.А. відзначає, що діелектрична проникність води зв'язаної у кілька разів менша у порівнянні з вільною водою [10]. Якщо для звичайної води діелектрична проникність дорівнює 81, то для зв'язаної води ця величина зменшується до 3...40, у залежності від товщини водяної плівки. Згідно з даними останніх досліджень, плівка зв'язаної води товщиною 0,5...0,6 нм  $[(0,5...0,6) \cdot 10^{-9}$  м] має діелектричну проникність, що дорівнює 3...4. Дійсна й уявна частини діелектричної проникності вільної води в діапазоні частот від 1 ГГц до 40 ГГц мають виражену частотну і температурну залежності. Дійсна частина на частоті 1 ГГц змінюється від  $\sim 87$  при  $0^\circ\text{C}$  до  $\sim 80$  при  $20^\circ\text{C}$  і на частоті 40 ГГц від  $\sim 9$  при  $0^\circ\text{C}$  до  $\sim 16$  при  $20^\circ\text{C}$  [1]. Уявна частина змінюється при  $0^\circ\text{C}$  від  $\sim 9$  (1 ГГц) до  $\sim 17$  (40 ГГц). Найбільш сильно ці ефекти проявляються для вологих ґрунтів, тому досить важливо враховувати частоту сигналів.

На поширення сигналу у середовищі відчутно впливає наявність дисперсії (залежності від частоти електромагнітної хвилі її хвильового вектора  $k$ ,  $k=f(\omega)$ , де  $\omega$  — кругова частота електромагнітної хвилі). Тому цей факт необхідно враховувати під час розробки алгоритму визначення вологості ґрунтів земляного полотна. Проте, дорожній одяг над ґрунтом земляного полотна містить матеріали, які є композицією різних складових, що унеможлиблює вирішення даного питання (завдання) аналітичним шляхом, не маючи інформації про властивості кожної з компонент. Тому у розрахункову модель пропонується ввести коефіцієнт поправки, що враховує дисперсійні властивості матеріалів (у найпростішому варіанті розгляду електродинамічної задачі щодо визначення  $\text{Re } \epsilon$ ,  $\text{Im } \epsilon$ ). У такому випадку діелектрична проникність буде визначатись як [11]:

$$\epsilon = k_d \cdot \epsilon_\omega, \quad (1)$$

де  $\epsilon$  — значення діелектричної проникності прийняте у розрахунках;

$\epsilon_\omega$  — значення діелектричної проникності, яке визначене експериментально на частоті  $\omega$ .

Залежності діелектричної проникності багатоконпонентних сумішей від діелектричної проникності компонент, а також від вмісту і розподілу

компонент у суміші досить докладно і всебічно вивчені і теоретично представлені багатьма моделями. Графічні залежності  $\text{Re } \varepsilon$  від об'ємної частки води ( $W$ ) для різних моделей подані у [18].

Авторами [12, 13], а також автором [18] були виконані розрахунки за вказаними моделями. У дослідженнях [13] приймалося, що  $\text{Re } \varepsilon$  у діапазоні надвисоких частот у сухого ґрунту  $\varepsilon_{\text{гр.}}=3$ , а для води  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}=80$ .  $\text{Im } \varepsilon$  діелектричної проникності при цьому не враховували.

Як відзначають автори робіт [12, 13] жодна з формул не дає точного збігу з експериментальними даними. Найбільше узгоджуються з експериментом для даних типів дисперсних середовищ (піщані ґрунти, суглинки) моделі Дж. Бірчака [16] та В.І. Одолевського. Формула Дж. Бірчака добре описує ґрунти з об'ємною вологістю менше за  $0.3\text{см}^3/\text{см}^3$ , ( $W < 0.3$ ), а формула В.І. Одолевського – понад  $0.3\text{см}^3/\text{см}^3$ , як зазначають А.М. Шутко [8] та В.О. Процюк [18].

Провівши порівняльний аналіз більшості залежностей між діелектричною проникністю матеріалу та вмістом його компонент, автор [8] прийшов до висновку, що всі формули (крім формул Ліхтенекера, Бруггеманахана і Брауна [18]) зводяться до формули В.І. Одолевського для матричних сумішей, яка містить дві компоненти: діелектричну проникність сухого ґрунту і води.

