

УДК 624.13:537.87

Закономірності розповсюдження електромагнітних хвиль в ґрунтах

О. П. Рябчук, Б. О. Антипчук,
викладачі,
Житомирський агротехнічний коледж

З метою систематизації знань про закономірності розповсюдження радіохвиль в ґрунтах описано методику дистанційного радіометричного визначення рівня зволоженості, засоленості та гранулометричного складу ґрунтів з урахуванням діелектричної проникності складу ґрунтових розчинів. Подано аналіз фазової швидкості та довжини хвилі в залежності від щільності ґрунту. Проаналізовано теоретичні моделі радіофізичного дослідження ґрунтів.

Ключові слова: радіохвилі, ультразвук, діелектрична проникність, скін-ефект, фазова частота, довжина хвилі, резонансне поглинання, релаксація, дифракція, електромагнітне поле, струм, бокова хвиля.

The method of remote radiometric determination of moisture content, salinity and size of soil granules with allowance for dielectric permittivity of soil solutions is described in order to systematize knowledge about the laws of the propagation of radio waves in soils. The analysis of phase velocity and wavelengths depending on the density of soil is given. Theoretical models of soil radiophysical investigation are analyzed.

Keywords: radio waves, ultrasound, dielectric permeability, skin effect, phase frequency, wavelength, resonance absorption, relaxation, diffraction, electromagnetic field, current, side wave.

Постановка проблеми.

З точки зору радіофізики ґрунт є надзвичайно складним, але досить перспективним середовищем для дослідження. Час від часу у фахівців різних галузей економіки та науковців виникає потреба у застосуванні радіофізичних методів для дослідження ґрунтів. Це стосується як індустріальних сфер виробництва, так і сільського господарства. Адже перш ніж будувати дороги, житлові будинки, мости, комунальні мережі тощо, необхідно дослідити ґрунт, на якому все це буде споруджуватись, на наявність плавунів чи рихлих порід, аби уникнути катастроф. Механічні засоби таких досліджень енергомісткі та не досить ефективні, але за допомогою радіоімпульсних сигналів – швидко, надійно і ефективно.

Радіофізичні методи дослідження ґрунтів з великим успіхом також застосовуються і в сільському господарстві з метою покращення родючості ґрунтів та кореневого живлення рослин, що є вагомим підставою для підвищення врожайності сільськогосподарських культур.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Результати попередніх досліджень дозволили сформулювати вихідну систему теоретичних досліджень для розробки та обґрунтування параметрів радіофізичної системи визначення зволоженості, засоленості та глибини залягання пластів ґрунту різної щільності.

Питання електрофізичних параметрів різних ґрунтів та їх вплив на проходження електромагнітних хвиль досить добре та різнобічно описані в роботах: [1], [3], [5], [6, С. 397, 349-350, 402-403, 407-409], [8], [9, С. 404-405, 413-414, 421], [10], [11], [12].

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Діелектрична проникність ґрунту є основною умовою пропускання електромагнітних хвиль. Саме цей електрофізичний параметр одного й того ж ґрунту є досить мінливим і несталим, і змінюється в залежності від температури, випаровування, текстури, вологості і засоленості ґрунтів. Саме це явище значно ускладнює застосування радіофізичних методів у дослідженні ґрунтів, тому це питання час від часу розглядається фахівцями, які працюють у сфері фізичних властивостей ґрунтів.

Формування цілей статті.

Зазвичай сканування ґрунтів проводиться на довгих і наддовгих хвилях, і це важливо для георадіолокації. Проте, враховуючи всі попередні дослідження у сфері радіочастотного зондування ґрунтів, за мету є доведення, що для радіофізичного профілювання сільськогосподарських угідь з метою покращення їх обробки, можливе застосування високих частот, адже не потрібно зондувати дуже велику глибину. Як відомо, саме високочастотні радіосигнали забезпечують високу точність і роздільну здатність сканування.

Виклад основного матеріалу.

Будь-яке середовище, і ґрунти в тому числі, може сильно впливати на поглинання радіохвиль, причому енергія хвилі, яка втрачається, у вигляді тепла передається середовищу. Ступінь цих втрат визначається електрофізичними параметрами середовищ, які залежать від їх складу, температури, вологості. Як правило, всі середовища є сумішами і композитами інших, більш простих середовищ. Більш мінливими (здатними за певних умов часто змінювати свої електрофізичні параметри) є середовища, які утримують воду (ґрунти, рослинність, атмосфера), а менш мінливими – мінерали і сухі гірські породи. В більшості випадків вміст води – це основний фактор, що впливає на поглинання радіохвиль.

