

## РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗАСОЛЕННЫХ ВЛАЖНЫХ ПОЧВ В ДЕЦИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Ю.В. Горишняя, к.ф.-м.н. А.А. Можаяев, Н.Д. Бережная  
(представил д.т.н., проф. А.И. Стрелков)

*Проведено численное моделирование влияния засоленности влажных почв на их радиолокационные характеристики в L- (20 см) и P- (70 см) диапазонах длин волн для круговой и линейной поляризации. Показано, что на обнаружение засоленных почв при зондировании в L-диапазоне существенное влияние оказывает вертикальный профиль распределения влаги в почве. Выявлены различия обратного рассеяния от засоленных влажных почв в L- и P-диапазонах и рассмотрены их возможности для оценки засоленности почв.*

**Введение.** Дистанционное зондирование (ДЗ) Земли с авиакосмических носителей – эффективный инструмент решения проблемы экологического мониторинга засоленности опустыненных земель [1, 2]. Использование радиолокационного ДЗ для анализа засоленности обусловлено зависимостью диэлектрических свойств почвы от степени минерализации почвенного раствора (СМПР). Согласно [2, 3] для целей ДЗ засоления почв наиболее подходит диапазон длин волн 40 ÷ 60 см, возможности которого для выявления засоленности земель по изменению приповерхностной структуры засоленной почвы и ее водно-воздушного режима исследованы в [4, 5]. При использовании радиолокационного ДЗ в L-диапазоне (20 см) оказывалось возможным идентифицировать солончаки и районы наибольшего засоления [1].

В то же время эксперименты [3] выявили невозможность объяснения результатов ДЗ в предположении об однородном распределении влажности почвы по глубине. Поэтому были изучены схемы радиолокационного ДЗ земель с неравномерным по глубине распределением влажности для немногих типов распределения влажности [3]. В нашей предыдущей работе [6] рассмотрено влияние засоленности почв на их радиолокационные характеристики в L- и P-диапазонах длин волн, (соответственно 20 и 70 см), при использовании одной линейной поляризации

(ГГ), для различных (в том числе характерных для засоленных засушливых земель) распределений влажности почвы по глубине. Однако при ДЗ Земли с космических носителей ввиду гиротропии ионосферы предпочтительным является использование круговой поляризации. Поэтому **целью настоящей статьи** является анализ возможностей радиолокационного ДЗ засоленных земель с учетом неравномерного распределения влажности по глубине при использовании излучения круговой поляризации в Р-диапазоне длин волн.

**1. Модель влажных почв в присутствии солей.** Диэлектрические свойства почвы (представляющей смесь как минимум четырех диэлектрических веществ – твердых фракций, свободной воды, связанной воды и воздуха) определяются выражением [7]:

$$\varepsilon^\alpha(z) = 1 + (\rho/\rho_0)(\varepsilon_p^\alpha - 1) + W^\beta(z)(\varepsilon_w^\alpha - 1), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_w$  – комплексная диэлектрическая проницаемость воды; параметр  $\alpha$  определяется по результатам эксперимента;  $\beta = 1 + 1,09 - 0,11P + 0,18C$ , где  $P$  и  $C$  – доли песчаной и глинистой фракций;  $\rho_0$  – плотность твердых частиц;  $\rho_p$  – плотность почвы;  $\varepsilon_p$  – диэлектрическая проницаемость сухой почвы;  $W(z)$  – зависимость объемной влажности почвы от глубины.

В расчетах принималось, что доля глинистой фракции  $C = 0,19$ ; доля песчаной фракции  $P = 0,17$ ; плотность твердых частиц почвы  $\rho_0 = 2,66$  г/см<sup>3</sup>; плотность почвы  $\rho_p = 1,25$  г/см<sup>3</sup>,  $\alpha = 0,65$  [7].