Слід зазначити, що наведені вище математичні моделі ґрунтів оцінюють лише статичне значення діелектричної проникності середовища  $\varepsilon$ , що не є доволі коректним, оскільки під час георадіолокації ми отримуємо значення комплексної діелектричної проникності:  $\varepsilon = \text{Re } \varepsilon + j \text{Im } \varepsilon$ ,  $j^2 = -1$ .

Теоретичні залежності, в яких розглядаються додаткові чинники, наприклад, глинистість і наявність зв'язаної води, досить обмежені. Як зазначено у [15] універсальна теорія НВЧ діелектричної проникності існує тільки для вологонасичених газів. З огляду на складність та багатокритеріальність, адекватний розв'язок задачі (і доволі точний) щодо розрахунку комплексної діелектричної проникності ґрунтів у надвисокому частотному діапазоні (з довжиною електромагнітної хвилі випромінювання  $\lambda = (1 \dots 10)$  см) – невідомий. У зв'язку зі складністю теоретичних розрахунків, зазвичай, використовують дані лабораторних випромінювань, у яких визначають дійсну ( $\text{Re } \varepsilon$ ) і уявну ( $\text{Im } \varepsilon$ ) частини діелектричної проникності  $\varepsilon$ . Знаючи  $\text{Re } \varepsilon = \varepsilon'$  й  $\text{Im } \varepsilon = \varepsilon''$  покриття автомобільних доріг, можна за допомогою георадарних методів визначити параметри електромагнітної хвилі (зокрема, її електричної компоненти  $E^r$ ) з наступного рівняння:

$$\Delta E^r + \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \varepsilon \cdot \mu \cdot E^r + j \cdot \frac{4\pi\omega}{c^2} \cdot \delta \cdot E^r = 0, \quad (2)$$

де  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $\mu$  – магнітна проникність середовища, у якому розповсюджується поле  $E^r$ ,  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $\delta$  – електрична (питома) провідність середовища,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота розповсюдження електромагнітних хвиль (відбитих) від покриття дороги. Зазвичай  $\mu \equiv 1$ . Тому (2) зводиться до більш простого рівняння:

$$\Delta E^r + k^2 \cdot E^r = 0, k^2 = \frac{\omega^2 \varepsilon}{c^2} + j \cdot \frac{4\pi\omega}{c^2} \cdot \delta, \quad (3)$$

де  $k$  – хвильовий вектор електромагнітної хвилі, відбитої від дорожнього покриття. Зазвичай вважають:

$$\begin{cases} k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \varepsilon_{\text{середовища}}, & \varepsilon_{\text{середовища}} = \tilde{\varepsilon}' + j \cdot \tilde{\varepsilon}'' \\ \tilde{\varepsilon}' = \tilde{\varepsilon}; \tilde{\varepsilon}'' = \frac{4\pi\delta}{\omega} \end{cases}, \quad (4)$$

де  $\varepsilon_{\text{середовища}}$  – діелектрична проникність середовища, у якому розповсюджується відбита від покриття дороги електромагнітна хвиля, котра має, взагалі кажучи, дві складові (дійсну  $\tilde{\varepsilon}' = \tilde{\varepsilon}$ , а також уявну  $\tilde{\varepsilon}'' = \frac{4\pi\delta}{\omega}$ ).

Аналіз розв'язків (2) чи (3) є предметом окремого дослідження, яке буде проведене пізніше.

### ВИСНОВКИ

1. За результатами узагальнення наукових досліджень [12, 13] та досліджень [18] можна стверджувати, що з даними експериментальних досліджень діелектричних властивостей ґрунту, що входить до складу дорожнього одягу автомобільних доріг, задовільно збігаються результати розрахунків за моделями Бірчака [16] та Шмугге [17]. Саме зазначені моделі є основою для удосконалення математичної моделі, яка встановлює діелектричну проникність ґрунтів з урахуванням різних розрахункових станів самого ґрунту.

