

Член-корреспондент АН СССР К. Я. КОНДРАТЬЕВ,
Ю. М. ТИМОФЕЕВ, Е. М. ШУЛЬГИНА

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЧВЫ ПО ЕГО ТЕПЛОВОМУ РАДИОИЗЛУЧЕНИЮ

По-видимому, наиболее перспективная методика дистанционного определения характеристик поверхностных слоев грунта, ледового покрова или водных бассейнов состоит в использовании для этой цели данных измерений микроволнового излучения соответствующих сред. Ниже рассматривается такого рода методика, пригодная для определения характеристик почвы.

В микроволновом диапазоне выражение для радиояркой температуры теплового излучения однородной полубесконечной среды в направлении нормали имеет вид

$$T'_n = \int_0^{\infty} \alpha(z) T(z) \exp \left[- \int_0^z \alpha(z') dz' \right] dz,$$

где α — коэффициент поглощения; $T(z)$ — распределение температуры в почве в зависимости от глубины z , отсчитываемой по направлению распространения излучения.

Радиояркая температура, измеряемая на уровне земной поверхности, связана с температурой излучения среды T'_n следующим соотношением (если пренебречь малосущественным в рассматриваемом диапазоне спектра вкладом отраженного излучения атмосферы):

$$T_n = T'_n (1 - R^2),$$

где R — френелевский коэффициент отражения земной поверхности, при нормальном падении равный

$$R = (\sqrt{\epsilon} - 1) / (\sqrt{\epsilon} + 1)$$

(ϵ — диэлектрическая проницаемость почвы).

Диэлектрическая проницаемость почвы в диапазоне сантиметровых и дециметровых волн незначительно изменяется в зависимости от длины волны и линейно возрастает с увеличением влажности (¹, ⁴). Поэтому можно не учитывать зависимости R от длины волны при измерениях на нескольких близких длинах волн в микроволновом диапазоне. Коэффициент поглощения грунта возрастает с увеличением влажности примерно линейным образом и увеличивается с ростом частоты, в первом приближении по экспоненциальному закону (²). Сильная зависимость коэффициента поглощения от влажности определяет обусловленность радиояркой температуры излучения грунта метеорологическими условиями.

Представим теперь формулу для радиояркой температуры в виде

$$T_n = [1 - R(w)^2] \int_0^{\infty} \alpha(z, w) T(z) \exp \left[- \int_0^z \alpha(z', w) dz' \right] dz, \quad (1)$$

где w — влажность почвы (вообще говоря, зависящая от глубины).

Анализ данных по температурному режиму почвы, приведенных в работе (3), показал, что температурные профили удачно аппроксимируются соотношением

$$T(z) = \{ [T'(0) + \gamma(T_0 - T_2)]z + T_0 - T_2 \} e^{-\gamma z} + T_2, \quad (2)$$

где T_0 — температура при $z = 0$; $T'(0)$ — температурный градиент у поверхности; T_2 — асимптотическое значение температуры при $z \rightarrow \infty$; γ — эмпирический параметр. По данным работы (3) летом в любое время суток $T = T_2$ уже на глубине около 40 см.

Вообще говоря, аппроксимация температурного профиля выражением (2) возможна для любого профиля, характеризуемого монотонным переходом к T_2 или обладающего одним максимумом или минимумом.

В качестве первого приближения рассмотрим случаи $\alpha = \text{const}$. Этот случай осуществляется в области длин волн, для которых коэффициент поглощения достаточно велик, чтобы на расстоянии эффективной глубины проникновения излучения в почву ($0 < z < 1/\alpha$) влажность, а вместе с ней и коэффициент поглощения не успевали заметно изменяться (случай пустынь и засушливых степей является примером условий, когда учет влияния влажности может быть вообще несущественным).

Выполняя интегрирование в (1) с учетом (2), получим

$$T_{\text{я}} = \left[\frac{T'(0)}{\alpha(1 + \gamma/\alpha)^2} + \frac{\gamma}{\alpha} \frac{T_0 - T_2}{(1 + \gamma/\alpha)^2} + \frac{T_0 - T_2}{1 + \gamma/\alpha} + T_2 \right] (1 - R^2). \quad (3)$$

Покажем теперь, как, измеряя радиояркостную температуру на нескольких длинах волн, можно определить влажность и параметры температурного профиля.

Рассмотрим область длин волн, для которых $\gamma/\alpha \ll 1$. В этом случае уравнение (3) принимает вид

$$T_{\text{я}} = (1 - R^2) \left[\frac{T'(0)}{\alpha} \left(1 - 2 \frac{\gamma}{\alpha} \right) + T_0 \right]. \quad (4)$$

Таким образом, в рассматриваемой области длин волн радиояркостная температура определяется величинами температуры и ее градиента на поверхности, но не зависит от асимптотического значения температуры.

Поскольку коэффициент отражения R является сложной функцией влажности, для его определения, а также нахождения трех других неизвестных величин w , γ и $T'(0)$ (T_0 можно считать заданным) необходимо располагать данными измерений радиояркостной температуры на четырех близких длинах волн, коэффициенты поглощения на которых удовлетворяют неравенству $\gamma/\alpha \ll 1$. Рассмотрим систему четырех уравнений:

$$T_{\text{я}i} = [1 - R^2(w)] \left[\left(1 - 2 \frac{\gamma}{\alpha_i(w)} \right) \frac{T'(0)}{\alpha_i(w)} + T_0 \right], \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (5)$$

Один из возможных способов решения этой нелинейной относительно искомых величин системы уравнений состоит в следующем.

