

Член-корреспондент АН СССР К. Я. КОНДРАТЬЕВ, В. В. МЕЛЕНТЬЕВ,
Ю. И. РАБИНОВИЧ, Е. М. ШУЛЬГИНА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЧВЫ ПО РАДИОТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

В настоящее время широкое развитие получили косвенные методы определения физических характеристик системы атмосфера — Земля. В частности, методы пассивной радиолокации основаны на интерпретации данных измерений собственного теплового излучения атмосферы и подстилающей поверхности с целью извлечения информации об их физических характеристиках. Для целей дистанционного зондирования почвы наиболее интересен сантиметровый диапазон длин волн, в связи с тем, что: 1) в этом диапазоне атмосфера практически прозрачна для излучения почвы и это делает возможным дистанционное измерение ее излучения (радиояркостной температуры T_{π}); 2) излучение почвы формируется в некотором достаточно протяженном слое. Поэтому существует теоретическая возможность извлечения информации о физических характеристиках этого слоя, влияющих на излучение, из измерений радиояркостной температуры на нескольких длинах волн.

Радиояркостная температура T_{π} почвы, измеренная в направлении нормали, определяется следующим образом:

$$T_{\pi} = \Sigma(w) \int_0^{\infty} \alpha(w, z) T(z) \exp\left(-\int_0^z \alpha(z', w) dz'\right) dz, \quad (1)$$

где $\Sigma(w)$ — излучательная способность почвы, $\alpha(w, z)$ — коэффициент поглощения, $T(z)$ — температурный профиль, w, z — влажность почвы и вертикальная координата соответственно.

Излучательная способность почвы зависит как от ее свойств (состав почвы, ее электрические параметры, особенности их распределения по глубине), так и от характеристик поверхности раздела (гладкость или шероховатость, наличие покровов). Для гладкой поверхности или поверхности, радиус шероховатостей которой много больше длины волны, коэффициент излучения может быть определен через коэффициент зеркального отражения $R(w)$:

$$\Sigma(w) = 1 - |R(w)|^2. \quad (2)$$

Нами были получены выражения для коэффициентов отражения линейно-неоднородной по глубине почвы. Анализ этих выражений показал, что для реальных почв влияние неоднородности на коэффициенты излучения невелико и в первом приближении коэффициенты отражения почвы можно рассчитывать по формулам Френеля (лишь при больших длинах волн, порядка 60 см, для почв, имеющих сухую поверхность, влияние неоднородности существенно). Коэффициент излучения определяется вещественной диэлектрической проницаемостью среды ϵ , которая в случае песка и глины линейно возрастает с увеличением влажности так же, как и коэффициент поглощения (¹).

Таким образом, радиояркостная температура почвы является функционалом как температуры, так и влажности. Поэтому в общем случае задачей дистанционного зондирования должно быть исследование как характеристик влагосодержания, так и температурного режима почвы.

Таблица 1

Вид поверхности	Краткое описание	λ , см	Σ
Песок	Речной, сухой, средней крупности; поверхность ровная, толщина слоя 25 см	1,6 0,8	0,933 0,939
Песок	Речной, мокрый, поверхность ровная, толщина слоя 25 см	3,2 1,6	0,749 0,769
Песок	Речной		
	влажность $w = 3,4\%$	3,2	0,927
	» $w = 10\%$	3,2	0,703
	» $w = 14,5\%$	3,2	0,655
Песок	Сухой, пылеватый	3,2	0,884
Щебень	Известняк крупный, толщина слоя 25 см	3,2	0,877
Травяной покров	Сухой, высота травы 15—20 см, толщина слоя почвы 20 см	3,2 1,6	0,935 0,961
Травяной покров	Мокрый, высота травы 15—20 см, толщина слоя почвы 20 см	3,2	0,890
Снежный покров	Поверхность ровная, плотность 0,58 г/см ³	0,8	0,944

В работах (², ³) обсуждаются возможности решения частной задачи определения температуры почвы при известной влажности. Оказалось, что при ошибке измерения радиояростной температуры, равной $0,5^\circ\text{K}$, возможно восстановление температурного профиля с хорошей точностью ($1-3^\circ$). Для решения задачи восстановления температурного профиля в почве необходимо либо независимое определение влажности с точностью порядка 1%, либо комплексное решение задачи о восстановлении температурных и влажностных характеристик.

