

ISSN 0021-3462

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ



РАДИОФИЗИКА

1991

ТОМ 34

4

ИЗДАНИЕ НИЖЕГОРОДСКОГО УНИВЕРСИТЕТА И
НАУЧНО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
РАДИОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

УДК 621.371:551.526

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА ПО ТЕПЛОВОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ
ПОЛУПРОСТРАНСТВА СО СТАЦИОНАРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ

К. П. Гайкович

Получено уравнение для яркостной температуры теплового излучения полупространства, выражающее ее зависимость от глубинного распределения тепловых источников. Показано, что на основе этого уравнения можно решать задачи восстановления как распределения тепловых источников, так и подповерхностного профиля температуры. Возможности развитого подхода показываются на примере восстановления параметров промерзшего слоя грунта по его радиотепловому излучению.

С развитием средств и методов радиометрии все большее внимание привлекают возможности подповерхностного зондирования различных сред (почвогрунтов, водных и биологических сред) на основе измерения спектра их радиотеплового излучения. Такого рода задачи рассматривались, в частности, в [1-7]. В ряде ситуаций плодотворным оказался подход, основанный на совместном решении уравнений переноса излучения и теплопроводности, позволивший получить термозволюционные уравнения [5,7], устанавливающие прямые соотношения между эволюцией граничных условий на поверхности (температуры или теплового потока) и динамикой наблюдаемых яркостных температур. Используя введенную в анализ временную зависимость, оказалось возможным сформулировать и решить ряд задач, связанных с восстановлением подповерхностного профиля, тепловой истории и определением параметров излучающего полупространства [5,7].

В данной работе мы рассмотрим другой, но близкий по смыслу случай, когда распределение температуры в полупространстве стационарно и существуют распределенные по глубине тепловые источники. Такого рода задачи возникают при зондировании биологических тканей, при наличии в среде тепловых источников иной природы, например, областей, в которых происходит фазовый переход.

1. Теоретический анализ. Рассмотрим модель плоского полупространства $z \leq 0$ с коэффициентами поглощения γ и теплопроводности k . Пусть функция тепловых источников $\dot{W}(z)$ зависит только от глубины. В этом случае одномерное уравнение теплопроводности имеет вид

$$k(d^2T/dz^2) = \dot{W}(z). \quad (1)$$

Яркостная температура теплового излучения при измерениях в надир удовлетворяет известному соотношению

$$T_{\text{я}}(\lambda) = (1 - R) \int_{-\infty}^0 T(z) \gamma(\lambda) e^{\gamma z} dz. \quad (2)$$

где R - коэффициент отражения на границе полупространства (в

дальнейшем для простоты полагаем $R = 0$).

Дважды выполняя интегрирование по частям в (2), имеем

$$T_{\text{я}}(\lambda) = T(0) - \frac{1}{\gamma} \frac{dT}{dz}(0) + \int_{-\infty}^0 \frac{d^2T}{dz^2} \frac{1}{\gamma} e^{\gamma z} dz. \quad (3)$$

Подставляя (1) в (3), получаем соотношение

$$T_{\text{я}}(\lambda) = T(0) - \frac{1}{\gamma} \frac{dT}{dz}(0) + \frac{1}{\gamma k} \int_{-\infty}^0 W(z) e^{\gamma z} dz. \quad (4)$$

Учитывая далее, что тепло может переходить только через верхнюю границу, для потока тепла J через поверхность $z = 0$ получаем

$$J = k \frac{dT}{dz}(0) = \int_{-\infty}^0 W(z) dz. \quad (5)$$

Подставляем (5) в (4), тогда имеем искомое соотношение

$$T_{\text{я}}(\lambda) = T(0) + \frac{1}{\gamma k} \int_{-\infty}^0 W(z) (e^{\gamma z} - 1) dz. \quad (6)$$

Если использовать другую возможность выбора пределов при интегрировании по частям, то легко получить аналог выражения (6), но вместо $T(0)$ туда войдет температура глубоких слоев $T(-\infty)$, что в ряде случаев может оказаться более удобным:

$$T_{\text{я}}(\lambda) = T(-\infty) - \frac{1}{k} \int_{-\infty}^0 W(z) \left[\frac{1}{\gamma} (e^{\gamma z} - 1) - z \right] dz. \quad (7)$$