Действительная часть диэлектрической проницаемости сухой почвы вычислялась по эмпирической формуле [7]:

$$\varepsilon_p' = (1,01 + 0,44\rho_0)^2 - 0,062. \quad (2)$$

Мнимая часть диэлектрической проницаемости сухой почвы  $\varepsilon_p''$  принималась равной 0,1, что позволяет достичь удовлетворительного соответствия при использовании формулы (1) с данными о  $\varepsilon_p''$  натуральных почв засушливых регионов. Так,  $\varepsilon_p''$  легкосуглинистой почвы с нулевой объемной влажностью на длине волны 70 см равна 0,03, с объемной влажностью 10 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> – 0,21 [8].

**2. Основные допущения.** Диэлектрическая проницаемость свободной воды  $\varepsilon_w$  рассчитывалась по эмпирической модели [9]. Расчеты проводились для засоленности солями NaCl и температуры почвы 14 °С.

Неоднородное распределение влажности по глубине моделировалось функцией

$$W(z) = b_1 + b_2 \exp(-az) + b_3 \exp(-2az),$$

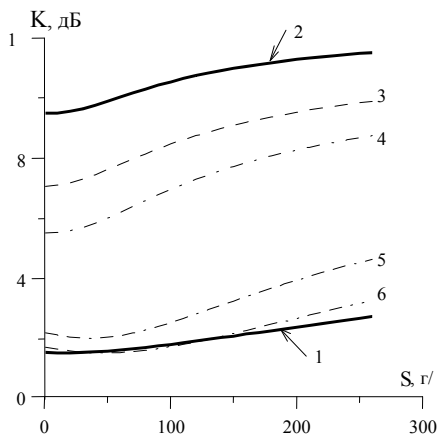
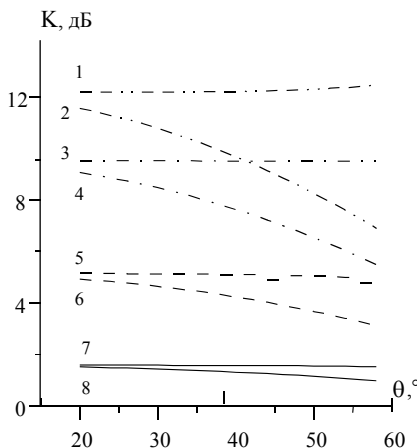
которая при варьировании параметров  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ , а позволяла описать различные профили, имеющие экстремум на любой глубине. Предварительные оценки влияния засоленности почв на их радиолокационные характеристики можно получить в простейшем случае однородного распределения влажности  $W(z) = \text{const}$ . Поверхность почвы описывалась как случайно шероховатая с гауссовой функцией корреляции высот неоднородностей.

Для расчетов принимался обычный для практики случай, когда глубина залегания слоя грунтовых вод существенно больше глубины проникновения электромагнитных волн в породу для данной длины волны излучения. Начиная с некоторой глубины «насыщения»  $Z_E$  величина объемной влажности почвы приближается к равновесному значению  $W_E$ .

В засоленных регионах наблюдается широкий разброс значений высоты неоднородностей  $h$  вплоть до экстремально выровненных поверхностей с  $h = 0,07$  см [5]. Радиус корреляции  $l_c$  лежит в пределах от 3 см [9] до 20 см [10], с наиболее часто наблюдающимся  $l_c = 8 \div 10$  см [11]. Для  $\lambda = 69$  см (Р-диапазон) соотношения длин волн и параметров шероховатости почвы позволяли производить вычисления в приближении метода малых возмущений для широкого диапазона углов падения излучения. На малых углах падения для  $\lambda = 21$  см вычисления производились по методу Кирхгофа.

