

## Определение количества свежеснеженных осадков по радиолокационным данным ИСЗ «Січ-1»

И. А. Калмыков<sup>1</sup>, А. Г. Боев<sup>2</sup>, В. Б. Ефимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Центр радиофизического зондирования Земли НАН и НКА Украины, Харьков

<sup>2</sup>Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков

Проблема определения влажности почвы является одной из важных при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). Принципиальная возможность определения интенсивности свежеснеженных осадков (в дальнейшем дождевой влажности почвы) дистанционными радиофизическими методами и связанной с ней влажности почвы известна давно [4]. Она базируется на связи параметров зондирующего сигнала с геометрическими и физическими характеристиками земного покрова. Исследование влажности и солености в верхнем слое почвы проводится с использованием различных систем ДЗЗ, работающих во всем спектре электромагнитных волн. Применение оптических и ИК-систем, работающих в диапазоне от 0.2 до 20 мкм часто затруднено из-за метеорологических условий во время съемки [15]. Зондирование же в диапазоне сантиметровых и метровых длин волн (СВЧ-диапазон) свободно от этого недостатка. С развитием космических радиолокационных систем появилась возможность определения влажностей почвенного покрова на больших площадях. Для практики это имеет большое значение, так как они дополняют данные контактных измерений, носящих выборочный характер.

В работе предложен алгоритм определения поверхностной последождовой влажности и солености почвы, который использует специфику космического мониторинга: возможность достаточно частого обзора одного и того же района местности под различными углами падения, до и после дождей, в различные сезонные периоды, а так же то, что для практических нужд, как правило, достаточно обычной интегральной оценки влажности почвы.

Используя данные радиолокационной съемки одного из равнинных районов в течение 2—3 дней на волне  $\lambda = 3.1$  см и под двумя углами падения  $\Theta = 40^\circ$  и  $28^\circ$ , в период, когда растительность еще не развита, удалось оценить влажность и соленость почвы после выпавшего дождя.

Полученные значения этих величин согласуются с данными контактных измерений в этом районе.

### ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОЧВЫ

Радиолокационный метод определения влажностного состояния почв основан на зависимости комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) от процентного содержания влаги и солей [11]. Согласно [11] зависимость КДП почвы  $\tilde{\epsilon}$  от влажности  $W$  в сантиметровом диапазоне радиоволн имеет линейный характер:

$$\tilde{\epsilon}_d = 1 + 0.7d(\tilde{\epsilon}_w W + 1), \quad (1)$$

где  $d$  — удельный вес сухого грунта ( $\text{г/см}^3$ ),  $\tilde{\epsilon}_w$  — КДП воды с растворенными в ней солями,  $W$  — относительная влажность почвы (%). Для сухого грунта ( $W = 0$ ) величина  $\tilde{\epsilon}$  является комплексной, но значение мнимой части весьма мало по сравнению с вещественной, поэтому условно будем считать  $\tilde{\epsilon}$  сухого грунта вещественной со значениями 3...4 [12]. При наличии воды ( $W \neq 0$ ) мнимая часть  $\tilde{\epsilon}$  вырастает, что определяет эффект поглощения радиоволн. На мнимую часть КДП влияет также и наличие солей в растворе.

Зависимость КДП воды от температуры и длины зондирующей радиоволны  $\lambda$ , см определяется формулой Дебая [9]:

$$\tilde{\epsilon}_w = 5 + \frac{\epsilon_s - 5}{1 + i\lambda_s/\lambda} - i60\lambda\rho, \quad (2)$$

где

$$\epsilon_s = 88 - 0.4T + 8 \cdot 10^{-4}T^2,$$

$$\lambda_s = 1.9 - 0.0026T + 1.45e^{-0.063T}.$$

(Согласно [2] формула Дебая справедлива для значений солености до 50 ‰, что значительно превышает значения, используемые здесь).

Величина  $\rho$ , ( $\text{г/см}^3$ ) в формуле (2) связана с концентрацией растворенных в воде солей  $S$  соотношением

$$\rho = S(85 + 3.4T). \quad (3)$$

Используя обозначения диэлектрической проницаемости для сухой почвы ( $\epsilon_0 = 4$  — суглинок), и

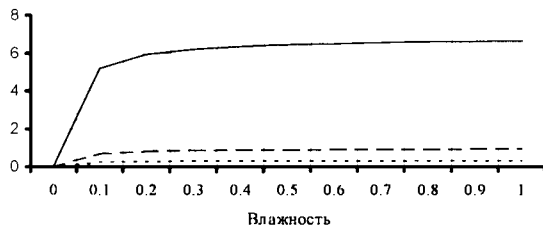


Рис. 1. Зависимость отношения мнимой части КДП к действительной от влажности при различных значениях солености для зондирующей волны  $\lambda = 3.1$  см и  $T = 15$  °C: 1 — 0.001 ‰, 2 — 0.01 ‰, 3 — 0.05 ‰