Уравнения (6), (7) представляют собой интегральные уравнения Фредгольма 1-го рода относительно функции источников $W(z)$ (поверхностная температура может быть измерена контактным способом или в ИК диапазоне). Как известно [7], решение этого уравнения является некорректной задачей и требует привлечения достаточной априорной информации о функции $W(z)$. На основе восстановленного распределения $W(z)$ путем интегрирования (1) можно восстановить подповерхностный температурный профиль $T(z)$. Возникает естественный вопрос, в чем преимущество рассматриваемого подхода по сравнению с решением аналогичной задачи (2) непосредственно для $T(z)$, как это сделано, например, в [4]. Дело в том, что априорная информация о функции $W(z)$, в частности о локализации тепловых источников, может быть более доступной и иметь более удобный вид, чем для распределения $T(z)$, особенно когда источники занимают небольшой интервал глубин. Именно такая ситуация имеет место в случае, когда зондируется промерзший слой грунта и источники тепла локализованы в зоне фазового перехода. Глубина зоны перехода изменяется весьма медленно, поэтому задача квазистационарна.

2. Определение параметров промерзшего слоя грунта по радиометрическим данным. В феврале - марте 1987 г. были выполнены измерения теплового излучения глинисто-песчаной почвы на длинах волн 3; 9 и 13 см. При измерениях антенная система располагалась под плоским металлическим экраном для компенсации отражения ($R = 0$). Одновременно выполнялись контактные измерения $T(z)$ Глубина промерзшего слоя за время измерений менялась от 95 до 105 см. Результаты восстановления $T(z)$ на основе уравнения (2) и оценки

параметров грунта изложены нами в [5,6].

Рассмотрим возможности анализа полученных данных на основе уравнения (6). Пренебрежем толщиной и движением зоны фазового перехода, тогда функция тепловых источников может быть представлена в виде

$$W(z) = A\delta(z^*). \quad (8)$$

Подставляя (8) в (6), имеем

$$T_{\text{я}} = T(0) + (A/\gamma k) (e^{\gamma z^*} - 1). \quad (9)$$

Подставляя (8) в (7), можно получить аналогичное выражение для случая, когда известно значение $T(-\infty)$.

Из (9) можно определить мощность источника тепла в зоне фазового перехода

$$A = \frac{(T_{\text{я}} - T(0))\gamma k}{e^{\gamma z^*} - 1} \quad (10)$$

или, выбирая длину волны достаточно малой, так что $(-\gamma z^*) \gg 1$,

$$A = \gamma k (T(0) - T_{\text{я}}). \quad (11)$$

Из (11) находим, что градиент температуры в промерзшем слое

$$\frac{dT}{dz} = \begin{cases} A/k, & z \geq z^* \\ 0, & z < z^* \end{cases} \quad (12)$$

и профиль температуры

$$T(z) = \begin{cases} T(0) - (A/k)z, & z \geq z^* \\ 273 \text{ K}, & z < z^* \end{cases} \quad (13)$$

Из (11) и (13) находим глубину промерзания

$$z^* = (T(0) - 273,15) k/A. \quad (14)$$

На рис. 1 представлены заимствованные из [6] результаты измерения промерзшего грунта для двух дней наблюдения (точки - контактные измерения температуры в зависимости от глубины; звездочки - яркостные температуры почвы на длинах волн $\lambda = 3; 9$ и 13 см, представленные в зависимости от глубины скин-слоя $d = 1/\gamma(\lambda)$; сплошные - профили $T(z)$ из (13), на основе которых сделаны оценки z согласно (14)). С учетом параметров грунта [6,8] для сухого грунта получаем оценку $k \approx 2 \cdot 10^{-3}$ кал/см град с. Также на основе полученных в [6] данных мы имеем $\gamma \approx 31/\lambda$ см⁻¹. Из (11) по значениям $T_{\text{я}}$

($\lambda = 13$ см) и $T(0)$ (см. рис. 1) определяем мощность источника тепла в зоне фазового перехода

$$A = \begin{cases} -4,7 \cdot 10^{-5} \text{ кал/см}^2\text{с} & (16.02.87) \\ -1,2 \cdot 10^{-4} & (24.02.87) \end{cases}$$

