

Определение дождевой влажности почвы по радиолокационным данным ИСЗ “СИЧ-1”

А. Г. Боев, В. Б. Ефимов¹, И. А. Калмыков¹, В. Н. Цымбал¹, А. А. Янцевич²

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

*¹Центр радиофизического зондирования Земли НАН и НКА Украины,
Украина, 61085, Харьков, ул. Проскуры, 12*

*²Харьковский гуманитарный институт Народной украинской академии,
Украина, 61000, г. Харьков, ул. Лермонтовская, 27*

Статья поступила в редакцию 23 января 2001 г.

Работа посвящена проблеме радиолокационного определения поверхностной дождевой влажности почвы по данным спутникового мониторинга. Предложена методика, позволившая определить по данным радиолокатора бокового обзора ИСЗ “Сич-1” поверхностную влажность и соленость почвы. Полученные значения влажности для одного из районов Запорожской области хорошо согласуются с данными контактных измерений.

Робота присвячена проблемі радіолокаційного визначення поверхневої дощової вологості ґрунту за даними супутникового моніторингу. Запропоновано методику, яка дозволяє визначити по даним радіолокатора бокового огляду штучного супутника Землі “Січ-1” поверхневу вологість та солоність ґрунту. Отримані значення вологості для одного із районів Запорізької області добре узгоджуються із даними контактних вимірювань.

Введение

Возможность определения интенсивности свежеснеженных осадков (в дальнейшем – дождевой влажности почвы) дистанционными радиофизическими методами известна достаточно давно [1]. 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 дистанционного зондирования Земли, 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 [2]. Зондирование в диапазоне сантиметровых – метровых длин волн (СВЧ-диапазон) лишено этого недостатка. В 70-х годах для экспериментальных работ по определению влажности использовались только скаттерометры и СВЧ-радиометры [3]. С развитием космических радиолокационных систем (радиолокаторов с реальной и с синтезированной апертурой антенны) появилась возможность определения влажности почвенного покрова на больших площадях. Для практики это имеет большое значение, т. к. дополняются данные контактных измерений, носящих выборочный характер.

Вопросы определения влажности почвы по данным СВЧ-зондирования рассматривались во многих работах, например [4-8]. Од-

нако в них, в основном, используются результаты полигонных экспериментов, спланированных так, чтобы все параметры почвы: рельеф, шероховатость, тип подстилающей поверхности и др., кроме влажности, были известны. В реальных условиях проведения космической или авиационной радиолокационной съемки все параметры почвы, влияющие на отражение радиоволн, неизвестны. Поэтому в работах, посвященных интерпретации результатов наблюдений поверхности земли с аэрокосмических носителей, например [8], приведены лишь качественные оценки влажности либо только визуальная дешифровка данных. Это связано с тем, что алгоритмов обработки экспериментальных данных СВЧ-зондирования, которые бы позволяли достаточно точно восстанавливать требуемые характеристики почвы не только качественно, но и количественно в настоящее время нет, и задача их построения является весьма актуальной.

Целью настоящей работы является определение поверхностной влажности и солёности почвы по данным регулярного мониторинга, который осуществлялся с ИСЗ "Сич-1" в 1995-1997 гг.

В работе предложен алгоритм определения поверхностной последождовой влажности и солёности 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 на волне $\lambda = 3.1$ см и под двумя углами падения $\Theta = 40^\circ$ и $\Theta = 28^\circ$ в течение 2-3 дней в то время, когда растительность еще не развита, удалось оценить влажность и солёность почвы после выпавшего дождя.

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

1. Диэлектрическая проницаемость почвы

Радиолокационный метод определения влажностного состояния почв основан на зависимости комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) от процентного содержания влаги и солей [9]. Согласно [9] зависимость КДП почвы $\tilde{\epsilon}$ от влажности W в сантиметровом диапазоне радиоволн имеет линейный характер:

$$\tilde{\epsilon} = 1 + 0.7d(\tilde{\epsilon}_w W + 1), \quad (1.1)$$

где d – удельный вес сухого грунта, г/см³; $\tilde{\epsilon}_w$ – КДП воды с растворенными в ней солями; W – относительная влажность почвы в процентах. Для сухого грунта ($W = 0$) значение мнимой части КДП весьма мало по сравнению с вещественной, поэтому условно будем считать КДП сухого грунта вещественной величиной [10]. При наличии воды в грунте ($W \neq 0$) мнимая часть $\tilde{\epsilon}$ возрастает, с этим связан эффект поглощения радиоволн. На мнимую часть КДП влияет также наличие солей в растворе.