выражения (2) для  $\varepsilon_w$  КДП почвы (1) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon} &= \varepsilon - i\sigma, \\ \varepsilon &= \varepsilon_0 + (\varepsilon_0 - 1)\varepsilon_w W, \\ \sigma &= (\varepsilon_0 - 1)W\sigma_w, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon_w &= \varepsilon_0 + (\varepsilon_0 - 1) \left[ 5 + \frac{\varepsilon_s - 5}{1 + (\lambda_s/\lambda)^2} \right] W, \\ \sigma_w &= \left[ (\varepsilon_0 - 1) \frac{(\varepsilon_s - 5)}{1 + (\lambda_s/\lambda)^2} \left( \frac{\lambda_s}{\lambda} \right) + 60\lambda\rho \right] W. \end{aligned} \quad (5)$$

Атмосферные осадки представляют собой слабые растворы солей. Общая средняя соленость для типичных дождевых осадков изменяется в среднем от 10 до 30 мг/л (0.01—0.03 ‰). Крайние значения минерализации при этом составляют соответственно 3—4 и 50—60 мг/л [2]. На рис. 1 приведена зависимость отношения мнимой части КДП к действительной от влажности при максимальных и минимальных значениях солености для зондирующей волны  $\lambda = 3.1$  см и  $T = 15$  °C.

Из приведенных зависимостей следует:

1. Для типичных осадков изменение концентрации солей  $S$  приводит к значительному изменению комплексной диэлектрической проницаемости почвы (в 4—5 раз).

2. При указанных значениях солености почва обладает большой проводимостью ( $\sigma \gg \varepsilon$ ).

3. Зависимость отношения мнимой части к вещественной от влажности пропорциональна в диапазоне до 40 % и практически постоянна при большой влажности.

4. Положительные значения температуры увеличивают влияние солености. При отрицательной температуре роль ее сводится к уменьшению солености, например для  $T = -10$  °C, характерной для полярных льдов, влияние солености уменьшено по сравнению с обычными условиями почти в три раза.

## ОТРАЖЕНИЕ ОТ НЕРОВНОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Как известно [1, 2, 9, 12], на отраженный поверхностью радиолокационный сигнал влияет целый ряд факторов. Это рельеф местности, состояние растительного покрова, условия радиолокационной съемки, тип почвы, ее влажность и многое другое. Обобщенным показателем интенсивности отражения радиолокационного сигнала являются удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР)  $\sigma_0$ . В нашем случае зондирование проводилось в условиях неразвитой растительности, и основной вклад в рассеяние давал поверхностный слой почвы.

Поверхностное рассеяние радиолокационного сигнала обуславливается изменением диэлектрических свойств вещества на границе двух сред. В силу практической неизменности диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  воздуха рассеяние радиоволн почвой без растительности рассмотрим как рассеяние статистически шероховатой поверхностью.

Пространственный спектр высот суши может сильно зависеть от участка рассматриваемой поверхности, иметь максимумы на различных волновых числах. Это приводит к определенной специфике задачи рассеяния радиоволн на поверхности суши.

Возвышения поверхности разных масштабов играют различную роль в формировании рассеянного радиосигнала, поэтому в пространственном спектре высот поверхности можно выделить три интервала, границы которых зависят от волнового числа — зондирующей радиоволны  $k_E$ , ее угла падения —  $\Theta$ , высоты неровностей  $h$  и характерного масштаба  $L$  элемента разрешения:

$$1) \quad k > k_E, \quad k_f = [k_E \cos^3 \Theta / h(x)]^{1/2}, \quad (6)$$

$$2) \quad L^{-1} < k < k_f, \quad (7)$$

$$3) \quad k < L^{-1}, \quad (8)$$

Коротковолновый интервал (6) ответственен за резонансное рассеяние радиоволн, граничное значение  $k_f$  соответствует минимальному масштабу возвышения, отражение от которого можно рассматривать как от плоскости [1].

Неровности с волновыми масштабами из интервала (7) отражают радиоволны как наклонные плоскости, создавая на входе приемной антенны сигнал, усредненный по площади облученного пятна с масштабом  $L$ . При случайном распределении углов наклонов таких неровностей, расположенных на горизонтальной плоскости, на выходе приемной антенны будет наблюдаться сигнал, отраженный от плоскости под углом:

$$\gamma = \sqrt{(\overline{\nabla h})^2}, \quad (9)$$

где черта означает усреднение.

Неровности с волновыми векторами из интервала (8) также отражают как наклонные плоскости. Однако отраженный сигнал не учитывает самоусреднения сигнала по площади облученного пятна. Поэтому отражение от возвышения такого масштаба происходит как от плоскости, наклонной в месте отражения под локальным углом

$$\psi = |\bar{\nabla}h|. \quad (10)$$

Наличие возвышений (или углублений) с масштабами (10) есть специфическая деталь в задаче отражения от суши. Для типичной задачи отражения от морской поверхности характерно наличие двух интервалов (7) и (8), так как масштаб облученного пятна обычно много больше длин морских волн. Таким образом, в отличие от морской поверхности, описываемой в задаче радиолокационного рассеяния двухмасштабной моделью неровностей (интервалы (7) и (8)), поверхность суши должна описываться уже трехмасштабной моделью.

