

РАДІОЛОКАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОГИХ ҐРУНТІВ У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВМІСТУ СОЛЕЙ У ҐРУНТІ

Ю.В. Горишня

(Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України)

Представлено результати чисельного моделювання впливу засоленості вологих ґрунтів на їхні радіолокаційні характеристики для довгохвильового Р-(70 см) діапазону. Обговорюються можливості застосування засобів активного дистанційного зондування дециметрових діапазонів довжин хвиль для оцінки засоленості ґрунтів.

Вступ. Екологічний моніторинг регіонів, що спустиніли, зокрема засолених земель, – задача, для розв'язання якої застосовуються різні методи, у тому числі використання засобів дистанційного зондування (ДЗ), розміщених на авіа- і космічних носіях [1 – 3].

Діелектричні властивості ґрунтового розчину в довгохвильовій області (дециметрові і метрові хвилі) мають яскраво виражену залежність від ступеня мінералізації ґрунтового розчину (СМґР), тобто від кількості солей, розчинених у ґрунтовій воді, і в такий спосіб зв'язані з кількістю солей Z у ґрунті. Діапазон довжин хвиль 40 ÷ 60 см був визнаний найбільш сприятливим для цілей ДЗ засолення ґрунтів із застосуванням радіометрії [3, 4]. При використанні радіолокаційного ДЗ у L-діапазоні (20 см) виявилось можливим ідентифікувати солончаки і райони найбільшого засолення [1, 2], однак ділянки ґрунтів із засоленням, що розвивається, не ідентифікувались [1].

Дослідження ДЗ у радіодіапазоні засолених земель з нерівномірним по глибині розподілом вологості ґрунту проводилося лише для обмеженого набору варіантів розподілу вологості, описуваного лінійними розподілами [4]. У роботі [5] нами розглядався вплив СМґР ґрунтів на їхні радіолокаційні характеристики для двох дециметрових діапазонів довжин хвиль, L- і Р- (відповідно 20 і 70 см), в умовах різноманітних варіантів розподілу вологості ґрунту по глибині, у тому числі відтворюючих, характерних для засолених посушливих земель. Для поєднання цих розрахункових даних з безпосередньою залежністю від процентного вмісту солей у ґрунті необхідно провести нижченаведені доповнення.

Основна частина. Ґрунт є складною сумішшю як мінімум чотирьох

діелектричних речовин – твердих фракцій, вільної води, зв'язаної води і повітря. Діелектричні властивості речовини, що складається із суміші двох і більш діелектриків, визначаються формулами, отриманими з різних теоретичних передумов. Нами використано емпіричну формулу, близьку до формули [6] діелектричної проникності ϵ суміші діелектриків з діелектричними проникностями ϵ_1 і ϵ_2 : $\epsilon^\alpha = \epsilon_1^\alpha + (\epsilon_2^\alpha - 1)W$, зі значенням показника ступеня α , підібраним за результатами експерименту, як це зроблено в роботі [7]:

$$\epsilon^\alpha(z) = 1 + (\rho_p/\rho_0) (\epsilon_p^\alpha - 1) + W^\beta(z) (\epsilon_w^\alpha - 1), \quad (1)$$

де ϵ_w – комплексна діелектрична проникність води; параметр α приймається рівним 0,65; $\beta = 1,09 - 0,11 P + 0,18 C$, де P і C є частка піщаної і глинистої фракції ґрунту відповідно; ρ_0 – щільність твердих часток ґрунту; ρ_p – щільність ґрунту; ϵ_p – діелектрична проникність сухого ґрунту; $W(z)$ – залежність об'ємної вологості ґрунту від глибини.

Облік впливу зв'язаної води інкорпорований в емпіричну формулу (1), тому що кількість зв'язаної води в ґрунті взаємозалежна із часткою піщаних і глинистих фракцій. При обчисленнях уся вода в ґрунті у випадку вологості $W \geq 0,02 \text{ см}^3/\text{см}^3$ вважалася вільною в змісті рівності її СМГР значенням для вільної води. Характеристики зразків ґрунтів, використовуваних у модельних розрахунках (суглинки, засолені галитом NaCl), описані в роботі [7]. Зокрема, наведені нижче результати розрахунків отримані при використанні моделі зі значеннями: частка глинистої фракції $C = 0,19$; частка піщаної фракції $P = 0,17$; щільність твердих часток ґрунту $\rho_0 = 2,66 \text{ г}/\text{см}^3$; щільність ґрунту $\rho_p = 1,25 \text{ г}/\text{см}^3$. Дійсна частина діелектричної проникності $\epsilon_p = \epsilon'_p + i \epsilon''_p$ сухого ґрунту обчислювалась за емпіричною формулою [7]: $\epsilon'_p = (1,01 + 0,44\rho_0)^2 - 0,062$. Мнима частина діелектричної проникності сухого ґрунту ϵ''_p приймалася рівною 0,01, що дозволяє досягти задовільної відповідності при використанні формули (1) з даними про ϵ''_p натуральних ґрунтів посушливих регіонів (ϵ''_p легкосуглинного ґрунту з нульовою об'ємною вологістю на довжині хвилі 70 см дорівнює 0,03, з об'ємною вологістю $10 \text{ см}^3/\text{см}^3 - 0,21$ [8]). При перенасиченні розчину деяка частина солі випадає у вигляді твердої фракції. Діелектрична проникність вільної води ϵ_w у залежності від її температури і солоності обчислювалась за емпіричною моделлю, зконструйованою за допомогою підстановки у вираз дисперсійної моделі Дебая-Хюккеля [9] емпіричних залежностей параметрів для розчину солі NaCl, відповідно до [10].