2. Отримані у роботі результати можуть бути у подальшому використані для уточнення і вдосконалення існуючих георадарних методів аналізу (та дистанційного моніторингу) дорожніх покриттів автомобільних доріг як на стадіях проектування/конструювання георадарів, так і у режимах їх реальної експлуатації.

## Список літератури

1. Боярский Д.А. Влияние связанной воды на диэлектрическую проницаемость влажных и мёрзлых почв / Д.А. Боярский, В.В. Тихонов. – М.: ИКИ РАН, 2003. – 48 с. – (Препринт/ИКИ РАН; 2003).
2. Словарь по геологии нефти и газа. – Л.: Недра, 1988. – 680 с.
3. Справочник физических констант горных пород /Под ред. С. Кларка. – М.: Мир, 1969. – 544 с.
4. Campbell M.J. Electrical properties of rocks and their significance for lunar radar observations /M.J. Campbell, J. Ulricks // J. Geophys. Research. – 1969. – Vol. 74, No.25. – P. 5867-5881.
5. Виняйкин Е.Н. Ослабление миллиметровых и сантиметровых радиоволн и изменение их фазы в среде, состоящей из сухих и обводненных пылевых частиц /Виняйкин Е.Н., Зиничева М.Б., Наумов А.П. – Нижний Новгород: НИР ФИ,1993. – 40 с. – (Препринт/Научно-исследовательского радиофизического института (НИР ФИ); 1993).
6. Золотарёв В.М. Оптические постоянные природных и технических сред / В.М. Золотарёв, В.Н. Морозов, Е.В. Смирнова.– Л.: Химия, 1984. – 243 с.
7. Черняк Г.Я. Радиоволновые методы исследований в гидрогеологии и инженерной геологии /Г.Я. Черняк, О.М. Мясковский. – М.: Недра, 1973. – 176 с.
8. Шутко А.М. СВЧ – радиометрия водной поверхности и почвогрунтов /А.М. Шутко. – М.: Наука, 1986. – 192 с.
9. Белая М.Л. Молекулярная структура воды / М. Л. Белая, В.Г. Левадный // Новое в жизни, науке, технике. Сер. Физика. – 1987. – №11. – С. 3-61.
10. Королёв В.А. Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы /В.А. Королёв // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №9 – С. 79-85.
11. Георадары, дороги – 2002: Материалы международной научно-практической конференции. – Архангельск: Архангельский гос. техн. ун-т, 2002. – 94 с.
12. Судакова М.С. Разработка и применение методики диэлектрических измерений с использованием полевого георадара в лабораторных условиях: дис. ... канд. физико-математических наук: 25.00.10 / Судакова Мария Сергеевна – М., 2009. – 125 с.
13. Криворучко Я.С. Визначення ефективної діелектричної проникності гетерогенних середовищ та оцінка вмісту вологи у ґрунтах /Я.С. Криворучко // Поверхность. – Вып. 3(18). – С. 22-28.
14. Wang J.R. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content / J.R. Wang, T.J. Schmugge// IEEE Trans. on Geosci and Remote Sensing. – 1980. – Vol.18, No. 14. – P. 288-295.
15. Хаммуд Ф.М. СВЧ диэлектрическая проницаемость дисперсных влагопроницаемых сред / Ф.М. Хаммуд, В.П. Герасимов, Ю.Е. Гордиенко // Радиофизика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10 – №3.– С. 334-340.

16. Birchak J.R. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture / J.R. Birchak, G.G. Gardner, J.E. Hipp, J.M. Victor// Proc. IEEE. – 1974. – Vol.62. – P. 93-98.
17. Wang J.R. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content /J.R. Wang, T.J. Schmugge// National Aeronautics and Space Administration Goddard Spans. – 1978. – 39 p.
18. Процюк В.О. Огляд основних математичних моделей визначення діелектричної проникності ґрунтів /В.О. Процюк // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – Луцьк, 2017. – Вип.7. – С. 207-212.