Описанная выше трехмасштабная модель неровной рассеивающей поверхности может быть сведена к более простой модифицируемой двухмасштабной модели путем перехода в новую систему координат [1].

Рассмотрим местность с рельефом, который может быть описан некоторой поверхностью  $S$ , с масштабом из интервала (8), с наложенными на нее отклонениями высоты (глубины):

$$[\delta] \ll \rho,$$

где  $\rho$  — наименьший радиус кривизны поверхности  $S$ . Такую местность в дальнейшем будем называть равнинной. Дальнейшее рассмотрение (для простоты) проведем для случая цилиндрической поверхности, образующая которой есть плоская кривая  $C$ , заданная естественным параметрическим уравнением

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0(s),$$

где  $\mathbf{r}\{x, y\}$  — радиус-вектор,  $s$  — длина дуги кривой. Введем в рассмотрение криволинейную систему координат  $s, \eta$ , связанную с кривой  $C$ . Координата  $s$  отсчитывается вдоль поверхности, координата  $\eta$  отсчитывается от нормали  $\mathbf{n}$ , восстановленной к кривой в точке  $s$ . Тогда положение любой точки  $M$ , лежащей вне кривой  $C$ , будет задаваться радиусом-вектором:

$$\mathbf{r}(s, \eta) = \mathbf{r}_0(s) + \eta\mathbf{n}.$$

Направляющие вектора новой системы координат

$$\mathbf{a}_1 = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s} = \tau \left( 1 + \frac{\eta}{R} \right),$$

$$\mathbf{a}_2 = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \eta} = \mathbf{n}$$

будут по направлению совпадать с направлением касательной  $\tau$  и нормалью  $\mathbf{n}$ . Расстояние между

двумя близкими точками криволинейной системы координат  $(s, \eta)$  равно:

$$d\sigma^2 = d\mathbf{r}^2 = \left( 1 + \frac{\eta}{R} \right)^2 ds^2 + d\eta^2.$$

Видно, что если координата  $\eta$ , характеризующая отклонение высоты рельефа по поверхности  $S$ , мала по сравнению с радиусом кривизны, т. е.

$$\eta \approx \delta \ll \rho,$$

то  $d\sigma^2 \approx ds^2 + d\eta^2$ .

По виду это есть элемент длины в декартовой системе координат. Таким образом, для равнинной местности описание задачи рассеяния может быть проведено в локальной декартовой системе координат, образованной касательной и нормалью в точке падения радиоволны.

Комплексная диэлектрическая проницаемость грунта является достаточно большой по величине, поэтому приближенные краевые условия Леонтовича [1] на поверхности грунта можно считать выполненными. Это подтверждают данные, содержащиеся в [6]. При этом матрица УЭП определяется как

$$\sigma_{P_i P_j}^{P_0} = \langle E_{P_i}^{P_0} E_{P_j}^{*P_0} \rangle R^2 / S (E_0^{P_0})^2, \quad (11)$$

где  $S$  — площадь облучаемой поверхности,  $R$  — расстояние до излучателя,  $E_0^{P_0} = (\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{P}_0)$  — напряженность электрического поля падающей волны,  $\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_i$  — векторы поляризации падающей и рассеянной волн. Скобки в (11) означают усреднение по углам наклона крупных неоднородностей с масштабами из интервала (7).

Если  $i = j$  и вектор  $\mathbf{P}_0$  параллелен  $\mathbf{P}_i$ , то принимаемое излучение обладает той же поляризацией, что и падающее. Если  $i = j$  и  $\mathbf{P}_0 \perp \mathbf{P}_i$ , то принимается излучение с поляризацией ортогональной поляризации падающей волны. Элементы матрицы УЭП при  $i \neq j$  определяют взаимную корреляцию компонентов рассеянного излучения с ортогональными поляризациями.

Окончательное выражение для матрицы УЭП имеет следующий вид [1]:

$$\sigma_{P_i P_j}^{P_0} = \left\langle \frac{2(k_E l)^2 (k_c \bar{h})^2}{\pi} \Phi_{P_i P_j}^{P_0} G(q_{\perp}) \right\rangle. \quad (12)$$

$$\Phi_{P_i P_j}^{P_0} = \left[ \left( \frac{a}{a+b} \right)^2 (\mathbf{P}_0 \mathbf{P}_i) + 2(\tilde{\varepsilon} - 1) \frac{a^2}{(b + a\tilde{\varepsilon})(a+b)} (\mathbf{n} \mathbf{P}_i)(\mathbf{n} \mathbf{P}_0) \right] \times$$

$$\times \left[ \left( \frac{a}{a+b} \right)^2 (\mathbf{P}_j \mathbf{P}_0) + 2(\tilde{\varepsilon} - 1) \frac{a^2 b}{(b + a\tilde{\varepsilon})(a+b)} (\mathbf{n} \mathbf{P}_j)(\mathbf{n} \mathbf{P}_0) \right]. \quad (13)$$