Для опису залежностей розподілу вологи в ґрунті застосовувалася аналітична функція $W(z)$: $W(z) = b_1 + b_2 \exp(-az) + b_3 \exp(-2az)$. Варію-

вання параметрів b_1, b_2, b_3 дозволяє описати велику кількість профілів вологості ґрунту, у тому числі ті, що мають екстремум (максимум чи мінімум) вологості на будь-якій глибині під поверхнею, що зростають і убувають.

Прийняте нами наближення рівномірного розподілу Z по глибині в межах глибини проникнення випромінювання для засолених ґрунтів призводить до зміни ступеня мінералізації ґрунтового розчину по глибині у випадку нерівномірного розподілу вологості. Для одержання значень комплексного коефіцієнта відбиття від ґрунтів була використана обчислювальна програма, що виконує пошаровий розрахунок коефіцієнта відбиття від мілкошаруватого півпростору, що є еквівалентною заміною середовища (ґрунту) зі складним профілем діелектричної проникності по глибині, і потім обчислює відповідні перетини зворотного розсіювання.

Задля прикладу на рис.1 показано кілька характерних випадків залежностей контрастів інтенсивності зворотного розсіювання K від засоленості Z для довжини хвилі $\lambda = 69$ см (жирні криві 1 – 2 відповідають однорідному розподілу об'ємної вологості W із глибиною: 1 – $W = 0.02$ см³/см³, 2 – $W = 0.4$ см³/см³; криві 3 – 4 відповідають розподілу вологості, що зростає з глибиною до деякого значення насичення, причому параметри $b_1 = 0.4, b_2 = -0.48, b_3 = 0.1$, для кривої 3 – $H_E = 9$ см, для кривої 4 – $H_E = 45$ см; кут падіння випромінювання 30° ; параметри шорсткості поверхні gms такі: $h = 0.8$ см, радіус кореляції $l_c = 5$ см, горизонтальна поляризація).

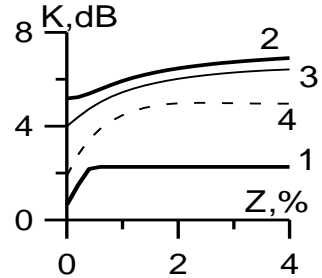


Рис. 1. Характерні випадки залежності K від Z

Поверхню ґрунту описано як випадково шорсткувату із гаусовою функцією кореляції висот неодномірностей. Радіус кореляції l_c та середньоквадратичні висоти неодномірностей h приймалися в межах, що спостерігаються в натурних експериментах, які для довжини хвилі $\lambda = 69$ см (Р-діапазон) задовольняють умовам застосовності модифікованого методу малих збурень [11]. Результати теоретичних розрахунків наведено у вигляді кутової залежності величини контрастів K від кута падіння випромінювання

$$K = 10 \lg(\sigma_w/\sigma_0),$$

де σ_w – перетин зворотного розсіювання вологого ґрунту; σ_0 – перетин зворотного розсіювання сухого ґрунту з такими ж параметрами шорсткості поверхні на тій же довжині хвилі λ . Чисельні експерименти про-

водилися для випадку засоленості солями NaCl, температура ґрунту 14°C. Жирними лініями показані випадки однорідного розподілу вологості з глибиною. Тонкі лінії представляють випадки реалістичного розподілу ґрунтової вологи з глибиною. Як припущення для розрахунків нами був прийнятий звичайний для практики випадок, коли глибина залягання шару ґрунтових вод істотно більше глибини проникнення електромагнітних хвиль у породу для даної довжини хвилі випромінювання. Починаючи з деякої глибини «насичення» під поверхнею H_E , такий, що

$$|(W(H_E) - W_E)/W_E| \leq 0.03 \text{ см}^3/\text{см}^3,$$

величина об'ємної вологості ґрунту наближається до рівноважного значення W_E .