Зависимость КДП воды от температуры и длины зондирующей радиоволны λ определяется формулой Дебая¹ [11]:

$$\tilde{\epsilon}_w = 5 + \frac{\epsilon_s - 5}{1 + i\lambda_s/\lambda} - i60\lambda\rho, \quad (1.2)$$

где

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

$$\epsilon_s = 88 - 0.4T + 8 \cdot 10^{-4}T^2; T - \text{температура, } ^\circ\text{C}.$$

Величина ρ (измеряется в г/см³) в формуле (1.2) связана с концентрацией S растворенных

¹Согласно [12] формула Дебая справедлива для значений солёности до 50 промилле (5%), что значительно превышает значения, используемые в данной работе.

в воде солей соотношением

$$\rho = S(85 + 3.4T). \quad (1.3)$$

Используя обозначения диэлектрической проницаемости для сухой почвы ϵ_0 ($\epsilon_0 = 4$ – суглинок) и выражение (1.2) для $\tilde{\epsilon}_w$, КДП почвы (1.1) можно представить в виде:

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon - i\sigma,$$

$$\epsilon = \epsilon_0 + (\epsilon_0 - 1)\epsilon_w W, \quad (1.4)$$

$$\sigma = (\epsilon_0 - 1)W\sigma_w,$$

где

$$\epsilon_w = \epsilon_0 + (\epsilon_0 - 1) \left[5 + \frac{\epsilon_s - 5}{1 + (\lambda_s/\lambda)^2} \right] W, \quad (1.5)$$

$$\sigma_w = \left((\epsilon_0 - 1) \frac{(\epsilon_s - 5)}{1 + (\lambda_s/\lambda)^2} \left(\frac{\lambda_s}{\lambda} \right) + 60\lambda\rho \right) W.$$

Атмосферные осадки представляют собой слабые растворы солей. Общая средняя соленость для типичных дождевых осадков изменяется в среднем от 10 до 30 мг/л ($(1 \div 3) \cdot 10^{-2}$ промилле). Крайние значения минерализации при этом составляют соответственно $3 \div 4$ и $50 \div 60$ мг/л [12]. На рис. 1 приведена зависимость от влажности отношения мнимой части КДП к действительной при максимальных и минимальных значениях солености для зондирующей волны $\lambda = 3.1$ см и $T = 15$ °С.

Из приведенных зависимостей следует:

1. Для дождя средней интенсивности рост концентрации солей S приводит к значительному увеличению комплексной диэлектрической проницаемости почвы (в $4 \div 5$ раз).

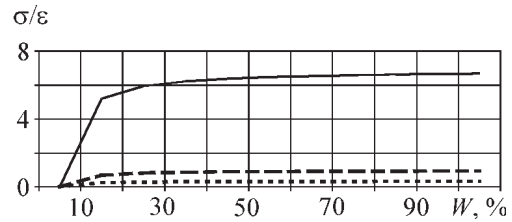


Рис. 1. Зависимость σ/ϵ от влажности при различных значениях солености, $T = 15$ °С, $\lambda = 3.1$ см: ----- $S = 0.001$ промилле, - - - - $S = 0.01$ промилле, ——— $S = 0.05$ промилле

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

3. Зависимость σ/ϵ от влажности линейна в диапазоне до $W = 15$ %, и σ/ϵ практически не изменяется при большой влажности.

4. При увеличении T ($T > 0$) влияние солености на КДП возрастает. Для $T < 0$ соленость не оказывает существенного влияния на КДП, например, при характерной для полярных льдов температуре $T = -10$ °С влияние солености, по сравнению с обычными условиями, уменьшается в 3 раза.

2. Отражение от неровной земной поверхности

Как известно [10-13], на отраженный поверхностью радиолокационный сигнал влияет целый ряд факторов. Это рельеф местности, состояние растительного покрова, условия радиолокационной съемки, тип почвы, ее влажность и др. Обобщенным показателем интенсивности отражения радиолокационного сигнала является удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР).

В нашем случае, когда зондирование проводилось в условиях неразвитой растительности, основной вклад в рассеяние давал поверхностный слой почвы.

Поверхностное рассеяние радиолокационного сигнала обуславливается изменением диэлектрических свойств вещества на границе двух сред. В силу того, что диэлектрическая проницаемость воздуха практически не

изменяется, рассеяние радиоволн почвой без растительности рассмотрим как рассеяние статистически шероховатой поверхностью.

Пространственный спектр высот суши может сильно зависеть от участка рассматриваемой поверхности. 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 волновых чисел k , границы которых зависят от волнового числа зондирующей радиоволны k_E , угла падения Θ , высоты неровностей h и характерного масштаба L элемента разрешения:

$$1. \quad k > k_f, \quad k_f = [k_E \cos^3 \Theta / h(x)]^{1/2}, \quad (2.1)$$

$$2. \quad L^{-1} < k < k_f, \quad (2.2)$$

$$3. \quad k < L^{-1}. \quad (2.3)$$

В коротковолновом интервале (2.1) происходит резонансное рассеяние радиоволн. Граничные значения k_f соответствуют минимальному размеру возвышения, отражение от которого можно рассматривать как отражение от плоскости [13].