Здесь  $\bar{h}, l$  — соответственно средняя квадратичная

высота и масштаб корреляции мелких неоднородностей (интервал (6)),  $G(q_{\perp})$  — их спектральная плотность высот,  $q_{\perp}$  — проекция вектора рассеяния на плоскость, касательную к поверхности);  $a$  — проекция нормали к поверхности на направление обзора,  $b = \sqrt{\tilde{\varepsilon} - 1 + a^2}$ .

Для случая вертикальной поляризации падающей и отраженной волны, используемых в РБО ИСЗ «Сич-1»:

$$(\mathbf{P}_0 \mathbf{P}_1) = (\mathbf{P}_0 \mathbf{P}_1) = 1, \quad (\mathbf{nP}_1) = (\mathbf{nP}_1) = (\mathbf{nP}_0)$$

из (12) и (13) получаем

$$\Phi_{\perp} = \left| \left( \frac{a}{a+b} \right)^2 + \frac{2(\tilde{\varepsilon}-1)a^2b}{(b+a\tilde{\varepsilon})(a+b)} (\mathbf{nP}_0)^2 \right| \quad (14)$$

и

$$\sigma_{\perp} = \left\langle \frac{2(kl)^2(kh)^2}{\pi} \left| \left( \frac{a}{a+b} \right)^2 + \frac{2(\varepsilon-1)a^2b(\mathbf{nP}_0)^2}{(b+a\varepsilon)(a+b)} \right| G(q_{\perp}) \right\rangle. \quad (15)$$

В формулу (15) входит комплексная диэлектрическая проницаемость  $\tilde{\varepsilon}$  почвы, неизвестные величины  $a$  спектр шероховатостей  $G(q_{\perp})$ , масштабы  $l, h$ .

При известном из эксперимента значении  $\sigma_{\perp}$  уравнение (15) будет представлять собой одно уравнение со многими неизвестными, что не позволит определить из него значение диэлектрической проницаемости почвы.

С целью уменьшения произвола, рассмотрим логарифмический радиолокационный контраст (в дальнейшем — контраст):

$$\tilde{K}_{\perp}(r, \lambda, \theta) = 10 \lg \frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\perp}^{(0)}}. \quad (16)$$

Здесь и далее индексом «0» будут обозначаться величины, относящиеся к сухой почве. Аргументы  $r, \Theta, \lambda$  в левой части (16) обозначают, что контраст строится для одной и той же точки  $r$  облучаемой площадки одних и тех же углов падения  $\Theta$ , азимутального угла и длины зондирующих радиоволн. В итоге из (15) и (16) получаем:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_{\perp}(r, \lambda, \Theta) = & \\ = 10 \lg & \frac{\left\langle \left| \left( \frac{a}{a+b} \right)^2 + \frac{2(\varepsilon-1)a^2b}{(b+a\tilde{\varepsilon})} \frac{(\mathbf{P}_0 \mathbf{n})^2}{(a+bt)} \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \left| \left( \frac{a}{a+b} \right)^2 + \frac{2(\varepsilon_0-1)a^2b}{(b_0+a\tilde{\varepsilon})} \frac{(\mathbf{P}_0 \mathbf{n})^2}{(a+b_0)} \right|^2 \right\rangle}. \quad (17) \end{aligned}$$

В этой формуле выражение в числителе и знаменателе под знаком логарифма различаются лишь КДП влажной и сухой почв, что позволяет упростить вычисление контраста.

Усреднение в (17) по углам наклона крупных неоднородностей в пределах облучаемой площадки, производимое приемником, эквивалентно интегрированию  $\sigma$  по всем возможным углам с некоторой,

функцией их распределения. Поэтому усредненные выражения в (17) можно найти с помощью теоремы о среднем [1].

При этом для контраста получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \tilde{K}_{\perp}(\tilde{r}, \lambda, \Theta + \psi + \gamma) = & \\ = 10 \lg & \frac{\left| \left( \frac{a_{\gamma}}{a_{\gamma}+b} \right)^2 + 2(\tilde{\varepsilon}-1) \frac{a_{\gamma}^2 b \sin^2(\Theta + \psi + \gamma)}{(b+a\tilde{\varepsilon})(a+b)} \right|^2}{\left| \frac{a_{\gamma}}{a_{\gamma}+b_0} + 2(\tilde{\varepsilon}-1) \frac{a_{\gamma}^2 b_0 \sin^2(\Theta + \psi + \gamma)}{(b_0+a\tilde{\varepsilon}_0)(a+b_0)} \right|^2}, \quad (18) \end{aligned}$$