**3. Результаты моделирования.** На рис. 1 приведены результаты расчетов зависимости от угла  $\theta$  контраста  $K = 10 \lg(\sigma_w/\sigma_0)$ , где  $\sigma_w$  и  $\sigma_0$  – сечения обратного рассеяния влажной почвы и сухой почвы с такими же параметрами шероховатостей поверхности на той же длине волны  $\lambda$ . Кривые 1, 3, 5, 7 – круговая, а кривые 2, 4, 6, 8 – НН поляризации. Кривые 1 и 2 – объемная влажность  $W = 0,4$ ,  $S = 260$  г/л; 3 и 4 –  $W = 0,4$ ,  $S = 0,738$  г/л; 5 и 6 –  $W = 0,02$ ,  $S = 260$  г/л; 7 и 8 –  $W = 0,02$ ,  $S = 0,738$  г/л. Параметры  $h = 0,8$  см,  $l_c = 3,75$  см. Видно, что влияние увеличения СМПП от 0,7 г/л (пресная вода) до 260 г/л (насыщенный раствор) для горизонтальной поляризации максимально при малых  $\theta$  и уменьшается с увеличением угла  $\theta$ . Увеличение  $K$  на углах падения  $30^\circ$  составляет от 3,5 дБ для малых влажностей до 2,5 дБ для влажности  $W = 40\%$ . При круговой поляризации эффект от возрастания СМПП приблизительно постоянен для углов падения  $30 \div 70^\circ$ , и больше, чем при горизонтальной поляризации.

На рис. 2 представлены результаты моделирования контраста  $K(S)$  в L-диапазоне при подповерхностных распределениях влажности, характерных для засушливого климата засоленных регионов, когда влажность возрастает с глубиной от малого значения на поверхности почвы.



На рис. 2 жирные кривые 1, 2 соответствуют однородному распределению объемной влажности  $W$  с глубиной  $W = 0,02$  и  $W = 0,4$  соответственно. Кривые 3 – 6 соответствуют распределению влажности, возрастающему с глубиной до насыщения; параметры  $b_1 = 0,4$ ,  $b_2 = -0,48$ ,  $b_3 = 0,1$ :  $Z_E = 4,5$  см (кривая 3),  $Z_E = 9$  см (кривая 4),  $Z_E = 45$  см (кривая 5),  $Z_E = 90$  см (кривая 6);  $\theta = 30^\circ$ , круговая поляризация,  $h = 3$  см,  $l_c = 20$  см. Видно увеличение радиототклика от поверхности засоленных почв при больших градиентах влажности. Для медленно возрастающей влажности изменение СМПР в пределах реальных значений (до 260 г/л) недостаточно для выявления районов засоления. Это можно объяснить взаимной компенсацией эффектов от увеличения мнимой и уменьшения действительной части диэлектрической проницаемости почвы на данных длинах волн излучения.

На рис. 3 показаны аналогичные зависимости для круговой поляризации (Р-диапазон). Кривые 1, 2 соответствуют однородному распределению  $W$  по глубине:  $W = 0,02$  (кривая 1) и  $W = 0,4$  (кривая 2). Кривые 3 – 6 соответствуют росту влажности с глубиной до насыщения, параметры  $b_1 = 0,4$ ,  $b_2 = -0,48$ ,  $b_3 = 0,1$ :  $Z_E = 4,5$  см (кривая 3),  $Z_E = 9$  см (кривая 4),  $Z_E = 45$  см (кривая 5),  $Z_E = 90$  см (кривая 6);  $\theta = 30^\circ$ , круговая поляризация,  $h = 7$  см,  $l_c = 60$  см.

Контрасты для различных распределений влажности изменяются в пределах 2,5 – 5 дБ. Влияние неравномерности влажности по глубине: для малых градиентов влажности (кривые 5, 6) в этом диапазоне длин волн эффект засоленности почвы можно оценить в 4 ÷ 5 дБ при изменении СМПР от 0 до 260 г/л.

**Заключение.** Рассмотрено влияние засоленности почв на их радиолокационные характеристики в двух дециметровых (L и P) диапазонах. На примере засоления поваренной солью NaCl показано, что для круговой поляризации при спутниковом ДЗ на длинных дециметровых волнах сохраняются основные особенности, найденные нами ранее в случае линейной горизонтальной поляризации. При этом абсолютная величина эффекта от СМПР на обратное рассеяние для волн круговой поляризации оказывается больше.

