

В.Р. ЛЮБЧИК, В.О. РИБІЙ

Хмельницький національний університет, Хмельницький, Україна

А.В. КЛЕПІКОВСЬКИЙ

Буковинський державний медичний університет, Чернівці, Україна

МЕТОД УТОЧНЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПІДПОВЕРХНЕВИХ СЕРЕДОВИЩ

Запропоновано метод уточнення результату вимірювання глибини підповерхневих об'єктів, який полягає у послідовному знаходженні діелектричної проникності та коефіцієнтів згасання кожного підповерхневого шару, що дозволяє знаходити швидкості поширення радіохвиль у кожному шарі та розраховувати вірні фазові зсуви відбитих сигналів. Також запропоновано використовувати сітку частот із нерівномірним кроком, що дозволяє забезпечити рівномірний приріст фазових зсувів через значну частотну залежність відносної діелектричної проникності.

Ключові слова: фазові методи, підповерхнева радіолокація, діелектрична проникність, електромагнітна хвиля.

V.R. LIUBCHYK, V.O. RYBIY

Khmelnitsky National University, Ukraine

A.V. KLEPIKOVSKII

Bukovina State Medical University, Ukraine

METHOD SPECIFICATION RANGE OF OBJECTS WITH REGARD TO THE ELECTRICAL PROPERTIES OF SUBSURFACE ENVIRONMENTS

Abstract - The method of clarifying the measurement result subsurface depth of objects that is consistent finding permittivity and attenuation coefficients of each subsurface layer that allows finding the speed of propagation of radio waves in each layer and calculating true phase shift of the reflected signals. Also suggested to use a grid frequency of uneven step that ensures uniform growth phase shifts due to significant frequency dependence of relative permittivity.

The influence of the frequency dependence of relative permittivity raid on the phase shift of the reflected harmonic signal from a single object. It was established that with increasing frequency, phase shift increases nonlinear dependence.

A frequency probe signal change by inversely proportional dependence to dependence of relative permittivity subsurface environments. This makes it possible to provide uniform growth raid harmonic phase shift probing signal reflected from one object and provide unambiguous solving the equations for finding depth of objects.

Keywords: phase methods, subsurface radar, dielectric constant, electromagnetic wave.

Вступ

При застосуванні радіолокаційних досліджень необхідно враховувати загасання, швидкості поширення радіовипромінювання, частотну дисперсію та інші параметри у різних середовищах: ґрунті, піску, суглинку, воді, повітрі, льоді, конструкційних матеріалах, середовищах з різною вологістю тощо [1-4].

Питоме загасання, яке визначає глибинність зондування, та швидкість поширення електромагнітних хвиль в середовищі визначаються її електричними властивостями і є найбільш важливими параметрами, які характеризують можливість застосування методу георадіолокації. Оскільки всі речовини, окрім металів, можуть бути віднесені до діелектриків із кінцевою провідністю, то вводиться комплексна відносна діелектрична проникність. Від діелектричної та магнітної проникності залежить швидкість поширення електромагнітних хвиль в діелектриках. Для більшості гірських порід значення магнітної проникності приблизно становить 1 і не залежить від частоти. Поведінка речовини під дією прикладеного змінного електромагнітного поля, швидкість її реакції на прикладене поле і, відповідно, необхідний для завершення цієї реакції (поворот атомів, орієнтування молекул, упорядкування руху часток і т. д.) відрізок часу τ визначають залежність діелектричної проникності від частоти. При цьому, особливе значення мають частоти, коли $\omega_{кр} = 2\pi f_{кр} \approx 1/\tau$. Поведінка кривої $\epsilon(\omega)$ у цій області суттєво змінюється. До $\omega_{кр}$ середовище встигає реагувати на прикладене поле і значення діелектричної проникності відносно високі, а для частот вище $\omega_{кр}$ діелектрична проникність різко зменшується – середовище не встигає реагувати на прикладене електромагнітне поле [4].

Основна частина

Завдання підвищення точності вимірювання дальності до границь розділення підповерхневих шарів пропонується вирішити шляхом врахування їх електрофізичних властивостей. Для цього підповерхнє середовище зондується по вертикальній осі сигналами з лінійно-частотної модуляцією із покроковою зміною частоти у вузькому діапазоні частот. Схема зондування наведена на рис. 1. Кількість частот повинна бути в два рази більшою за кількість границь розділення підповерхневих шарів. Проводиться вимірювання фазових зсувів та амплітуд сумарних сигналів відбитих від усіх границь розділення підповерхневих шарів. За допомогою математичної моделі багаточастотного фазового способу [5] розраховуються дальності та коефіцієнти відбиття усіх границь розділення підповерхневих шарів за формулами багаточастотного фазового методу дальнометрії [5].