где  $\gamma$  — средний квадратичный угол наклона неровностей,

$$\begin{aligned} a_{\gamma} &= \cos(\Theta + \psi + \gamma), \\ b &= \sqrt{\tilde{\varepsilon} - 1 + \cos^2(\Theta + \psi + \gamma)}, \\ b_0 &= \sqrt{\varepsilon_0 - 1 + \cos^2(\Theta + \psi + \gamma)}. \end{aligned}$$

Поскольку углы наклона  $\gamma$  и  $\psi$  неизвестны и, вообще говоря, различны для различных участков местности, то локальный контраст (18) будет случайной функцией  $\gamma$  и  $\psi$ . Кроме того,  $\tilde{K}_{\perp}$  является также случайной функцией диэлектрической проницаемости сухой почвы  $\varepsilon_0$ , интенсивности осадков и солености. Учитывая, что зондируемая местность — равнинная, упростим выражение для контраста (18), оставив в выражениях для  $a_{\gamma}$  и  $b, b_0$  только угол  $\Theta$ , т. е.

$$\begin{aligned} a_{\gamma} &\approx \cos \Theta, \\ b &\approx \sqrt{\tilde{\varepsilon} - 1 + \cos^2 \Theta}, \quad b_0 \approx \sqrt{\varepsilon_0 - 1 + \cos^2 \Theta}. \end{aligned}$$

Контраст (18) является локальным и может быть использован для восстановления параметров почвы на участке с размерами, определяемом элементом разрешения РБО (0.8×1.2 км).

Вместе с тем такая детальная информация на практике нужна не всегда. Усредняя дополнительный локальный контраст на большом участке местности  $D$ :

$$\bar{K}_{\perp}(\lambda, \Theta) = \frac{1}{D} \int K(r, \lambda, \Theta) dx dy,$$

получим интегральный контраст, который будет характеризовать лишь средние параметры почвы:

$$\begin{aligned} K_{\perp}(\lambda, \Theta) = & \\ = 10 \lg & \frac{\left| \left( \frac{a}{a+b} \right)^2 + 2(\varepsilon-1) \frac{a^2 b \sin^2 \Theta}{(b+a\varepsilon)(a+b)} \right|^2}{\left| \left( \frac{a}{a+b_0} \right)^2 + 2(\varepsilon_0-1) \frac{a^2 b_0 \sin^2 \Theta}{(b_0+a\varepsilon_0)(a+b_0)} \right|^2}. \quad (19) \end{aligned}$$

Здесь все величины вычисляются для угла падения радиоволны  $\Theta$  и неких средних значений  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_0$ .

Масштаб участка усреднения может быть выбран путем рассмотрения экспериментально полученных кривых локальных ЭПР и построенных по ним кривой локального контраста.

Средний контраст (19) есть функция угла падения  $\Theta$ , длины зондирующей радиоволны  $\lambda$ , влажности  $W$ , температуры  $T$  и солености  $S$  поверхностного слоя почвы.

Общее представление о поведении контраста при изменении этих величин дают рис. 2, 3.

Видно, что изменение контраста при типичных значениях параметров  $S$ ,  $W$  составляет 3—8 дБ и слабо зависит от температуры почвы.

Для заданных из эксперимента значения  $\lambda$ ,  $\Theta$ ,  $T$  и значения контраста выражение (19) будет

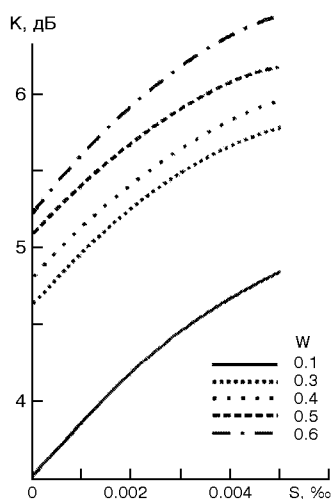


Рис. 2. Зависимость контраста  $K$  от солености  $S$  при различных значениях влажности  $W$ ;  $T = 14^\circ$ ,  $\lambda = 3.1$  см,  $\Theta = 40^\circ$

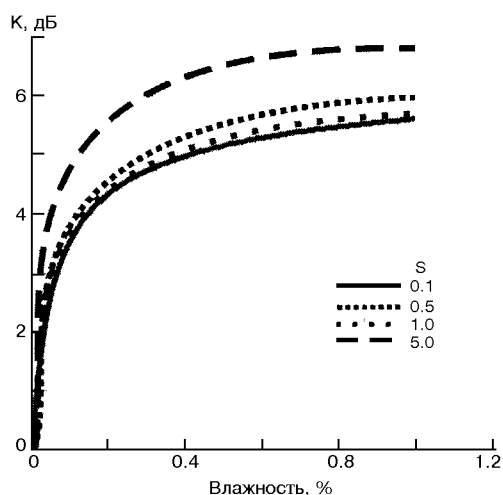


Рис. 3. Зависимость контраста  $K$  от влажности  $W$  при различных значениях солености  $S$ ;  $T = 14^\circ$ ,  $\lambda = 3.1$  см,  $\Theta = 40^\circ$

представлять собой одно уравнение для определения двух неизвестных величин — влажности и солености.