Серед електрофізичних параметрів ґрунтів, які впливають на розповсюдження радіохвиль, є, насамперед, комплексна відносна діелектрична проникність [9, С. 401]:

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_0} = \varepsilon' + \varepsilon'' = \varepsilon'(1 + i \tan \Delta), \quad (1)$$

де ε' та ε'' – дійсна та уявна частина діелектричної проникності, ε_0 – діелектрична проникність повітря, $\tan \Delta$ – тангенс кута втрат; дійсна і уявна частини діелектричної проникності визначаються через відповідні значення абсолютної діелектричної проникності [9, С. 401]:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} , \quad (2)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_0} , \quad (3)$$

До електрофізичних параметрів відноситься також комплексний коефіцієнт заломлення $n^* = \sqrt{\varepsilon^*}$, дійсна частина якого – звичайний коефіцієнт заломлення n , а уявна частина – показник поглинання χ [9, С. 402]:

$$n^* = n + i\chi , \quad (4)$$

Електрофізичні параметри середовища визначають також відстань скін-шару l_c (тобто, відстань, на якій відбувається згасання електромагнітних хвиль по мірі їх проникнення вглиб ґрунту). Оскільки ґрунт є шаруватим середовищем (через різну ступінь зволоженості та щільності по мірі глибини залягання), а кожен пласт має свою діелектричну проникність і по-різному пропускає електромагнітні хвилі, то при зондуванні ґрунтів скін-ефект спостерігається при сильному зволоженні верхніх шарів та за наявності щільного рослинного покриття, в якому радіохвиля вже починає згасати або затухає повністю.

До речі, відстань l_c сильно залежить від частоти [9, С. 403], оскільки при високих частотах струм існує лише в тонкому поверхневому пласті провідника. Зазвичай, хвилі низьких частот поглинаються слабше, ніж хвилі більш високих частот. Тому глибина проникнення для хвиль низьких частот більша, ніж для хвиль високих частот.

Існує декілька підходів до розрахунку електричних властивостей ґрунту. В ідеалі потрібно враховувати вплив багатьох різних факторів на діелектричні властивості ґрунту. Такими факторами є об'ємна щільність, текстура, композиційні властивості (розподіл розміру частинок і їх мінерологія), об'ємна концентрація води, повітря, ступінь солоності, температура і особливо характерні властивості ґрунтового розчину. У зв'язку з цим електропровідність або питомий опір ґрунту змінюється в найширших межах – більше, ніж будь-яка інша характеристика ґрунту. Якщо щільність ґрунту для різних його типів змінюється в 2-3 рази, теплопровідність – в 5-10 раз, швидкість розповсюдження звукових хвиль в 10-12 раз, то діелектрична проникність для різних ґрунтів і для одного й того ж ґрунту, в залежності від його стану, може змінюватись в мільйони та десятки мільйонів разів під впливом дії температури, опадів, випаровування тощо [6, С. 350].

З точки зору розповсюдження радіохвиль ґрунти є сильнопоглинаючим середовищем. Проте ґрунт не є ні ідеальним провідником, ні перепорою для проходження хвиль. Потрапивши в ґрунт, радіохвилі збуджують в ньому змінний електричний струм, який частину своєї енергії витрачає на нагрівання ґрунту. Величина втрат енергії у ґрунті дуже залежить від частоти радіохвиль і опору ґрунту електричному струмові. Експериментально встановлено, що в діапазоні частот від 20 Гц до 10 ГГц в ґрунтах можливе виникнення всіх видів релаксаційної поля-

ризації [9, С. 413], обумовленої рухом і переорієнтацією у зовнішньому електричному полі полярних молекул, диполів ґрунтових колоїдів, подвійних електричних шарів та іонів ґрунтового розчину, тобто таких видів поляризації речовин, як дипольно-релаксаційна, іонно-релаксаційна, структурна та гранична. В кінцевому результаті всі ці ефекти визначаються електрофізичними параметрами.

До електрофізичних параметрів ґрунтів відноситься питома електропровідність, яка для ґрунтів різної структури та температурного режиму визначається за окремими специфічними формулами. Наведемо для зразка загальну формулу [6, С. 349]:

$$\sigma = \frac{l}{RS}, \quad (5)$$

де R – електричний опір, ρ – питомий опір, l – довжина ділянки ґрунту в одну одиницю ($l=1$), S – площа перерізу в одну одиницю ($S=1$).