а из (14) - оценку глубины промерзания

$$z^* = \begin{cases} 79 \text{ см} & (16.02.87) \\ 89 \text{ см} & (24.02.87) \end{cases}$$

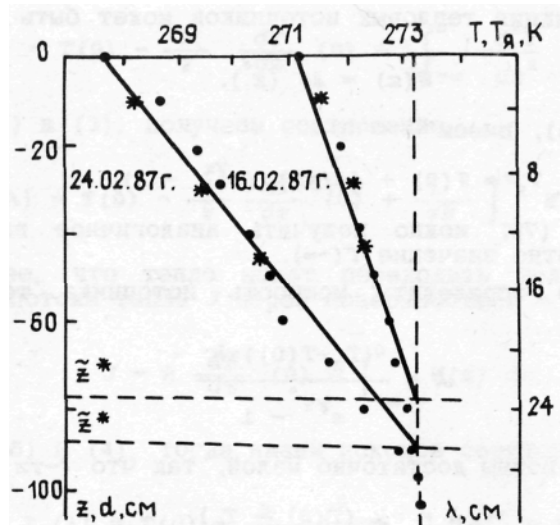


Рис. 1.

Учитывая, что с 16 по 24.02 происходило постепенное понижение температуры, примем за среднее значение скорости выделения тепла при замерзании воды $A = 8 \cdot 10^{-5}$ кал/см²с. Тогда через сечение 1 см² за 8 суток было выделено количество тепла $Q \approx 52$ кал и, следовательно, замерзла масса жидкой воды $m \approx 0,65$ г. За это время глубина промерзания увеличилась примерно на 10 см, что позволяет сделать оценку объемного влагосодержания грунта $W_{H_2O} \approx 6,5\%$.

Отметим роль снежного покрова при измерениях: с одной стороны, сухой снежный покров прозрачен в СМ диапазоне и не препятствует измерениям излучения почвы, с другой - благодаря малой теплопроводности он стабилизирует температуру поверхности грунта, что обеспечивает применимость условия стационарности $T(z)$ с хорошей точностью.

Итак, в случаях, когда источник тепла локализован на некоторой плоской поверхности, уравнения (6), (7) имеют точное решение. В случае распределенных источников решение может быть найдено методами, развитыми в [3, 4, 6] для решения аналогичной неоднородной задачи восстановления температурного профиля.

На основе полученных уравнений, выражающих зависимость яркостной температуры полупространства от распределения тепловых источников по глубине, выполнен анализ данных измерений теплового радиоизлучения промерзшего грунта. Получены оценки глубины промерзания и скорости выделения скрытого тепла в зоне фазового перехода, а также на основе данных о средней скорости увеличения толщины промерзшего слоя определена его влажность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шутко А.М. СВЧ радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. -М.: Наука, 1986. - 190 с.

2. Кондратьев К. Я., Тимофеев Ю. М., Шульгина В. М. // ДАН СССР. 1970. Т. 194. N 6. С. 1313.
3. Гайкович К. П., Резник А. Н. и др. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. N 7. С. 761.
4. Гайкович К. П., Сумин М. И., Троицкий Р. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. N 9. С. 1104.
5. Гайкович К. П., Резник А. Н. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. N 11. С. 1343.
6. Гайкович К. П., Резник А. Н., Троицкий Р. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1989. Т. 33. N 12. С. 1467.
7. Тихонов А. Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. - М. :Наука, 1979. - 288 с.
8. Чудновский А. Ф. Теплофизика почв. - М. :Наука, 1976. -497 с.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
20 февраля 1990 г.

DETERMINATION OF HEAT SOURCES BY THERMAL EMISSION OF
HALFSPACE WITH STATIONARY TEMPERATURE DISTRIBUTION

K.P. Gaikovich

The equation for half-space brightness temperature relation with depth distribution of heat sources is derived. It is shown that on the basis of the equation it is possible to solve both the problems of retrieval the heat sources distribution and subsurface temperature profile. The fitness of those methods are shown for the case of the retrieval of frozen soil parameters from its thermal radio emission.