Неровности, соответствующие интервалу (2.2), 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

$$\gamma = \sqrt{(\overline{\nabla h})^2}, \quad (2.4)$$

где черта означает усреднение.

Неровности с волновыми векторами из интервала (2.3) также отражают как наклонные плоскости. Отражение от такого возвышения происходит как от плоскости, наклоненной в месте отражения под локальным углом

$$\psi = |\overline{\nabla h}|. \quad (2.5)$$

Наличие возвышений (или углублений) с масштабами (2.3) есть специфическая деталь в задаче отражения от суши. Для типичной задачи отражения от морской поверхности характерно наличие двух интервалов (2.1) и (2.2), т. к. 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 (2.1) и (2.2)), поверхность суши должна описываться уже трехмасштабной моделью.

Трехмасштабная модель неровной рассеивающей поверхности может быть сведена к более простой модифицированной двухмасштабной модели путем перехода в новую систему координат [13].

Рассмотрим местность, рельеф которой может быть аппроксимирован некоторой поверхностью C , характеризующейся следующим интервалом:

$$k < L^{-1}, \quad h \ll \delta,$$

где δ – наименьший радиус кривизны поверхности C . Такую местность будем называть равнинной. Дальнейшее рассмотрение (для простоты) проведем для случая цилиндрической поверхности, образующая которой есть плоская кривая C , заданная естественным параметрическим уравнением

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

где $\vec{r}\{x, y\}$ – радиус-вектор, s – длина дуги кривой. Введем в рассмотрение криволиней-

ную систему координат (s, η) связанную с кривой C . Координата s отсчитывается вдоль поверхности, координата η – от нормали \vec{n} , восстановленной к кривой в точке s . Тогда положение любой точки M , лежащей вне кривой C , будет задаваться радиус-вектором:

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

Направляющие векторы новой системы координат:

$$\vec{a}_1 = \frac{\partial \vec{r}}{\partial s} = \vec{\tau} \left(1 + \frac{\eta}{R} \right), \quad \vec{a}_2 = \frac{\partial \vec{r}}{\partial \eta} = \vec{n}$$

будут совпадать с направлениями касательной $\vec{\tau}$ и нормали \vec{n} . Расстояние между двумя близкими точками криволинейной системы координат (s, η) равно:

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

Видно, что если координата η , характеризующая отклонение высоты рельефа, мала по сравнению с радиусом кривизны, т. е. $\eta \approx \delta \ll \rho$, то

$$d\vec{r}^2 \approx ds^2 + d\eta^2.$$

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.

Значения КДП грунта достаточно велики, поэтому приближенные краевые условия Леонтовича [13] на поверхности грунта можно считать выполненными. Это подтверждают данные, содержащиеся в [14]. При этом мат-

рица УЭПР определяется как

$$\sigma_{\vec{P}_i \vec{P}_j}^{P_0} = \left\langle E_{\vec{P}_i}^{P_0} E_{\vec{P}_j}^{*P_0} \right\rangle R^2 / D(E_0^{P_0})^2, \quad (2.6)$$

где D – площадь облучаемой поверхности; R – расстояние до излучателя; $E_0^{P_0} = (\vec{E}_0 \cdot \vec{P}_0)$ – напряженность электрического поля падающей волны; \vec{P}_0, \vec{P}_i – векторы поляризации падающей и рассеянной волн соответственно; угловые скобки означают усреднение по углам наклона крупных неоднородностей с масштабами из интервала (2.2).

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

Окончательное выражение для матрицы УЭПР имеет следующий вид [13]:

$$\sigma_{\vec{P}_i \vec{P}_j}^{P_0} = \left\langle \frac{2(k_E l)^2 (k_E \bar{h})^2}{\pi} \Phi_{\vec{P}_i \vec{P}_j}^{P_0} G(q_{\perp}) \right\rangle. \quad (2.7)$$