Составим выражения для трех величин

$$\frac{T_{\text{я}1} - T_{\text{я}k}}{T_{\text{я}k}} = \frac{T'(0)}{T_0} \left[\left(1 - 2 \frac{\gamma}{\alpha_1} \right) \frac{1}{\alpha_1} - \left(1 - 2 \frac{\gamma}{\alpha_k} \right) \frac{1}{\alpha_k} \right], \quad k = 2, 3, 4. \quad (6)$$

Исключив из них $T'(0)$, получим равенства:

$$\begin{aligned} 2\gamma \left(\frac{1}{\alpha_2} - \frac{1}{\alpha_3} \right) &= 1 - \frac{(T_{\text{я}1} - T_{\text{я}2})}{(T_{\text{я}1} - T_{\text{я}3})} \frac{T_{\text{я}3}}{T_{\text{я}2}} \frac{(\alpha_3 - \alpha_1) \alpha_2}{(\alpha_2 - \alpha_1) \alpha_3}, \\ 2\gamma \left(\frac{1}{\alpha_2} - \frac{1}{\alpha_4} \right) &= 1 - \frac{(T_{\text{я}1} - T_{\text{я}2})}{(T_{\text{я}1} - T_{\text{я}4})} \frac{T_{\text{я}4}}{T_{\text{я}2}} \frac{(\alpha_4 - \alpha_1) \alpha_2}{(\alpha_2 - \alpha_1) \alpha_4}. \end{aligned} \quad (7)$$

Исключив γ , найдем окончательно

$$(\alpha_2 - \alpha_3)(\alpha_1 - \alpha_4)(T_{\text{я}2}T_{\text{я}3} + T_{\text{я}1}T_{\text{я}4}) + (\alpha_2 - \alpha_4)(\alpha_3 - \alpha_1) \times \\ \times (T_{\text{я}2}T_{\text{я}4} + T_{\text{я}1}T_{\text{я}3}) + (\alpha_3 - \alpha_4)(\alpha_1 - \alpha_2)(T_{\text{я}3}T_{\text{я}4} + T_{\text{я}1}T_{\text{я}2}) = 0. \quad (8)$$

Подставляя известные линейные зависимости α_i от влажности $\alpha_i = \alpha_i(w)$ (1), приходим к квадратному уравнению для определения влажности грунта. Восстанавливая значения коэффициентов поглощения α_i , вычислим параметр температурного профиля γ по любому из двух соотношений (7). Наклон кривой $T'(0)$ можно теперь определить по любому из трех уравнений (6). Наконец, R находится из уравнений (5).

Таким образом, по измеренным четырем значениям радиояростной температуры в области длин волн, для которых $\gamma/\alpha \ll 1$, при условии задания T_0 (величину T_0 можно получить по данным измерений в инфракрасном диапазоне) и зависимости коэффициентов поглощения от влажности на этих длинах волн простым образом можно определить влажность почвы и температурный градиент у поверхности, коэффициент отражения поверхности и экспоненциальный множитель температурного профиля. Отметим, что необходимые данные для решения такого рода задачи имеются в настоящее время только для длин волн 60; 10; 3,3 см и двух видов почв (см. (1)).

Рассмотренный выше случай $\gamma/\alpha \ll 1$ имеет место при сильном поглощении. Оценки по данным работы (1) показывают, что при влажности, превышающей 6%, неравенство $\gamma/\alpha \ll 1$ выполняется в области длин волн около 3 см. При более низкой влажности зондирование следует проводить на более коротких длинах волн.

Второй предельный случай больших длин волн, для которых $\gamma/\alpha \gg 1$, дает возможность определить асимптотическое значение температурного профиля T_2 из равенства

$$T_{\text{я}} = (1 - R^2) \left[T_2 + 2 \frac{\alpha}{\gamma} (T_0 - T_2) + \frac{\alpha^2}{\gamma^2} \frac{T'(0)}{\alpha} \right]. \quad (9)$$

Это случай слабого поглощения, и, естественно, основной вклад в радиояростную температуру дают слои при температуре T_2 .

При условии $\alpha = \text{const}$ из одного измерения $T_{\text{я}}$ определяется T_2 . Неравенство $\gamma/\alpha \gg 1$ выполняется для длин волн дециметрового диапазона. Например, для длины волны 60 см при изменении влажности от 3 до 12% γ/α изменяется примерно от 60 до 15.

Отметим, что если коэффициент поглощения настолько мал, что поправками к T_2 в формуле (9) можно пренебречь, т. е.

$$T_{\text{я}} = (1 - R^2) T_2, \quad (10)$$

то $T_{\text{я}}$ не зависит от коэффициента поглощения, что обусловлено изотермичностью профиля на больших глубинах, и выражение (10) справедливо для коэффициента поглощения, изменяющегося с глубиной. Таким образом, предлагаемый метод позволяет в приближении $\alpha = \text{const}$, избегая громоздких вычислений, определить с помощью небольшого числа измерений основные характеристики состояния поверхностного слоя почвы: влажность и параметры температурного профиля. Поскольку данные таких измерений относятся к длинам волн, расположенным в области окон прозрачности атмосферы, это облегчает практическое решение задачи дистанционного зондирования с любых высот.

Главная геофизическая обсерватория
им. А. И. Воейкова
Ленинград

Поступило
4 VI 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ю. И. Лещинский, В. М. Ананских, Г. Н. Лебедева, Тр. Моск. физ.-техн. инст., в. 10 (1962). ² Л. Т. Тучков, Естественные шумовые излучения в радиоканалах, М., 1968. ³ П. А. Воронцов, Т. А. Огнева, Н. В. Серова, Тр. Главн. геофиз. obs., в. 107 (1961). ⁴ M. J. Campbell, J. Ulrichs, J. Geophys. Res., 74, 25 (1969).