Поэтому для их определения необходимо планировать либо двухчастотное одновременное зондирование одной и той же местности, либо зондирование ее под разными углами падения. Данные ИСЗ «Сич-1» позволяют осуществить вторую возможность.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Радиолокационная съемка, данные которой используются в настоящей работе, проводилась на территории Украины в апреле — мае 1996 г.

Для уменьшения влияния рельефных неоднородностей на территории Запорожской области был выбран участок с координатами  $50^\circ$ — $46^\circ$  северной широты и  $30^\circ$ — $38^\circ$  восточной долготы. Данный участок характеризуется как равнина с практически полностью отсутствующими лесными массивами и естественной степной растительностью [6]. Согласно топографическим картам средняя высота его неровностей не превышает 100 м над уровнем моря, а неровности имеют наклон около 1 % (порядка  $0.5^\circ$ ). Почвы в основном суглинистые, местами глинистые и песчаные.

Радиолокатор бокового обзора (РБО) ИСЗ «Сич-1» имел полосу обзора около 500 км, углы падения радиоволн на поверхность Земли изменяются при этом от  $20^\circ$  до  $50^\circ$ .

Одна и та же точка местности попадала в полосу обзора каждые 8 ч, и наблюдалась в течение 10 витков спутника вокруг Земли под разными углами падения и различными азимутами. Через одну и ту же подспутниковую точку спутник пролетал раз в трое суток. Картина обзора одной и той же местности повторялась при этом полностью.

Первая радиолокационная съемка выбранного участка местности (рис. 4, а) производилась 23 апреля 1996 г. По данным контактных измерений сети Гидрометеоцентра [3] с 18 по 25 апреля 1996 г. в южной части Украины полностью отсутствовали любые проявления осадков. Среднесуточная температура в этот период составляла  $14^\circ\text{C}$ . Вторая радиолокационная съемка производилась 26 апреля 1996 г. (рис. 4, б). Режимы радиолокационной съемки и параметры спутниковой системы были идентичны во время обеих радиолокационных съемок.

По данным Гидрометеоцентра 26 апреля в первой половине дня в южной части Украины прошли кратковременные ливневые дожди. Наличие насыщенной влагонесущей облачности подтвердили данные оптической спутниковой съемки, проведенной

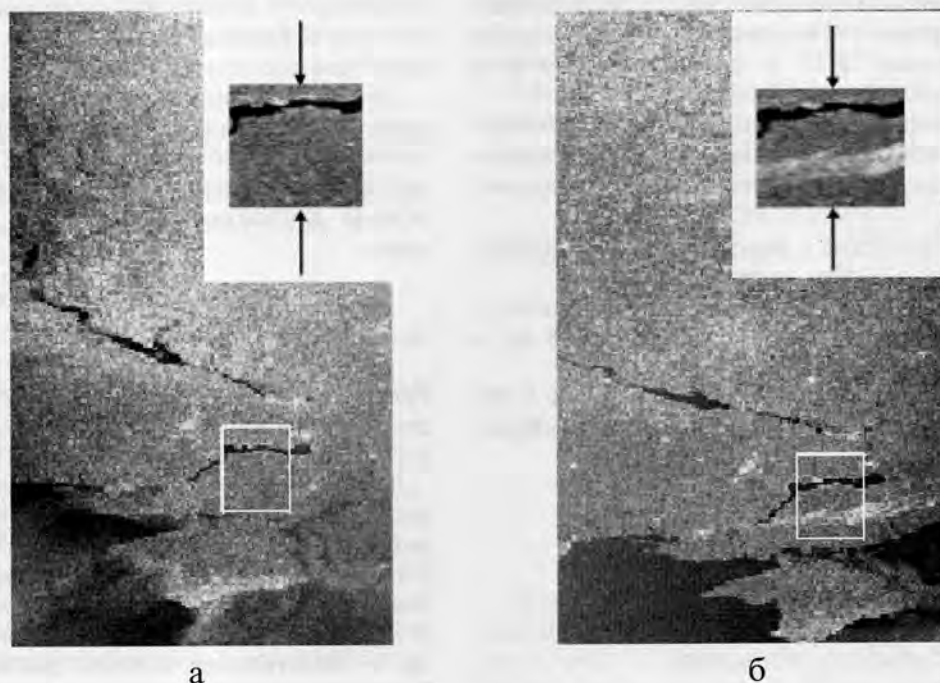


Рис. 4. Радиолокационные изображения исследуемого района, полученные РБО ИСЗ «Сич-1»: а — 23.04.96 г., б — 26.04.96 г. В верхнем углу выделены увеличенные изображения исследуемого района. Стрелками обозначены направления сечения