Другим електрофізичним параметром ґрунтів є діелектрична проникність, яка залежить від структури ґрунту і визначається також за різними формулами. Оскільки в даній роботі не ставиться за мету докладно розкрити залежність діелектричної проникності ґрунтових систем (розчинів) від форми та розміщення зерен, то приведемо для прикладу основні формули. Потрібно зауважити, що діелектрична проникність зволоженої системи ґрунту слабо залежить від форми та майже не залежить від радіуса зерен, а лише від вмісту (%) води. Універсальні формули для визначення діелектричної проникності ґрунту такі [6, С. 397]:

для різних випадків, коли $\varepsilon_2 \gg \varepsilon_1$ тоді

$$\varepsilon^{(k)} = \varepsilon_1 \frac{n_k - (n_k - 1)p}{p}, \quad (6)$$

для різних випадків, коли $\varepsilon_2 \ll \varepsilon_1$, тоді

$$\varepsilon^{(k)} = \frac{\varepsilon_1 (n_k - 1)p}{n_k - p}, \quad (7)$$

де ε_2 – діелектрична проникність твердої фази, ε_1 – діелектрична проникність проміжного середовища (повітря, вода), n – концентрація проміжного середовища, p – пористість системи.

Всі наведені формули стосовно визначення електрофізичних параметрів ґрунтів встановлені на основі аналізу механізму поляризації молекулярних диполів в діелектрику [6, С. 397].

Електрофізичні параметри помітно варіюються для різних ґрунтів і їх компонентів. В таблиці №1 [9, С. 404] приведені електрофізичні параметри деяких природних середовищ, що утворюють ґрунти, а також характерні для них коефіцієнти поглинання.

Серед всіх компонентів найбільший вплив на поглинаючі властивості ґрунтів має об'ємний вміст води, тобто вологість ґрунту, а також насичення цієї вологи сольовим вмістом. Експерименти з ґрунтами різної вологості дозволили виявити

три рівні резонансного поглинання [9, С. 414]. Перший з них – релаксаційне поглинання льоду, спостерігається при мінусових температурах ґрунтів на частоті 1кГц. Потрібно відмітити, що для різних типів ґрунтів характер поведінки діелектричних характеристик при мінусових температурах значно відрізняється від їх поведінки за плюсових температур.

Другий рівень резонансного поглинання: релаксаційне поглинання диполями зв'язаної води і припадає на діапазон близько 100 кГц. Третій максимум поглинання електромагнітного поля відбувається при діапазоні 1ГГц і визначається властивостями вільної води в ґрунті.

У міру зволоження ґрунту стан води докорінно змінюється. Спочатку, при її малій кількості, вона знаходиться лише в хімічному або механічному зв'язаному стані. Коли молекули води взаємодіють з молекулами ґрунту (хімічний стан) або коли тонким шаром покривають поверхні твердих компонентів ґрунту і знаходяться під значним впливом сил поверхневого натягу (механічний стан), це – так звана зв'язана вода. Потім, при збільшенні її кількості в ґрунті, вода вже знаходиться у вільному стані, а в результаті цього помітно змінюються електрофізичні властивості ґрунту в цілому, при накопиченні води діелектрична проникність збільшується значним чином. Діелектрична проникність ґрунту пов'язана з вмістом в ній води практично лінійною залежністю.

Таблиця 1

Електрофізичні параметри деяких природних середовищ

Середовище розповсюдження радіохвиль	ϵ'	σ , 1(м Ом)	γ , дБ/м для $f = 100\text{МГц}$	1_c , м для $f = 100\text{МГц}$
Сухий ґрунт	3-4	0,000011-0,002	0,01-1,6	2,7-434
Вологий ґрунт	10-30	0,003-0,030	1,5-8,9	0,49-2,9
Ґрунт піщаний сухий	3	0,00015	0,14	31
Ґрунт піщаний мерзлий	25	0,007	2,3	1,9
Піщаник вологий	6	0,04	34	0,13
Сланець глинистий вологий	7	0,1	45	0,097
Вапняк вологий	8	0,025	14	0,31
Бальзат вологий	8	0,01	5,6	0,78
Граніт вологий	7	0,001	0,6	7,2
Вода прісна	81	0,001	0,18	24
Вода морська	81	4	330	0,013
Лід при T -20 С	3,7	$2,1 \cdot 10^{-8}$	0,01	430

ϵ' - діелектрична проникність, σ - питома провідність, γ - коефіцієнт поглинання, 1_c - товщина скін-шару для частоти = 100МГц [9, С. 404].