Здесь \bar{h}, l – соответственно среднеквадратичная высота и масштаб корреляции мелких неоднородностей (интервал (2.1)); $G(q_{\perp})$ – их спектральная плотность высот; q_{\perp} – проекция вектора рассеяния на плоскость, касательную к поверхности;

$$\Phi_{\vec{P}_i \vec{P}_j}^{P_0} = \left\{ \left(\frac{a}{a+b} \right)^2 (\vec{P}_0 \vec{P}_i) + 2(\tilde{\epsilon} - 1) \frac{a^2}{(b + a\tilde{\epsilon})(a+b)} (\vec{n} \vec{P}_i) (\vec{n} \vec{P}_0) \right\} \times$$

$$\times \left\{ \left(\frac{a}{a+b} \right)^2 (\bar{P}_j \bar{P}_0) + 2(\tilde{\epsilon}-1) \frac{a^2 b}{(b+a\tilde{\epsilon})(a+b)} (\bar{n} \bar{P}_j) (\bar{n} \bar{P}_0) \right\}, \quad (2.8)$$

где a – проекция нормали к поверхности на направление обзора, $b = \sqrt{\tilde{\epsilon}-1+a^2}$.

Для случая вертикальной поляризации падающей и отраженной волн, используемых в радиолокаторе бокового обзора (РБО) ИСЗ “Сич-1”: $(\bar{P}_0 \bar{P}_i) = (\bar{P}_0 \bar{P}_j) = 1$, $(\bar{n} \bar{P}_i) = (\bar{n} \bar{P}_j) = (\bar{n} \bar{P}_0)$. Тогда из (2.7) и (2.8) получаем:

$$\Phi_{\perp} = \left| \left(\frac{a}{a+b} \right)^2 + 2(\tilde{\epsilon}-1) \frac{a^2 b}{(b+a\tilde{\epsilon})(a+b)} (\bar{n} \bar{P}_0)^2 \right| \quad (2.9)$$

и

$$\sigma_{\perp} \equiv \sigma_{\bar{P}_i \bar{P}_j}^{\bar{P}_0} = \left\langle \frac{2(k_E l)^2 (k_E h)^2}{\pi} \times \left| \left(\frac{a}{a+b} \right)^2 + 2(\tilde{\epsilon}-1) \frac{a^2 b (\bar{n} \bar{P}_0)^2}{(b+a\tilde{\epsilon})(a+b)} \right| G(q_{\perp}) \right\rangle. \quad (2.10)$$

В формулу (2.10) входит комплексная диэлектрическая проницаемость $\tilde{\epsilon}$ почвы, неизвестные величины: a , $G(q_{\perp})$, масштабы l и h .

При известном из эксперимента значении σ_{\perp} уравнение (2.10) содержит несколько неизвестных, что не позволит определить значение $\tilde{\epsilon}$.

Рассмотрим логарифмический радиолокационный контраст (в дальнейшем – контраст):

$$K_{\perp}(\bar{r}, \lambda, \Theta) = 10 \lg \frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\perp 0}}. \quad (2.11)$$

Здесь и далее индексом “0” будут обозначаться величины, относящиеся к сухой почве. С учетом (2.10) выражение (2.11) принимает вид:

$$K_{\perp}(r, \lambda, \Theta) = 10 \lg \frac{\left\langle \left| \left(\frac{a}{a+b} \right)^2 + 2(\tilde{\epsilon}-1) \frac{a^2 b (\bar{P}_0 \bar{n})^2}{(b+a\tilde{\epsilon})(a+b)} \right|^2 \right\rangle}{\left\langle \left| \left(\frac{a}{a+b} \right)^2 + 2(\epsilon_0-1) \frac{a^2 b (\bar{P}_0 \bar{n})^2}{(b_0+a\epsilon_0)(a+b_0)} \right|^2 \right\rangle}. \quad (2.12)$$

В этой формуле выражения в числителе и знаменателе под знаком логарифма различаются лишь КДП влажной и сухой почв.

Усреднение в (2.12) по углам наклона крупных неоднородностей в пределах облучаемой площадки, производимое приемником, эквивалентно интегрированию σ_{\perp} по всем возможным углам с некоторой функцией распределения. Поэтому усредненные выражения в (2.12) можно найти с помощью теоремы о среднем [13]. При этом получим следующее выражение для контраста:

$$K_{\perp}(\bar{r}, \lambda, \Theta + \psi + \gamma) = 10 \lg \frac{\left| \left(\frac{a_{\gamma}}{a_{\gamma} + b} \right)^2 + 2(\tilde{\epsilon}-1) \frac{a_{\gamma}^2 b \sin^2(\Theta + \psi + \gamma)}{(b+a\tilde{\epsilon})(a+b)} \right|^2}{\left| \frac{a_{\gamma}}{a_{\gamma} + b_0} + 2(\epsilon_0-1) \frac{a_{\gamma}^2 b_0 \sin^2(\Theta + \psi + \gamma)}{(b_0+a\epsilon_0)(a+b_0)} \right|^2}, \quad (2.13)$$