#### Аннотация

К.т.н., професор Човнюк Ю.В., к.т.н., Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, к.т.н., доцент Диктерук М.Г., доцент Чередниченко П.П., Соболевская Т.Г, Киевский национальный университет строительства и архитектуры.

#### **Георадиолокационные методы диагностики автомобильных дорог: определения расчетных характеристик грунтов земляного полотна.**

В работе рассмотрены и сравнены существующие математические модели определения диэлектрической проницаемости почв, которые являются земляным полотном автомобильных дорог. Указанные модели, как правило, используются в георадиолокационной диагностике автомобильных дорог и чрезвычайно важны при проектировании ремонтов по усилению конструкции дорожной одежды и обеспечении всех необходимых транспортно-эксплуатационных характеристик самой дороги. Показано влияние частоты сигнала на величину диэлектрической проницаемости минералов и воды. Сравняются электрофизические свойства связанной и свободной воды. В результате обобщения научных исследований, проведенных Судаковой Н.С. и Криворучко Я.С. по разработке и применению методики диэлектрических измерений с использованием полевого георадара в лабораторных условиях, предложен метод, который позволяет определять эффективную диэлектрическую проницаемость гетерогенных сред и оценивать содержание влаги в почве. Авторами работы сделан вывод, что с данными экспериментальных исследований диэлектрических свойств почвы удовлетворительно совпадают результаты расчетов по модели Бирчака и Шмугге (Birchak J.R., Schmugge T.J.). Именно эти модели являются основой для совершенствования математической модели, которая устанавливает диэлектрическую проницаемость почв / дорожной одежды автомобильных дорог с учетом различных расчетных состояний почвы и частоты электромагнитных волн, генерируемых георадаром.

Ключевые слова: почва, диэлектрическая проницаемость, частота, математическая модель.

## Annotation

Ph.D., Professor Chovnyuk Yu.V., National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ph.D., associate Professor Dikteruk M.G., Associate Professor Cherednichenko P.P., Assistant Sobolevskaya T.G., Kyiv National University of Construction and Architecture.

**Geological diagnostics of automobile roads: reinforcing of the calculated characteristics of the earth ground.**

The paper considers and compares the existing mathematical models of determining of the permittivity of soils, which are the soil road of highways. These models are generally used in georadar diagnostics of highways and are extremely important in designing repairs to enhance the design of road-clothes and to provide all the necessary transport and operational characteristics of the road itself. The influence of the signal frequency on the magnitude of the dielectric permittivity of minerals and water is shown. The electro physical properties of bound and free water are compared. As a result of the generalization of scientific research carried out by N.S. Sudakova and Krivoruchko Ya. S. on the development and application of the method of dielectric measurements using the left-hand georadar in laboratory conditions, we propose method which allows to determine the effective dielectric constant of heterogeneous media and to evaluate the moisture content in the soil. The authors of the work concluded that the results of calculations according to the model of Birchak and Shmugge (Birchak J.R., Schmugge T.J.) are satisfied for these experimental studies of the dielectric properties of the soil. These models are the basis for improving the mathematical model which establishes dielectric permittivity of soils / road clothes of motor roads taking into account different rational states of the soil and the frequency of electromagnetic waves generated by the georadar.

Key words: soil, dielectric permittivity, frequency, mathematical model.

УДК 711.5

*к.арх., доцент Франків Р. Б.,*  
[romanfrankiv@gmail.com](mailto:romanfrankiv@gmail.com), orcid: 0000-0003-1100-0930,  
**Лясковський О. Й.,**  
[Oliaskovskyi@gmail.com](mailto:Oliaskovskyi@gmail.com), orcid: 0000-0003-0963-9196,  
*Національний університет «Львівська політехніка»*

**ВАЛОРИЗАЦІЙНІ КАТЕГОРІЇ ПРОСТОРУ  
ПОСТ-ІНДУСТРІАЛЬНОГО МІСТА**

Анотація: розглядається тема інтеграції різних підходів для розуміння ціннісного змісту сучасного міського простору в єдину систему. Визначається відмінність між цінностями міста інформаційної доби та доінформаційної (аграрної та індустріальної).

Ключові слова: місто, багатовибірність, етос, інформатизація.