До речі, ґрунт, який містить воду, є полярною рідиною, і для нього, згідно з теорією Дебая, діелектрична проникність зменшується із збільшенням робочої частоти. Існують численні дослідження, які підтверджують цей факт, наприклад в ро-

ботах Баристо, Раткліффа, Уайта та Сміта-Роуза [6, С. 407-409]. Було встановлено, що із збільшенням робочої частоти електрична провідність повільно росте, а діелектрична проникність повільно падає в межах 100 Гц – 10 КГц, і, як результат – збільшується коефіцієнт поглинання радіохвиль, тому радіофізичне дослідження ґрунтів проводиться на довгих і наддовгих хвилях, тому що довгі хвилі здатні огинати перепони (явище дифракції).

Важливо додати, що на електрофізичні параметри ґрунту та на поглинання хвиль значно впливає міжпорове повітря, особливо при підвищеній пористості ґрунту: так, наприклад, найменше поглинання хвиль спостерігається у сухому піску. Проте слід мати на увазі, що зазвичай у ґрунті завжди утримується певна кількість вологи, тому повітря всередині пор, як правило, насичується, і електропровідність в результаті цього підвищується, тому що чиста вода характеризується меншим значенням питомого опору.

Згідно з дослідженнями Сміта-Роуза, Хостінгера, Роя і Банерая [6, С. 402-403], із збільшенням щільності ґрунту зростає його діелектрична проникність, що провокує швидке відбиття радіохвилі. Це пояснюється тим, що під час ущільнення ґрунту вміст у ньому повітряної фази, яка має зовсім малу діелектричну проникність, зменшується за рахунок зростання твердої фази з великою діелектричною проникністю.

Як вже вище згадувалось, на діелектричні властивості порід ґрунту суттєво впливає геометрія і текстура частинок ґрунту. В гетерогенному середовищі, яким є ґрунт, частинки мають складну форму – від простих, з кристалічною структурою різного розміру, до невеликих включень, які мають волокнисту структуру. При цьому діелектричні властивості композитних матеріалів залежать від того, як електромагнітне поле орієнтоване відносно квазішарової мікроструктури ґрунту. Якщо поле орієнтоване вздовж цієї мікроструктури (горизонтально), то результативна діелектрична проникність буде виражатись формулою [10, С. 28]:

$$\varepsilon^* = \sum_i \varepsilon_i \vartheta_i, \quad (8)$$

де ϑ_i - об'ємна концентрація i -ї фракції.

Якщо поле орієнтоване перпендикулярно (вертикально) пластам цієї мікроструктури, тоді [10, С. 28]:

$$\varepsilon^* = \frac{1}{\sum_i \frac{\vartheta_i}{\varepsilon_i}}, \quad (9)$$

Таким чином комбінація цих двох формул стосовно певної мікроструктури може по-різному визначати частотну залежність результативної діелектричної проникності, хоча вихідна частотна залежність фракції води завжди буде мати один і той же вигляд.

На поглинання радіохвиль значною мірою впливає рослинне покриття. Відбиваючі властивості ґрунту, вкритого рослинністю, залежать від затухання радіохвиль в шарі рослинності. Затухання хвиль залежить від питомої щільності біомаси рослин.

Найменшу питому ефективну площу розсіювання хвиль мають слабкі рослинні покриття, і при кутах падіння хвилі від 00 до 300...400 наближається до відбиття поля без рослинності. Збільшення висоти рослин призводить до збільшення відбиття хвиль, особливо для кутів падіння 200...300. Якщо рослинні покриття високі, але рідкі, то відбиття хвилі в ґрунті ще можливе. Найбільша ефективна площа розсіювання радіохвиль при густих рослинних покриттях: хвилі починають затухати вже в шарі рослинної біомаси, не відбиваючись від ґрунту. Це є справедливим впритул до середини дециметрових хвиль. Тому сезонні варіації ефективної площі розсіювання хвиль під час радіофізичного дослідження ґрунту при наявності рослинного покриття мають коефіцієнт поглинання хвиль: $\gamma = 6-10$ дБ/м [5, С. 145-146].