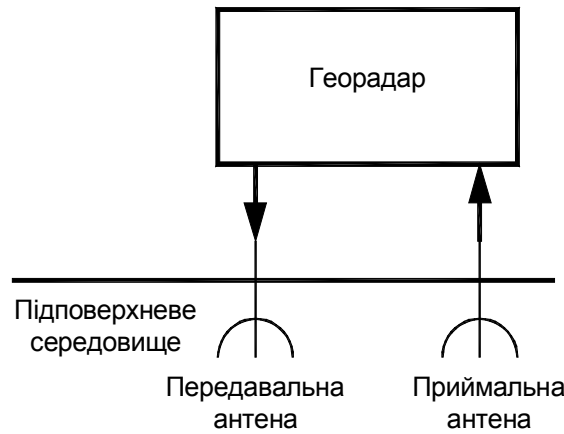


Рис. 1 Схема підповерхневого зондування

У виразах багаточастотного фазового методу дальнометрії [5] швидкість поширення електромагнітних хвиль у різних середовищах прийнята однаковою. Проте в різних середовищах вона різна. Для уточнення результатів вимірювань необхідно визначити реальні значення швидкостей поширення електромагнітних хвиль в різних підповерхневих середовищах. Для цього виконуються наступні вимірювання та обчислення.

Для визначення швидкості поширення електромагнітної хвилі у верхньому шарі, проводиться зондування шару по горизонтальній осі між двома точками розташованими на заданій відстані $l_{оп}$. Схема зондування наведена на рис. 2.

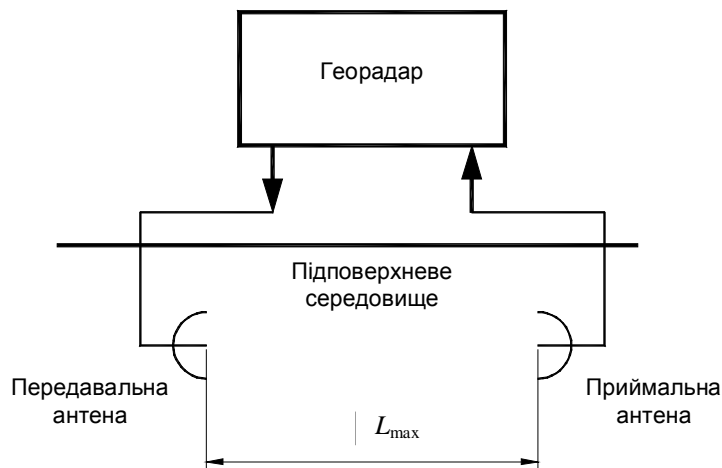


Рис. 2 Схема вимірювання швидкості поширення електромагнітної хвилі в першому шарі

В результаті вимірювання фазового зсуву $j_{вим}$ між зондуючим гармонічним сигналом на частоті $f_{оп}$ та прийнятим сигналом, можна розрахувати значення швидкості поширення електромагнітної хвилі в першому підповерхневому шарі:

$$v_1 = \frac{2p \cdot l_{оп} \cdot f_{оп}}{j_{вим}} \quad (1)$$

Використовуючи значення швидкості поширення радіохвилі в першому підповерхневому шарі, розраховується значення дійсної частини діелектричної проникності:

$$\text{Re } \epsilon_1 = \epsilon'_1 = \frac{c}{v_1} \quad (2)$$

Вимірюючи амплітуду сигналу що прийшов на прийомну антену $A_{прий}$, та знаючи амплітуду сигналу, що випромінюється передавальною антеною $A_{вип}$, розраховується значення питомого згасання в першому підповерхневому шарі, за виразом:

$$a_1 = \frac{1}{l_{\text{оп}}} \cdot \ln \frac{A_{\text{прм}}}{A_{\text{вип}}} \quad (3)$$

Розрахунок дальності до границі розділення першого і другого шару проводимо за виразом:

$$l_{1y} = \frac{j_1 v_1}{4pf} \quad (4)$$

В цей вираз підставляємо значення швидкості поширення радіохвилі яка розрахована відповідно до виразу (1).