Привертають увагу результати чисельного моделювання залежностей $K(Z)$ у Р-діапазоні для різних сценаріїв підповерхневого розподілу вологості, що у загальному випадку можна представити як зростання вологості з глибиною від малого значення на поверхні ґрунту. Така ситуація є часто реалізованою в умовах посушливого клімату засоленних регіонів. Можна спостерігати нелінійне зростання радіовідгуку від поверхні засоленних ґрунтів, особливо помітне у випадках великого градієнта вологості. Величина контрастів зворотного розсіювання для різних розрахункових випадків розподілу вологості з глибиною коливається, полягаючи в межах 2 – 3,5 дБ. Видно, що нерівномірний розподіл із глибиною вологості ґрунту привносить помітні зміни у вид залежності. У межах варіацій аж до 4% (сильне засолення) можна спостерігати як насичення зростання зворотнього розсіювання з засоленістю (крива 4), так і зростання з більш-менш однаковою чутливістю до засоленості ґрунтів Z у межах цього діапазону засолення.

Висновки. Розглянуто деякі аспекти впливу засоленості ґрунтів на їхні радіолокаційні характеристики в дециметровому діапазоні довжин хвиль (Р-діапазон). Для довгохвильового Р-діапазону розрахунки показують ефект збільшення інтенсивності зворотного розсіювання при зростанні засолення, залежний від змісту вологи в ґрунті. Для майже сухих ґрунтів, в яких вологість не зростає з глибиною, цей вплив дуже малий, однак такі випадки не є характерними для посушливих районів. Вплив нерівномірного розподілу вологості в ґрунті з глибиною в звичайних природних умовах, згідно з розрахунковими даними, позначається в збільшенні цього ефекту. Для розподілів вологості, подібних з описаними в літературі за натурними даними для засоленних регіонів, цей ефект укладений у межах 2,5 – 3,5 дБ. Це може виявитись корисним задля цілей дистанційного розвідування засоленних ґрунтів при застосуванні достат-

ньо чутливих засобів активного дистанційного зондування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Chaturvedi L., Carver K.R., Harlan J.C., Hancock G.D., Small F.V., Dalstead K.T. *Multispectral remote sensing of saline seeps*// IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 1983. – GE-21, № 3. – P. 239 – 251.
2. Metternicht G.I. *Fuzzy supervised classification of JERS-1 SAR data for soil salinity studies*//IGARSS'97. 1997 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Remote Sensing – A Scientific Vision for Sustainable Development (Cat. No. 97CH36042), Singapore, 3 – 8 Aug. 1997. – New York, USA: IEEE. – 1997. – 1. – P. 338 – 340.
3. Реутов Е.А., Шутко А.М. *Теоретические исследования СВЧ-излучения однородно увлажненных засоленных почв*// Исслед. Земли из космоса. – 1990. – № 3. – С. 73 – 81.
4. Реутов Е.А., Шутко А.М. *Экспериментальные исследования СВЧ-излучения однородно увлажненных засоленных почв*// Исследование Земли из космоса. – 1990. – № 4. – С. 78 – 84.
5. Горишня Ю.В. *Моделирование влияния засоленности влажных почв на их радиолокационные характеристики в дециметровом диапазоне длин волн* // Радиофизика и электроника. – 2001. – 6, № 1. – С. 84 – 92.
6. Богородицкий Н.П., Волокобинский Ю.М., Воробьев А.А., Тареев Б.М. *Теория диэлектриков*. – М.-Л.: Энергия. – 1965. – 380 с.
7. Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-Rayes M.A. *Microwave dielectric behavior of wet soil – Part II: Dielectric mixing models* // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1985. – GE-23, № 1. – P. 35 – 46.
8. Sternberg B.K., Levyskaya T.M. *Electrical parameters of soils in the frequency range from 1 kHz to 1 GHz, using lumped-circuit methods*// Radio Science. – 2001. – 36, № 4. – P. 709–719.
9. Переслегин С.В. *О соотношении между тепловыми и радиояркими контрастами морской поверхности*// Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1967. – 3, № 1. – С. 47 – 57.
10. Collie C.H., Hasted I.B., Ritson D.M. *Dielectric properties of H₂O and D₂O* // Proc. Phys. – 1948. – 60, № 338. – P. 207 – 216.
11. Timchenko A.I., Gorishnya Y.V. *Soil moisture profile determination using remote sensing techniques*// IGARSS'97. – New York, NY, USA: IEEE. – 1997. – 3. – P. 1105 – 1107.

Надійшла 14.10.2003

ГОРИШНЯ Юлія Вікторівна, інженер ІРЕ НАНУ. В 1993 році закінчила Харківський національний університет. Область наукових інтересів – відбивні характеристики природних об'єктів в НВЧ діапазоні.