26 апреля в 11:30 местного времени ИСЗ NOAA-14, а наличие зон пониженной температуры на поверхности подтверждаются данными инфракрасной съемки, проведенной синхронно с оптическими измерениями. Элемент разрешения в режимах оптической и инфракрасной съемки составлял 2 км, что соизмеримо с элементом разрешения при радиолокационной съемке (около 0.8 км). Вся полученная информация (оптическая, инфракрасная и радиолокационная) была приведена нами к одному масштабу, и совмещена между собой. Участок с влагонесущей облачностью и зона пониженной температуры на поверхности почвы совпали с зоной повышенной отражаемости на радиолокационном изображении. На рис. 4 эта зона выделена и характеризуется повышенной яркостью, что особенно заметно на увеличенном фрагменте в верхней части рисунка. В отсутствие осадков выделенный квадратом район характеризуется более слабой и относительно однородной отражаемой способностью. Темная полоса на изображениях соответствует Каховскому водохранилищу.

Для определения влажности почвы экспериментально определялась интенсивность отраженного от поверхности радиосигнала и находилась удельная эффективная площадь рассеяния УЭПР в каждой точке выбранного разреза изображений на рис. 4 (отмечены стрелками). Как 23, так и 26 апреля

выбранное сечение просматривалось на различных витках ИСЗ под двумя углами падения  $\Theta_1 = 40^\circ$ ,  $\Theta_2 = 28^\circ$ . Азимутальные углы, соответствующие углам падения, были также различны и составляли соответственно  $\beta_1 = 20^\circ$ ,  $\beta_2 = 50^\circ$ .

Для исключения неизвестного спектра неоднородностей резонансно рассеивающих радиоволн для каждой точки  $X$  разреза строились радиолокационные контрасты:

$$K_1(\Theta_1, x) = 10 \lg \frac{\sigma_w^0(\Theta_1; x)}{\sigma_0^0(\Theta_1; x)}; \quad \beta = 20^\circ, \quad (20)$$

$$K_2(\Theta_2, x) = 10 \lg \frac{\sigma_w^0(\Theta_2; x)}{\sigma_0^0(\Theta_2; x)}; \quad \beta = 50^\circ, \quad (21)$$

где  $\sigma_w^0$  и  $\sigma_0^0$  — соответственно УЭПР после выпадения осадков и до них. Контрасты (20) и (21) явно не зависят от азимутального угла  $\beta$ , однако от него, вообще говоря, зависит рельеф плавных неоднородностей в рассматриваемом сечении. Для исключения влияния этого неизвестного фактора, а также других, например неоднородности интенсивности дождя, было проведено усреднение контрастов по сечению:

$$\bar{K}(\Theta) = \frac{1}{L} \int_0^x K(\Theta, x) dx,$$

где  $L$  — длина выделенного сечения.

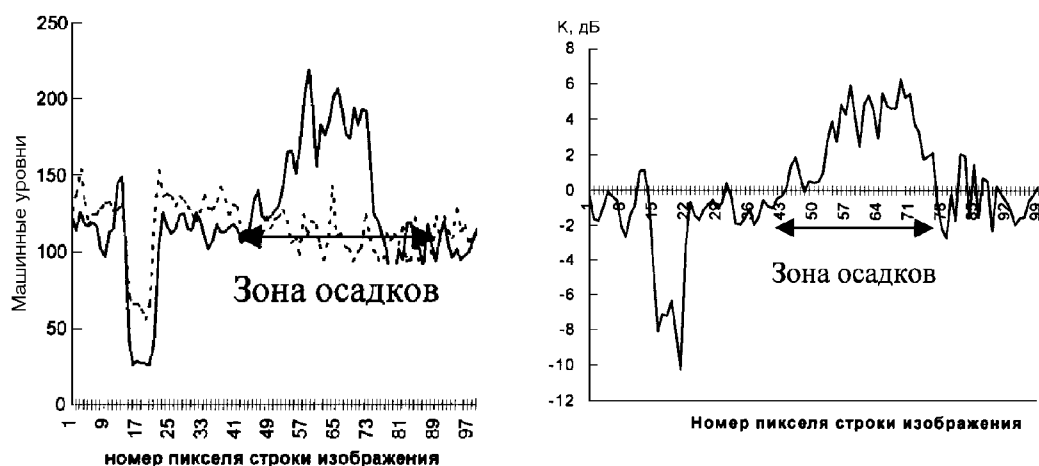


Рис. 5. Зависимости  $\sigma_w^0$  (сплошная кривая),  $\sigma_0^0$  (штриховая) (а.) и радиолокационного контраста  $K$  (б) от координаты  $x$  в выбранном сечении;  $\Theta = 40^\circ$ ,  $\beta = 20^\circ$