Використовуючи значення питомого згасання a_1 та розрахованої дальності l_{1y} , знаходиться значення амплітуди сигналу, що прийшов до границі розділення першого та другого підповерхневих шарів за виразом:

$$A_{\text{вип21}} = A_{\text{вип}} e^{-a_1 l_{\text{оп}}} \quad (5)$$

Наступним кроком є розрахунок амплітуди сигналу що відбитий від границі розділення першого та другого підповерхневих шарів використовуючи значення амплітуди сигналу відбитого від першої границі A_1 , що прийшов до прийомної антени, за виразом:

$$A_{\text{прм21}} = \frac{A_1}{e^{-a_1 l_{\text{оп}}}} \quad (6)$$

За отриманими значеннями розраховується коефіцієнт відбиття від першої границі розділення двох середовищ:

$$K_{\text{від21}} = \frac{A_{\text{прм21}}}{A_{\text{вип21}}} \quad (7)$$

Використовуючи значення коефіцієнту відбиття від першої границі та діелектричної проникності першого шару, розраховується дійсна частина діелектричної проникності другого шару за виразом:

$$e'_2 = \frac{e'_1 \cdot (K_{\text{від21}} - 1)^2}{(K_{\text{від21}} + 1)^2} \quad (8)$$

Використовуючи значення дійсної частини діелектричної проникності другого шару, розраховується швидкість поширення другого шару:

$$v_2 = \frac{c}{e'_2} \quad (9)$$

Розрахунок глибини до границі розділення другого і третього шарів проводиться за виразом:

$$l_2 = l_1 + \frac{(j_2 - j_1)v_2}{4pf} \quad (10)$$

Розраховується значення коефіцієнта проходження першої границі за виразом:

$$K_{\text{пр21}} = 1 - K_{\text{від21}} \quad (11)$$

Використовуючи табличні дані [6] за значенням дійсної частини діелектричної проникності, визначається матеріал другого шару та вибирається значення провідності шару S_2 . Використовуючи значення провідності, розраховується значення згасання в другому шарі:

$$a_2 = \frac{2pf}{c} \cdot \sqrt{\frac{e'_2}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{S_2}{2pfe_0 e_2} \right)^2} - 1 \right)} \quad (12)$$

За виразом:

$$K_{\text{від32}} = \frac{a_2}{a} \cdot \frac{e^{2(a_1 l_1 + a_2 (l_2 - l_1))}}{(1 - K_{\text{від21}})^2} \quad (13)$$

розраховується значення коефіцієнта відбиття від другої границі розділення підповерхневих шарів.

Продовжуючи аналогічні міркування, для знаходження дійсної частини діелектричної проникності S -го шару використовується вираз:

$$e'_s = \frac{e'_{s-1} \cdot (K_{\text{відс,с-1}} - 1)^2}{(K_{\text{відс,с-1}} + 1)^2} \quad (14)$$

де коефіцієнт відбиття від $S - 1$ -ї границі знаходиться за виразом:

$$K_{\text{відс},s-1} = \frac{a_s}{a} \cdot \frac{e^{2(a_1 l_1 + a_2(l_2 - l_1) + a_3(l_3 - l_2) + \dots + a_s(l_s - l_{s-1}))}}{\left((1 - k_1) \cdot (1 - k_2) \cdot \dots \cdot (1 - K_{\text{відс},1,s-2}) \right)^2} \quad (15)$$

Швидкість поширення радіохвилі s -го шару:

$$v_s = \frac{c}{e'_s} \quad (16)$$

Дальність $s - 1$ -ї границі:

$$l_s = l_{s-1} + \frac{(j_s - j_{s-1})v_s}{4\pi f} \quad (17)$$

Сигнали, які відбилися від попередніх границь розділення двох середовищ при зворотному проходженні відбитого сигналу, можна не враховувати виходячи із наступних міркувань. Як показали дослідження у попередньому розділі, коефіцієнти відбиття відрізняються від коефіцієнтів проходження приблизно на один порядок і повторно відбиті сигнали, враховуючи згасання сигналів, не будуть створювати якого-небудь помітного впливу на сумарний сигнал.

Проте, якщо розглянути задачу георадіолокації в загальному, необхідно відмітити, що знаходження координат локалізації підповерхневих об'єктів необхідно проводити не по двох координатах, а по трьох координатах, оскільки будь-яке тверде тіло являє собою тривимірну фігуру. Для встановлення загальних співвідношень потрібно сформулювати та розв'язати двовимірну задачу георадіолокації, а потім узагальнити розв'язок для тривимірної задачі.