где γ и ψ – углы, определенные (2.4) и (2.5);

$$a_{\gamma} = \cos(\Theta + \psi + \gamma);$$

$$b = \sqrt{\tilde{\epsilon}-1 + \cos^2(\Theta + \psi + \gamma)};$$

$$b_0 = \sqrt{\epsilon_0 - 1 + \cos^2(\Theta + \psi + \gamma)}.$$

Поскольку углы наклона γ и ψ неизвестны и, вообще говоря, различны для разных участков местности, локальный контраст (2.13) – случайная функция γ и ψ . Кроме того, K_{\perp} является также случайной функцией диэлектрической проницаемости сухой почвы, интенсивности осадков и солености. Учитывая, что зондируемая местность равнинная, упростим выражение для контраста (2.13), оставив в выражениях для a_{γ} , b , b_0 только угол Θ , т. е.

$$a_{\gamma} \cong \cos \Theta, \quad b \cong \sqrt{\tilde{\epsilon} - 1 + \cos^2 \Theta},$$

$$b_0 \cong \sqrt{\epsilon_0 - 1 + \cos^2 \Theta}.$$

Контраст (2.13) является локальным и может быть использован для восстановления параметров почвы на участке с размерами, определяемыми элементом разрешения РБО (0.8×1.2 км). Однако такая детальная информация на практике нужна не всегда. Усредняя дополнительный локальный контраст на большом участке местности D –

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

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

$$K_{\perp}(\lambda, \Theta) =$$

$$= 10 \lg \frac{\left| \left(\frac{a}{a+b} \right)^2 + 2(\tilde{\epsilon} - 1) \frac{a^2 b \sin^2 \Theta}{(b + a\tilde{\epsilon})(a+b)} \right|^2}{\left| \left(\frac{a}{a+b_0} \right)^2 + 2(\epsilon_0 - 1) \frac{a^2 b_0 \sin^2 \Theta}{(b_0 + a\epsilon_0)(a+b_0)} \right|^2}.$$

(2.14)

Здесь все величины вычисляются для угла падения радиоволны Θ и неких средних значений $\tilde{\epsilon}$ и ϵ_0 .

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

Интегральный контраст (2.14) есть функция угла Θ , длины зондирующей радиоволны λ , 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 величину 3÷8 дБ и слабо зависит от температуры почвы.

С учетом полученных из эксперимента значений λ , Θ , T и K_{\perp} выражение (2.14) представляет собой уравнение с двумя неизвестными – влажностью и соленостью. Поэтому для их определения необходимо планировать либо двухчастотное одновременное зондирование одной и той же местности, либо зондирование под разными углами падения. Данные ИСЗ “Сич-1” позволяют осуществить вторую возможность.

3. 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÷46° северной широты и 30÷38° восточной долготы. Этот участок характеризуется как равнина с практически отсутствующими лесными массивами и естественной степной растительностью [14]. Согласно топографическим картам средняя высота его неровностей не превышает 100 м над уровнем моря, неровности имеют наклон порядка 0.5°. Почвы в основном суглинистые, местами глинистые и песчаные.

РБО ИСЗ “Сич-1” имел полосу обзора около 500 км, углы падения радиоволн на поверхность Земли изменялись при этом от 20 до 50°.

Одна и та же точка местности попадала в полосу обзора каждые 8 часов и наблюдалась в течение 10 витков спутника вокруг Зем-

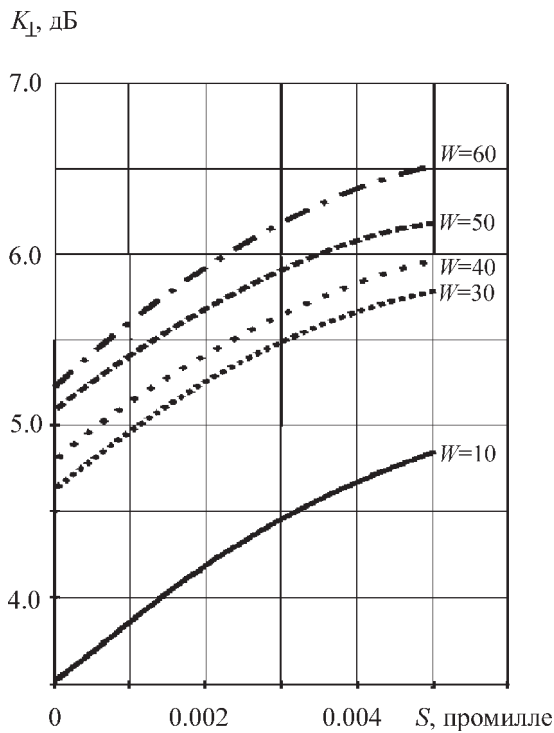


Рис. 2. Зависимость контраста K_{\perp} от солёности S при различных значениях влажности W (в процентах) при $T = 14^{\circ}$, $\lambda = 3.1$ см, $\Theta = 40^{\circ}$