На рис. 5 представлены зависимости  $\sigma_w^0$ ,  $\sigma_0^0$  (рис. 5, а) и контраста  $K_1$  (рис. 5, б) от координаты  $x$  в выбранном сечении. Там же (пунктир) приведен и средний контраст для угла падения  $\Theta_1 = 40^\circ$ . Видно, что контрасты изменяются достаточно сильно по сечению, достигая величины  $K_{\max} \approx 6$  дБ, величина среднего контраста составляет

$$\bar{K}_1 = 5.4 \text{ дБ.} \quad (23)$$

Аналогично ведет себя и контраст для сечения  $\Theta_2 = 28^\circ$ , средний контраст в этом случае равен

$$\bar{K}_2 = 4.9 \text{ дБ.} \quad (24)$$

Характерный пространственный масштаб изменения  $K$  вдоль сечения составляет величину порядка 10 км, ошибка в определении  $\bar{K}$ , связанная с экспериментальными погрешностями не превышает 2...3 %.

Экспериментально найденные значения средних контрастов (23) и (24) и выражения для них из (19) дали при заданной температуре и длине радиоволны два уравнения для определения относительной влажности и солёности поверхностного слоя почвы, численные решения которых привело к значениям

$$W = 0.38, \quad S = 1.4 \text{ ‰} \quad (25)$$

На рис. 6 этому решению соответствуют точки пересечения контрастов  $K_1$  и  $K_2$ . Численный анализ уравнений показал, что найденное решения (25) единственное. Вычисления показывают, что изменение температуры почвы в диапазоне 10...20 °С практически не существенно. Экспериментальные погрешности определения контраста изменяют значения влажности и солёности не более чем на 2...5 %.

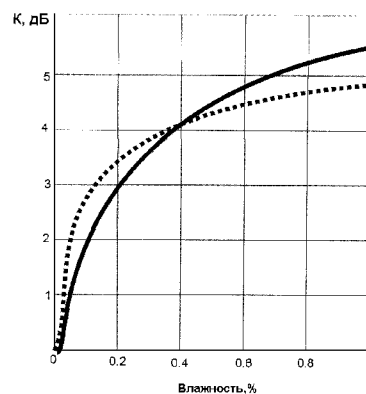


Рис. 6. Зависимость контрастов  $K_1$  и  $K_2$  от влажности  $W$  при значении солёности  $S = 1.4 \text{ ‰}$ ;  $T = 14^\circ$ ,  $\lambda = 3.1 \text{ см}$

Значения последождевой влажности, полученные контактным методом в четырех точках исследуемого района, согласно данным Гидрометеоцентра [3] равны: 0.31, 0.4, 0.23, 0.52.

Средняя влажность при этом равна  $W = 0.3625$ , что достаточно хорошо совпадает с данными радиолокационного зондирования.

Такое совпадение теоретических и экспериментальных результатов с данными контактных измерений делает возможным использование методики определения количества свежесвыпавших осадков в практических условиях.

1. Басс Ф. Г., Фукс И. М. Рассеяние радиоволн на статистически неровной поверхности. — М.: Наука, 1972.— 424 с.
2. Герман М. А. Космические методы исследования в метеорологии. — Л.: Гидрометеоздат, 1985.—352 с.

3. Кольцевые карты погоды и количества выпавших осадков в виде изогиет. — Киев: Украинский ГМЦ, 1996.—Вып. 27.
4. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии. — М.: Мир, 1988.—350 с.
5. Ландгребе Д. А. Дистанционное зондирование — количественный подход. — М.: Недра, 1983.—415 с.
6. Почвенный атлас СССР. — М.: ГУГК при Совете Министров СССР, 1983.—487 с.
7. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю. А. Мельника. — М.: Сов. радио, 1980.—264 с.
8. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л. М. Митника. — Л.: Гидрометеиздат, 1990.—198 с.
9. Реутов Е. А., Шутко А. М. Определение влагосодержания почвогрунтов СВЧ-радиометрическим методом с привлечением априорной информации // Исслед. Земли из космоса.—1985.—№ 1.—С. 73—87.
10. Фукс И. М., Ямпольский Ю. М. Связь радиолокационного контраста с влажностью грунта // Тез. докл. XVI Всесоюз. конф. по распространению радиоволн (Харьков, октябрь 1990). — Харьков, 1990.—Ч.П.—С. 236—237.
11. Хипп Дж. Зависимость электромагнитных характеристик почвы от влажности, плотности почвы и частоты // ТИИ-ЭР.—1974.—62.—С. 122—128.
12. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. — М.: Наука, 1986.—188 с.
13. CEOS Yearbook. Smith system engineering limited. — UK.—145 p.
14. Dranovsky V. I., Yefimov V. B., Kalmykov I. A., et al. Possibilities of Ecological Environment Monitoring the Using «Sich-1» spacecraft // Proc. Fourth Ukraine-China symp. of space science and technology. — Kiev, 1996.—P. 4—7.
15. ESA Yearbook. — McGraw-Hill, 1998.—256 p.