При проведенні вимірювань глибин об'єктів необхідно враховувати не лише те що кожен шар ґрунту має різні значення діелектричної проникності та коефіцієнт згасання, а і те що діелектрична проникність має залежність від частоти. Причому, ці залежності від частоти у кожного типу ґрунтів різні. Тому потрібно провести уточнення математичних залежностей, що дозволить врахувати залежність діелектричної проникності від частоти і підвисити точність визначення глибини та характеристик ґрунту.

Відомо що для ґрунтів та інших матеріалів відносні діелектрична проникність має яскраво виражену частотну залежність [7-9]. Отже:

$$e_{\text{від.}} = e(f) \quad (18)$$

Тому, як швидкість поширення радіохвиль у різних середовищах залежить від діелектричної проникності, то із врахуванням функціональної залежності діелектричної проникності від частоти можна записати:

$$v_{\text{сеп.}} = \frac{c}{e(f)} \quad (19)$$

Отриманий вираз показує що швидкість поширення електромагнітної хвилі для одного і того ж середовища на різних частотах різна. Внаслідок цього із лінійним збільшенням частоти фазовий набіг сигналу відбитого від одного об'єкту буде нелінійним:

$$j_i = 4\pi l \frac{e(f)}{c} f_i \quad (20)$$

Для розв'язання системи рівнянь потрібно щоб був забезпечений лінійний приріст фазового зсуву із зростанням частоти зондуючого сигналу. Тому, при синтезуванні зондуючих сигналів потрібно узгодити їх частоти із лінійністю наростання фазового зсуву гармонічних сигналів відбитих від кожного об'єкту. Таким чином:

$$f_i = \frac{j_i}{4\pi l} \frac{c}{e(f_i)} \quad (21)$$

Під час запису системи рівнянь багаточастотного фазового методу дальнометрії [5] коефіцієнти X_i біля фазових зсувів сигналів відбитих від кожного об'єкту від 1 до n представляють собою відношення значення фазового зсуву на поточній частоті до фазового зсуву на першій:

$$x_i = \frac{j_i}{j_1} = \frac{4\pi l \frac{e(f_i)}{c} f_i}{4\pi l \frac{e(f_1)}{c} f_1} = \frac{e(f_i) f_i}{e(f_1) f_1} \quad (22)$$

В такому випадку, для забезпечення лінійного приросту фазових зсувів сигналів відбитих від кожного об'єкту у системах рівнянь багаточастотного фазового методу дальнометрії [5] необхідно забезпечити приріст частоти відповідно відношенню:

$$\frac{f_i}{f_1} = x_i \frac{e(f_1)}{e(f_i)} \quad (23)$$

Узагальнююча дисперсійна залежність для діелектриків запропонована зокрема П. Дебаєм $\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + (\epsilon_0 - \epsilon_\infty)/(1 - j\omega t)$, де ϵ_0 - значення діелектричної проникності на частотах набагато менших $\omega_{кр}$, а ϵ_∞ - на частотах багато великих $\omega_{кр}$. Так, $\epsilon'(\omega) = \epsilon_\infty + (\epsilon_0 - \epsilon_\infty)/(1 + \omega^2 t^2)$, а $\epsilon''(\omega) = \omega t (\epsilon_0 - \epsilon_\infty)/(1 + \omega^2 t^2)$. Таким чином, $\epsilon'(\omega)$ монотонно зменшується, а $\epsilon''(\omega)$ має максимум при $\omega = 1/t$ [7-9].

Таким чином, виходячи із виразу (2.76) та теоретичних і експериментальних залежностей відносної діелектричної проникності від частоти, частота зондуючих сигналів повинна зростати в початковій області частот з невеликим кроком. Після перегину характеристики відносної діелектричної проникності, крок по частоті буде зростати із зростанням частоти, обернено пропорційно спаданню значень відносної діелектричної проникності. Після критичної частоти, яка відповідає другому перегину характеристики, крок по частоті повинен бути постійним і більшим за початковий крок. Причому, залежність відносної діелектричної проникності від частоти [4] можна апроксимувати кусково-лінійною функцією. Тоді сітку частот можна представити спектральною діаграмою зондуючого сигналу (рис. 3).