При комплексной постановке задачи вариации радиояростной температуры δT_π определяются изменениями всех переменных параметров уравнения (1):

$$\delta T_\pi \approx A_\Sigma \delta \Sigma(w_0) + A_T \delta T + A_w \delta w. \quad (3)$$

Для оценки δT_π и влияния неизвестных параметров физического состояния почвы нами было получено аналитическое выражение радиояростной температуры слоя почвы при линейном с глубиной изменении температуры и влажности, с выходом температуры на постоянное значение на некоторой глубине:

$$T_\pi = \Sigma \left\{ T_0 + \frac{\overline{dT}}{dz} \exp \left(\frac{\alpha_0}{2a} \right)^2 \times \left[\frac{\alpha_1}{a} \Phi \left({}^{1/2}, {}^{3/2}, -\frac{\alpha_1^2}{2a} \right) - \frac{\alpha_0}{a} \Phi \left({}^{1/2}, {}^{3/2}, -\frac{\alpha_0^2}{2a} \right) \right] \right\}, \quad (4)$$

где T_0 — температура на поверхности почвы, которая может быть определена по данным инфракрасных измерений, $\overline{dT}/dz$ — средний градиент температуры, α_0 и α_1 — коэффициент поглощения почвы у поверхности и на той глубине, начиная с которой температуру почвы можно считать постоянной, a — градиент коэффициента поглощения, $\Phi({}^{1/2}, {}^{3/2}, x)$ — вырожденная гипергеометрическая функция.

Анализ выражения (4) показывает, что возможности восстановления характеристик влажности зависят от степени неизотермичности температурного профиля. Очевидно, что в случае изотермии возможно лишь определение влажности приповерхностного слоя, определяющей излучательную способность почвы (⁴).

В передельных случаях больших (сантиметровые волны) и малых (дециметровые волны) величин параметров $\alpha_0^2/(2a)$ и $\alpha_1^2/(2a)$ имеем

$$T_\pi = \begin{cases} \Sigma(T_0 + T'/\alpha_0), & \alpha_0^2, \alpha_1^2/(2a) \gg 1, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Sigma T_\infty, & \alpha_0^2, \alpha_1^2/(2a) \ll 1, \end{cases} \quad (6)$$

где T' — температурный градиент у поверхности, T_{∞} — постоянное значение температуры на больших глубинах. Следует отметить, что аппроксимация профиля влажности экспонентой приводит к таким же предельным случаям.

Численный эксперимент для ряда реальных профилей температуры и влажности подтвердил данные «модельных» расчетов и позволил сделать следующие выводы:

1. Радиояркая температура почвы наиболее сильно зависит от температуры поверхности и излучательной способности почвы, которая определяется влажностью приповерхностного слоя. Так, например, вариации T_{π} из-за изменения влажности от 3 до 8% достигают 30–40° в зависимости от длины волны, в то время как контрасты T_{π} в результате изменения глубинного профиля влажности или температуры почвы меньше на порядок величины.

2. При независимом определении T_0 (например, по инфракрасному излучению) и Σ в дециметровом диапазоне возможно определение постоянного значения температурного профиля на больших глубинах T_{∞} , а в сантиметровом — оценки градиента температуры T' у поверхности.

Поскольку методика дистанционных измерений температуры поверхности известна, рассмотрим кратко проблему определения излучательной

способности. Для изучения зависимости радиоизлучения естественных поверхностей от их состояния, температуры и влажности была разработана методика лабораторных измерений излучательной способности, которая позволяет измерить коэффициенты излучения различных поверхностей в строго контролируемых условиях⁽³⁾. В лабораторных условиях для различных температур и влажностей были выполнены измерения коэффициентов излучения образцов почв, результаты которых сопоставлялись с расчетами.