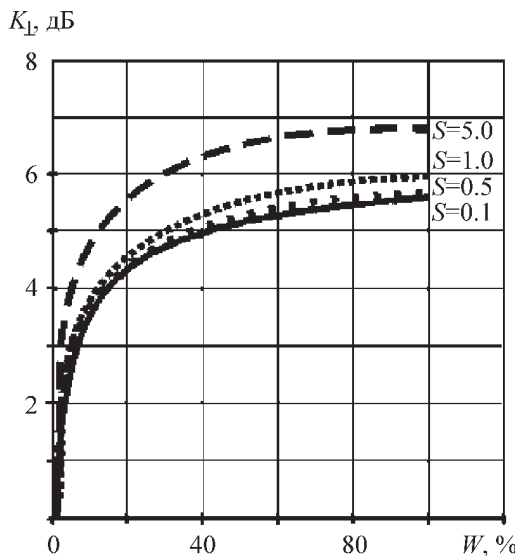


Рис. 3. Зависимость контраста K_{\perp} от влажности W при различных значениях солёности S (в промилле) при $T = 14^{\circ}$, $\lambda = 3.1$ см, $\Theta = 40^{\circ}$

ли под разными углами падения и различными азимутами. Над одной и той же точкой спутник пролетал один раз в трое суток. Картина обзора одной и той же местности повторялась при этом полностью.

Первая радиолокационная съёмка выбранного участка местности (рис. 4, а) производилась 23 апреля 1996 г. По данным контактных измерений сети гидрометеоцентра [15] с 18 по 25 апреля 1996 г. в южной части Украины полностью отсутствовали любые проявления осадков. Среднесуточная температура в этот период составляла 14°C . Вторая радиолокационная съёмка производилась 26 апреля 1996 г. (рис. 4, б). Режимы радиолокационной съёмки и параметры спутниковой системы были идентичны во время обеих съёмок.

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 съёмки, проведенной 26 апреля в 11:30 местного времени ИСЗ NOAA-14, а наличие зон пониженной температуры на поверхности показали данные инфракрасной съёмки, проведенной синхронно с оптическими измерениями. Элемент разрешения в режимах оптической и инфракрасной съёмок составлял 2 км, что соизмеримо с элементом разрешения при радиолокационной съёмке (около 0.8 км). Было произведено сопоставление данных полученных оптическим, инфракрасным и радиолокационным методами. Участок с влагонесущей облачностью и зона пониженной температуры на оптическом и ИК изображениях 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 отражательной способностью. Темная полоса на рис. 4, а, б соответствует Каховскому водохранилищу.