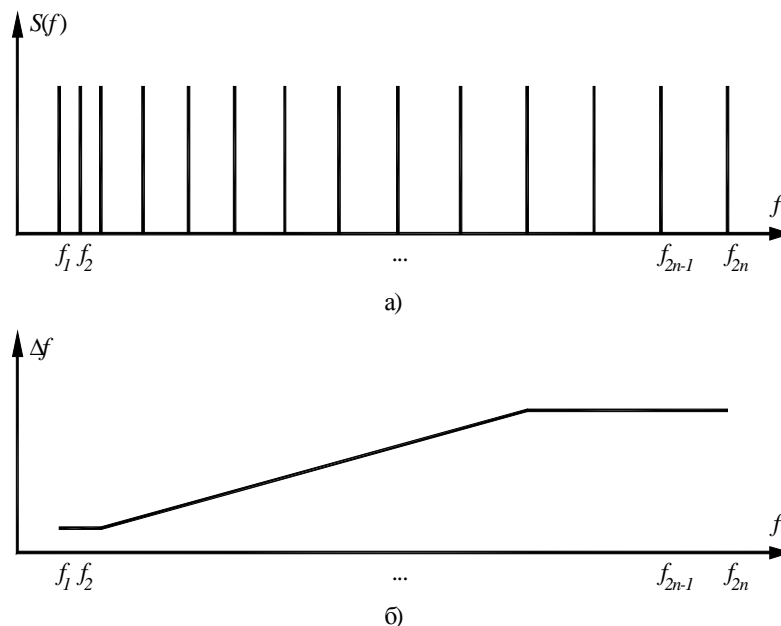


Рис. 3 Спектральна діаграма зондуючого сигналу із врахуванням нелінійної зміни діелектричної проникності від частоти:
а) спектральна діаграма;
б) залежність приросту по частоті від частоти.

Залежності діелектричної проникності від частоти для різних типів ґрунтів відрізняються [4]. Тому для різного типу ґрунту та матеріалу необхідно використовувати різні залежності. Проте, в більшості випадків вони подібні між собою і можуть бути усередненими. Як виключення, необхідно враховувати що для води та піску значення відносної діелектричної проникності в широкому діапазоні частот не змінюються. Тому при виявленні шарів піску або води, чи матеріалів із подібними властивостями, потрібно послідовно задавати зондуючі гармонічні сигнали із різними сітками частот для однозначного вимірювання глибин до одних шарів, потім змінювати сітку частот для розв'язання задачі знаходження глибин інших шарів.

Висновок

Аналіз проходження радіохвиль в підповерхневих середовищах із різними електрофізичними властивостями, дозволив розробити математичну модель уточнення результатів вимірювання дальності об'єктів. Модель полягає у послідовному розрахунку дальності об'єктів, використовуючи значення швидкості розрахованих виходячи із електричних властивостей підповерхневого шару. Для знаходження електричних властивостей підповерхневого шару, знаходиться коефіцієнт відбиття на границі розділення двох шарів, за отриманими значеннями знаходяться діелектрична проникність матеріалу шару, значення якої використовується для розрахунку швидкості поширення радіохвилі в поточному шарі.

Досліджено вплив частотної залежності відносної діелектричної проникності на набіг фазового зсуву гармонічного сигналу відбитого від одного об'єкту. Встановлено, що із зростанням частоти, фазовий зсув зростає за нелінійною залежністю.

Запропоновано частоту зондуючого сигналу змінювати за обернено пропорційною залежністю до залежності відносної діелектричної проникності підповерхневих середовищ. Це дає змогу забезпечити рівномірний приріст набігу фазового зсуву гармонічного зондуючого сигналу відбитого від одного об'єкту та забезпечити однозначне розв'язання системи рівнянь для пошуку глибин залягання об'єктів.