Нелинейность эффекта от засоления на сечение обратного рассеяния в L-диапазоне (20 см) в условиях реальных распределений влажности по глубине затрудняет использование этого диапазона для оценки засоления почв средствами активного ДЗ. Для более длинноволнового P-диапазона расчеты показали стабильное увеличение интенсивности обратного рассеяния с ростом засоления. Неравномерность распределения влажности по глубине еще больше увеличивает этот эффект. Для распределений влажности, сходных с описанными в литературе для засоленных регионов, это увеличение составляет 2,5 – 5 дБ. Показана возможность уверенного обнаружения засоленных районов при СМПР больше 100 г/л.

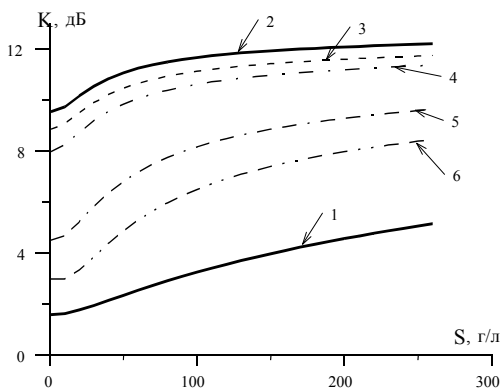


Рис.3. Зависимость контраста К от степени минерализации для  $\lambda=69$  см

## ЛИТЕРАТУРА

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. Реутов Е.А., Шутко А.М. *Теоретические исследования СВЧ-излучения однородно увлажненных засоленных почв // Исслед. Земли из космоса.* – 1990. – № 3. – С. 73 – 81.

3. Реутов Е.А., Шутко А.М. Экспериментальные исследования СВЧ-излучения однородно увлажненных засоленных почв // Исслед. Земли из космоса. – 1990. – № 4. – С. 78 – 84.
4. Бобров П.П. Исследование испарения, влажности и структуры поверхностного слоя почв дистанционными микроволновыми методами // Исслед. Земли из космоса. – 1999. – № 5. – С. 77 – 83.
5. Archer D.J., Wadge G. Modeling the backscatter response due to salt crust development // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2001. – GE-3. – № 10. – P. 2307 – 2310.
6. Горишняя Ю.В. Моделирование влияния засоленности влажных почв на их радиолокационные характеристики в дециметровом диапазоне длин волн // Радиофизика и электроника. – 2000. – 6. – № 1. – С. 84 – 92.
7. Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-Rayes M.A. Microwave dielectric behavior of wet soil - Part II: Dielectric mixing model s// IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1985. – GE-23. – № 1. – P. 35 – 46.
8. Sternberg B.K., Levytskaya T.M. Electrical parameters of soils in the frequency range from 1 kHz to 1 GHz, using lumped-circuit method // Radio Science. – 2001. – 36. – № 4. – P. 709 – 719.
9. Wegmuller U., Matzler C., Huppi R., Schanda E. Active and passive microwave signature catalog on bare soil // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1994. – GE-3. – № 3. – P. 698 – 702.
10. Wang J.R., Engman E.T., Shiue J.C., Rusek M., Steinmeier C. The SIR-B observations of microwave backscatter dependence on soil moisture surface roughness and vegetation covers // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1986. – GE-24. – № 4. – P. 510 – 516.
11. Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.T. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 1992. – GE-3. – № 2. – P. 370 – 381.

Поступила 8.04.2003

**ГОРИШНЯЯ Юлия Викторовна**, инженер Института радиофизики и электроники НАНУ. В 1993 году окончила Харьковский национальный университет. Область научных интересов – отражательные характеристики природных объектов в СВЧ диапазоне.

**МОЖАЕВ Александр Александрович**, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Харьковского военного университета. В 1979 году окончил Харьковский национальный университет. Область научных интересов – методы обработки сигналов в оптической локации и системах дистанционного зондирования Земли.

**БЕРЕЖНАЯ Наталья Дмитриевна**, инженер Института радиофизики и электроники НАНУ. В 1973 году окончила Харьковский национальный университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование природных объектов в СВЧ диапазоне.