Для определения влажности почвы экспериментально измерялась интенсивность отра-

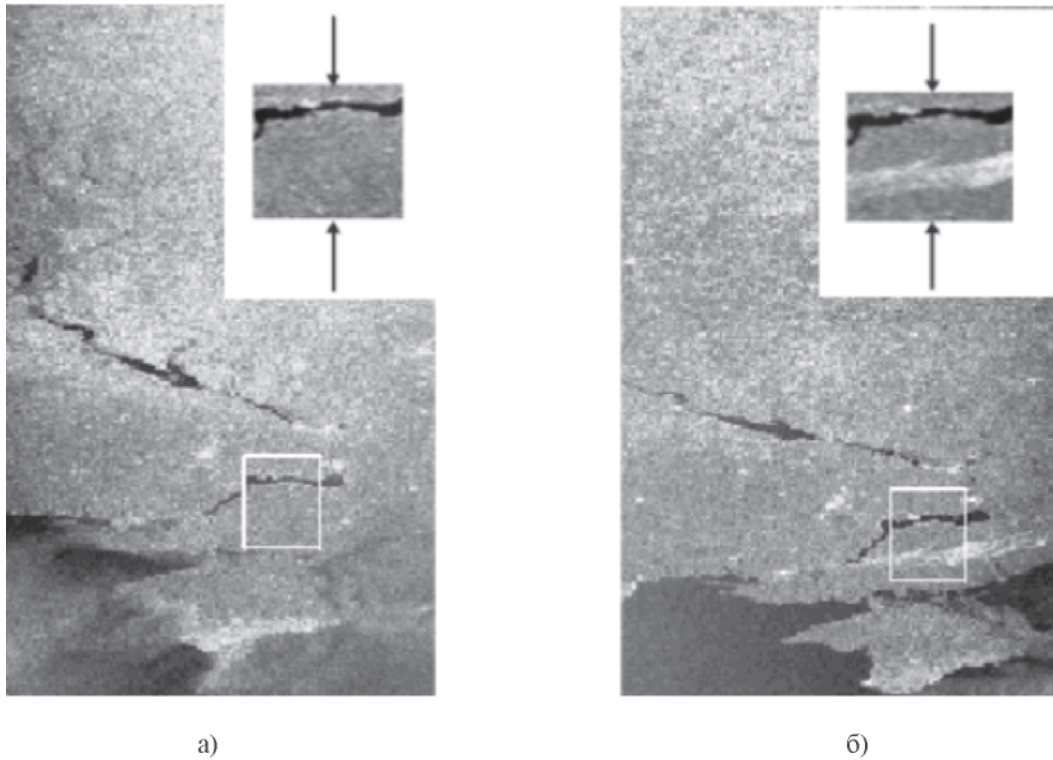


Рис. 4. Радиолокационные изображения исследуемого района, полученные РБО ИСЗ “Сич-1” 23.04.1996 г. (а) и 26.04.1996 г. (б). В верхних углах показаны увеличенные изображения выделенного района. Стрелками обозначены выбранные сечения

женного от поверхности радиосигнала и находилась УЭПР в каждой точке выбранного разреза изображений (на рис. 4 отмечен 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 резонансно рассеивающих неоднородностей для каждой точки x разреза строились радиолокационные контрасты:

$$K_1(\Theta_1, x) = 10 \lg \frac{\sigma_{\perp}(\Theta_1; x)}{\sigma_0(\Theta_1; x)}, \quad \beta = 20^\circ; \quad (3.1)$$

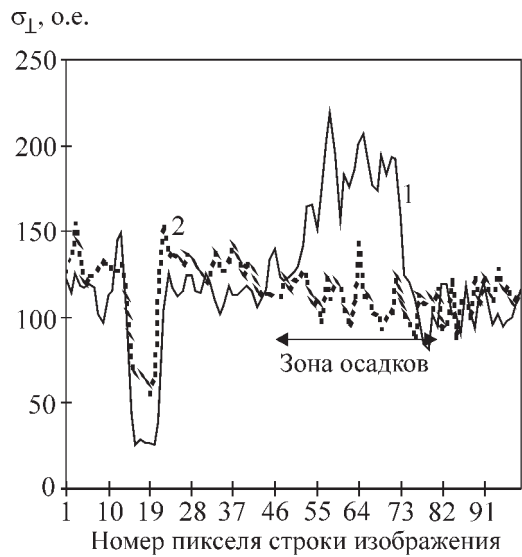
$$K_2(\Theta_2, x) = 10 \lg \frac{\sigma_{\perp}(\Theta_2; x)}{\sigma_{\perp 0}(\Theta_2; x)}, \quad \beta = 50^\circ; \quad (3.2)$$

где σ_{\perp} и $\sigma_{\perp 0}$ – УЭПР соответственно после выпадения осадков и до них. Контрасты (3.1) и (3.2) явно не зависят от азимутального угла β , однако от него, вообще говоря, в рассматриваемом сечении зависит вид рельефа плавных неоднородностей. Для исключения влияния этого и других факторов, например, неоднородности интенсивности дождя, было проведено усреднение контрастов по сечению:

$$\bar{K}_{1,2}(\Theta) = \frac{1}{L} \int_0^x K_{1,2}(\Theta, x) dx, \quad (3.3)$$

где L – длина выделенного сечения.

На рис. 5 представлены зависимости σ_{\perp} , $\sigma_{\perp 0}$ (рис. 5, а) и контраста K_1 (рис. 5, б) от координаты x в выбранном сечении. Приведен средний контраст для угла падения $\Theta_1 = 40^\circ$. Видно, что контрасты в сечении изменяются значительно, достигая величины $K_{\max} \approx 6$ дБ;



а)



б)

Рис. 5. а) Зависимость σ_{\perp} (кривая 1), $\sigma_{\perp 0}$ (кривая 2) от координаты x в выбранном сечении, $\Theta = 40^\circ$, $\beta = 20^\circ$. б) Зависимость радиолокационного контраста K_1 от координаты x в выбранном сечении, $\Theta = 40^\circ$, $\beta = 20^\circ$

величина среднего контраста составляет

$$\bar{K}_1 \approx 5.4 \text{ дБ.} \quad (3.4)$$

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

$$\bar{K}_2 = 4.9 \text{ дБ.} \quad (3.5)$$

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

Экспериментально найденные значения средних контрастов (3.4) и (3.5), были подставлены в (2.14) для определения относительной влажности и солености поверхностного слоя почвы. При численном решении полученных уравнений были найдены следующие значения:

$$W = 38 \%, \quad S = 1.4 \text{ промилле.} \quad (3.6)$$

На рис. 6 этому решению соответствует точка пересечения контрастов \bar{K}_1 и \bar{K}_2 . Численный анализ уравнений показал, что найденное решение (3.6) единственное. Изменение температуры почвы в диапазоне $10 \div 20^\circ\text{C}$ практически несущественно. Экспериментальные погрешности определения контраста приводят к погрешности вычисления значений влажности и солености, не превышающей $2 \div 5 \%$.