На рис. 1 представлены расчетные кривые излучательной способности песка и глины в зависимости от влажности, полученные по изложенной выше методике. Как видно из рис. 1, излучательная способность песка является сильно меняющейся характеристикой. При увеличении влажности от 3 до 15% излучательная способность уменьшается от 0,93 до 0,65. Как

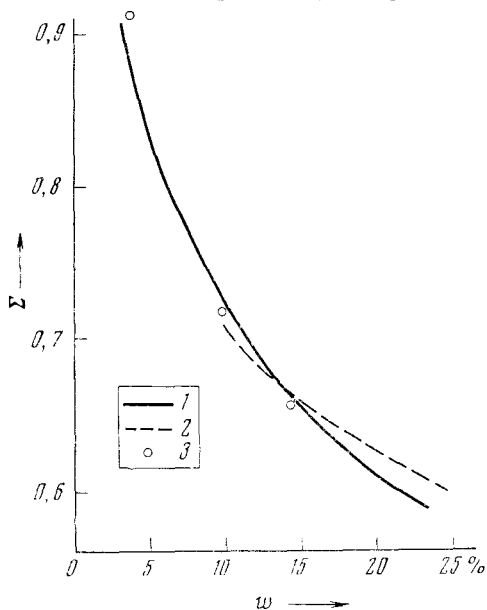


Рис. 1. Зависимость излучательной способности от влажности на длине волны 3,2 см. 1 — песок, 2 — глина, 3 — экспериментальные значения для песка

известно, величина полной влагоемкости песчано-подзолистых почв составляет около 20–25%, излучательная способность при этом на длине волны 3,2 см оказывается равной 0,61. Таким образом, и эксперимент, и расчет указывают на сильную зависимость собственного излучения песка от его влажности, контрасты радиоярких температур за счет изменения излучательной способности составляют несколько десятков градусов.

Для изучения возможностей дистанционной индикации характеристик поверхностного слоя были выполнены исследования излучательных свойств различных реальных покровов (табл. 1) в диапазоне длин волн 0,8–3,2 см. Данные по излучательной способности в этой таблице получе-

ны путем осреднения большого числа однородных измерений. Измерения показали, что излучательная способность исследованных образцов изменяется довольно значительно. Исследована также зависимость Σ от длины волны λ для мокрого и сухого песка и при этом обнаружено, что с увеличением длины волны отражение увеличивается. Влияние влажности на всех длинах волн одинаково: излучательная способность грунта уменьшается с повышением содержания воды. Измерения коэффициента излучения двух видов сухого песка, средней крупности и пылеватого, показали, что излучательная способность составляет соответственно 0,93 и 0,88. Таким образом, обнаружено некоторое различие в излучательной способности, связанное, по-видимому, с различием в структуре выбранных образцов.

В исследованиях последних лет указывалось на влияние образования пены и пленок органических веществ на радиоизлучение морской поверхности. По величине вклада пены в радиоизлучение можно определять параметры ветрового волнения, по изменению радиояркостной температуры моря при образовании пленок нефтяных продуктов — степень загрязнения морской поверхности. Чтобы оценить влияние пены и органических пленок на радиоизлучение, были выполнены лабораторные измерения образцов пены, пленок керосина и масла на водной поверхности. Радиояркостная температура водной поверхности, покрытой пленками керосина и масла, увеличивается на 10–30° K, при нанесении же образцов искусственной пены на поверхность воды этот прирост достигает 140–150° K при измерениях на длине волны 3,2 см.

Таким образом, экспериментальное исследование излучения различных типов подстилающей поверхности подтвердило теоретические выводы о перспективности индикации характеристик поверхностного слоя почвы дистанционными методами с использованием средств радиотеплолокации.

Главная геофизическая обсерватория
им. А. И. Воейкова
Ленинград

Поступило
22 V 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Ю. И. Лещанский, В. М. Ананских, Г. Н. Лебедева, Тр. Моск. физ.-техн. инст., в. 10 (1962). ² К. Я. Кондратьев, Ю. М. Тимофеев, Е. М. Шульгина, ДАН, 194, № 6 (1970). ³ К. Я. Кондратьев, Е. М. Шульгина, ДАН, 200, № 1 (1971). ⁴ А. Е. Башаринов, А. М. Шутко, Метеорология и гидрология, 9 (1971). ⁵ Ю. И. Рабинович, В. В. Мелентьев, Тр. Гл. геофиз. обсерв., в. 252 (1970).