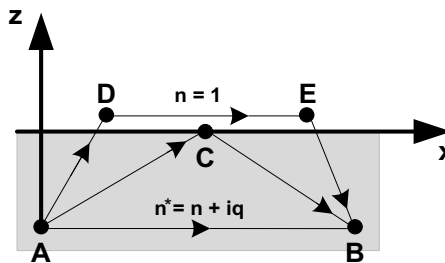


Рис. 1. Можливі траєкторії розповсюдження хвиль у ґрунті [9, С. 421]

Важливо враховувати те, що, коли хвиля розповсюджується в однорідному ґрунті, то вона рухається прямолінійно з постійною швидкістю. А в ґрунті, який має декілька пластів з різною діелектричною проникністю або повітряні ями, розповсюдження хвиль ускладнюється і виникає вторинна хвиля, яка відбивається вниз від межі розділу різних пластів ґрунту (рис. 2) [9, С. 421].

Тобто

$$E = E_1 + E_2 , \quad (10)$$

де E_1 – хвиля, яка розповсюджується в середовищі прямолінійно з комплексним коефіцієнтом заломлення, $n^* = n + i\chi$ а E_2 – вторинна хвиля, яка відбивається від межі різних пластів ґрунту і має криволінійну траєкторію, а під час проходження в ґрунті розпадається на дві складові: одна з них відповідає полю дзеркального відображення вторинної хвилі (ламана ACB на рис.1), а друга складова – бічна хвиля. Дзеркально відображена хвиля веде себе подібно прямій хвилі E_1 , але проходить більшу відстань у ґрунті та сильно послаблюється головним чином за рахунок експоненціального (швидкого) поглинання електромагнітних хвиль у ґрунті. Бічна хвиля експоненціально послаблюється лише на відрізках AD і EB (коли хвиля полишає ґрунт, а потім знову повертається в нього), але не відчуває такого послаблення на відріжку DE, проходячи його у верхньому середовищі. Якщо верхнє середовище – повітря, то бічна хвиля буде домінуючою, так як тому що послаблюється з відстанню поступово. Внесок бічної хвилі значно зростає при збільшенні робочої частоти, при цьому фазова швидкість бічної хвилі визначається електрофізичними параметрами верхнього шару ґрунту або повітрям (у разі повітряних ям).

Висновки.

Як видно з усього вищесказаного, ґрунт є надзвичайно складним середовищем для застосування методів радіофізичного дослідження, адже електрофізичні параметри різних типів ґрунтів не є сталими величинами, а весь час варіюють під впливом різних сезонних, кліматичних, температурних та погодних умов, тому і відсутня адекватна систематизація експериментальних даних, достатніх для побудови фізичних моделей діелектричної проникності ґрунтів та ефективності розповсюдження в них радіохвиль. Вивчення ґрунтів за допомогою радіофізичних методів надзвичайно цікава тема, адже всупереч багатьом існуючим теоретичним моделям іноді спостерігається набагато менше затухання хвиль в ґрунті, що вимагає подальшого осмислення і перегляду існуючих уявлень про електричні і фізичні характеристики типових ґрунтів в їх природному стані.

При використанні радіоімпульсних сигналів дуже складно реалізувати поставлені задачі в дослідженні ґрунтів. Це обумовлено тим, що будь-яке середовище, в тому числі і ґрунт, в якому поширюються радіохвилі, має частотну суттєву дисперсію фазової швидкості хвилі і загасання, тому можуть виникати істотні спотворення сигналів. Компенсацію цих спотворень можна здійснити шляхом математичної обробки сигналів, для чого необхідно створити відповідні алгоритми.

Бібліографія

1. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. Москва, 1973. – 343 с.
2. Богородский В. В., Канарейкин Д. Б., Козлов А. И. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Ленинград, 1981. – 280 с.
3. Воронин А. Д. Основы физики почв. Москва, 1986. – 243 с.
4. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. Москва, 1972. – 336 с.
5. Мельник Ю. А., Зубкович С. Г. Радиолокационные методы исследования Земли. Москва, 1980. – 262 с.
6. Нерпин С. В., Чудновский А. Ф. Физика почвы. Москва, 1967. – 584с.
7. Петров Б. М. Электродинамика и распространение радиоволн. Москва, 2007. – 558 с.
8. Петровский А. Д. Радиоволновые методы в подземной геофизике. Москва, 1971. – 224 с.
9. Яковлев О. И., Якубов В. П., Урядов В. П., Павельев А. Г. Распространение радиоволн. Москва, 2009. – 496 с.
10. Сугак В. Г., Бондаренко А. В., Сугак А. В. О противоречии данных подповерхностного зондирования теоретическим моделям диэлектрических характеристик пород грунта. Радиофизика и электроника. 2012. Т. 3(17), № 1. – С. 19-29.
11. Финкельштейн М. И., Кутев В. А., Золотарев В. П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования. Москва, 1986. – 129 с.
12. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. – Москва, 1986. – 190 с.