Література

1. Дручинин С. В. Расчет характеристик щелевой антенны георадиолокатора, находящейся вблизи поверхности грунта / С. В. Дручинин, Ю. И. Лещанский // Распространение и дифракция электромагнитных волн : Междувед. сб. – М. : МФТИ, 1993. – С. 130-143.
2. Справочник по радиолокации / [ред. М. Скольник; пер. с англ. Под ред. К. Н. Трофимова]. – Т. 1. – М. : Сов. радио, 1976. – 456 с.
3. Дебай П. Теория электрических свойств молекул / П. Дебай, Г. Закк [под ред. Л. Э. Гуревича]. – М.–Л. : Объединенное научно-техническое издательство, 1936. – 144 с.
4. Druchinin S. V. Models for calculation of dielectric constant of moist sandy clayey soils in wide range of frequencies / S. V. Druchinin // Intl. Conference in Subsurface Sensing Techn. and Applications (SSTA 2000). – Proceedings. San Diego. California. USA, 30 July – 4 Aug. 2000.
5. Любчик В.Р. Розробка аналітичного фазового методу вимірювання відстаней до трьох об'єктів/ В.Р. Любчик, О.М. Килимник, Ю.В. Сенчишина, Г.Б. Параска // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 2. – С. 142–147.
6. Владов М.Л. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований / М.Л. Владов, В.П. Золотарев, А.В. Старовойтов. – М. : ГСД Продакшен, 1997. – 66 с.
7. Toshio Fukuda, Yasuhisa Hasegawa, Yasuhiro Kawai, Shinsuke Sato, Zakarya Zyada, Takayuuki Matsuno “GPR signal processing with geography adaptive scanning using vector radar for antipersonnel landmine detection” International journal of advanced robotic systems, 2007, Vol. 4, No. 2, pp. 199–206.
8. John H. Bradford Ground-penetrating radar theory and application of thin-bed offset-dependent reflectivity. John H. Bradford, Jacob C. Deeds. Geophysics, VOL. 71, № 3. May–June 2006. pp. K47–K57.
9. Kazunori Takahashi Basics and Application of Ground-Penetrating Radar as a Tool for Monitoring Irrigation Process/ Kazunori Takahashi, Jan Igel, Holger Preetz, Seiichiro Kuroda Edited by Dr. Manish Kumar. Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. March, 2012. pp. 155–180.

References

1. Druchynyn S. V. Raschet kharakterystyk shchelevooy anteny georadyolokatora, nakhodyashcheyasya vblzyz poverkhnosty hrunta / S. V. Druchynyn, Yu. Y. Leshchansky // Rasprostraneniye y dyfraktsyya elektromagnitnykh voln : Mezhdved. sb. – М. : MFTY, 1993. – С. 130-143.
2. Spravochnik po radyolokatsyy / [red. M. Skol'nyk; per. s anhl. Pod red. K. N. Trofymova]. – Т. 1. – М. : Sov. radyo, 1976. – 456 s.
3. Debay P. Teoryya elektricheskyykh svoystv molekul / P. Debay, H. Zakk [pod red. L. Э. Hurevycha]. – М.–Л. : Ob'yedynennoe nauchno-tekhnicheskoe yzdatel'stvo, 1936. – 144 s.
4. Druchinin S. V. Models for calculation of dielectric constant of moist sandy clayey soils in wide range of frequencies / S. V. Druchinin // Intl. Conference in Subsurface Sensing Techn. and Applications (SSTA 2000). – Proceedings. San Diego. California. USA, 30 July – 4 Aug. 2000.
5. Lyubchik V.R. Rozrobka analitychnoho fazovoho metodu vymiryuvannya vidstaney do tr'okh ob'yektiv/ V.R. Lyubchik, O.M. Kylymnyk, Yu.V. Senchyshyna, H.B. Paraska // Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho universytetu. – 2009. – # 2. – S. 142–147.
6. Vladov M.L. Metodicheskoe rukovodstvo po provedenyu georadyolokatsyonnykh yssledovany / M.L. Vladov, V.P. Zolotarev, A.V. Starovoytov. – М. : HSD Prodakshen, 1997. – 66 s.
7. Toshio Fukuda, Yasuhisa Hasegawa, Yasuhiro Kawai, Shinsuke Sato, Zakarya Zyada, Takayuuki Matsuno “GPR signal processing with geography adaptive scanning using vector radar for antipersonnel landmine detection” International journal of advanced robotic systems, 2007, Vol. 4, No. 2, pp. 199–206.
8. John H. Bradford Ground-penetrating radar theory and application of thin-bed offset-dependent reflectivity. John H. Bradford, Jacob C. Deeds. Geophysics, VOL. 71, № 3. May–June 2006. pp. K47–K57.
9. Kazunori Takahashi Basics and Application of Ground-Penetrating Radar as a Tool for Monitoring Irrigation Process/ Kazunori Takahashi, Jan Igel, Holger Preetz, Seiichiro Kuroda Edited by Dr. Manish Kumar. Problems, Perspectives and Challenges of Agricultural Water Management. March, 2012. pp. 155–180.

Рецензія/Peer review : 26.8.2015 р.

Надрукована/Printed : 31.8.2015 р.

Стаття рецензована редакційною колегією