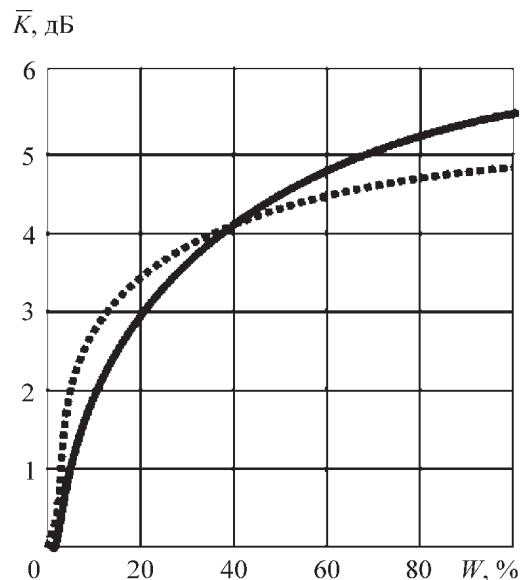


Рис. 6. Зависимость контрастов \bar{K}_1 и \bar{K}_2 от влажности W при $S = 1.4$ промилле, $T = 14^\circ$, $\lambda = 3.1 \text{ см}$

Значения последождевой влажности, полученные контактным методом в четырех точках исследуемого района, согласно данным гидрометеоцентра [15] равны: 0.31; 0.4; 0.23; 0.52. Средняя влажность при этом $W = 36.25\%$, что достаточно хорошо совпадает с данными радиолокационного зондирования.

Полученное совпадение теоретических и экспериментальных результатов с данными контактных измерений делает возможным использование предложенной методики определения количества свежевыпавших осадков на практике.

Авторы благодарны профессору Кулеми-ну Г. П. за полезные предложения и критические замечания.

Литература

1. П. Кронберг. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии. Москва, Мир, 1988, 350 с.
2. ESA Yearbook. McGraw-Hill, 1998, pp. 256.
3. Д. А. Ландгребе. Дистанционное зондирование – количественный подход. Москва, Недра, 1983, 415 с.
4. CEOS Yearbook. Smith system engineering limited. UK. 1997, 145 pp.
5. V. I. Dranovsky, V. B. Yefimov, I. A. Kalmykov et al. Proceedings of Fourth Ukraine-China symposium of space science and technology. Kiev, 1996, pp. 4-7.
6. Радиолокация поверхности Земли из космоса. Под ред. Л. М. Митника. Ленинград, Гидрометеоиздат, 1990, 198 с.
7. Радиолокационные методы исследования Земли. Под ред. Ю. А. Мельника. Москва, Сов. Радио, 1980, 264 с.
8. И. М. Фукс, Ю. М. Ямпольский. Тез. докл. XVI Всесоюзной конференции по распространению радиоволн (Харьков, октябрь 1990). Харьков, 1990, ч. II, с. 236-237.
9. Дж. Хипп. ТИИЭР. 1974, **62**, с. 122-128.
10. А. М. Шутко. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. Москва, Наука, 1986, 188 с.
11. Е. А. Реутов, А. М. Шутко. Исследование Земли из космоса. 1985, №1, с. 73-87.
12. М. А. Герман. Космические методы исследования в метеорологии. Ленинград, Гидрометеоиздат, 1985, 352 с.
13. Ф. Г. Басс, И. М. Фукс. Рассеяние радиоволн на статистически неровной поверхности. Москва, Наука, 1972, 424 с.
14. Почвенный атлас СССР. Москва, ГУГК при Совете Министров СССР, 1983, 487 с.
15. Кольцевые карты погоды и количества выпавших осадков в виде изогьет. Выпуск №27. Киев, Украинский ГМЦ, 1996 г.

Detection of Rain's Soil Moisture Using Sich-1 Radar Data

**A. G. Boyev, V. B. Yefimov,
I. A. Kalmykov, V. N. Tsymbal,
A. A. Yantsevich**

The article is devoted to the problem of radar definition of the rain humidity of ground by the data of satellite monitoring. The technique is offered which has allowed to define surface humidity and salinity of the ground by the data SLR MMS "Sich-1" for one of regions of the Zaporozhye area. The received values of humidity well correlate with the data of contact measurements.