

# Определение констант диэлектрической модели почв с помощью микроволнового радиометрического метода

П.П. Бобров<sup>1</sup>, В.Л. Миронов<sup>2</sup>, А.С. Яценко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Омский государственный педагогический университет

644099, Омск, наб. Тухачевского, 14

E-mail: [bobrov@omgpi.ru](mailto:bobrov@omgpi.ru)

<sup>2</sup> Институт физики им Л.В. Куренского СО РАН

660036, Красноярск, Академгородок

E-mail: [rsdvm@ksc.krasn.ru](mailto:rsdvm@ksc.krasn.ru)

Изложена методика определения одной из констант рефракционной диэлектрической модели почв – максимального количества связанной воды в почве по данным двух измерений коэффициента излучения почвы в сантиметровом диапазоне до начала промерзания и после промерзания на глубину, превышающую глубину зондирования. Другие константы определены в результате регрессионного анализа литературных данных.

Дистанционный радиофизический способ определения влажности почв основан на зависимости дистанционно измеряемого коэффициента собственного радиотеплового излучения почвы в микроволновом диапазоне электромагнитных волн от ее влажности [1], поскольку от влажности зависит диэлектрическая проницаемость почв и, как следствие – коэффициент излучения. Влажность дистанционным способом определяется с помощью радиационно-влажностной зависимости (зависимости коэффициента излучения от влажности). Однако вследствие различия в диэлектрических характеристиках почв крутизна радиационно-влажностной зависимости изменяется от поля к полю, от одного региона к другому в 1,5–2 раза, поэтому данный способ не обеспечивает достаточной точности измерения влажности.

Радиационно-влажностные зависимости можно определить на основании лабораторных диэлектрических измерений и построении модели зависимости диэлектрической проницаемости почвы от влажности. К настоящему времени установлено, что наиболее подходящей является рефракционная модель диэлектрической проницаемости почвы [2], одним из параметров которой является максимальное содержание связанной воды  $W_t$ .

Если почва содержит некоторую объёмную долю свободной воды  $W_u = W - W_t$ , где  $W$  – полная объёмная влажность, то комплексный показатель преломления  $\dot{n} = \sqrt{\epsilon} = n + j\kappa$  незамерзшей почвы можно определить следующим образом:

$$n_1 = n_t + (n_u - 1) \cdot W_u, \quad \kappa_1 = \kappa_t + \kappa_u \cdot W_u \quad (1)$$

где  $n_t$  и  $\kappa_t$  – действительная и мнимая части показателя преломления почвы при влажности почвы, равной  $W_t$ ;  $n_u$ ,  $\kappa_u$  – действительная и мнимая части показателя преломления свободной воды.

В разных типах почв максимальное содержание связанной влаги  $W_t$  различно, различны также соответствующие значения показателей преломления и поглощения  $n_t$  и  $\kappa_t$ . Для решения поставленной задачи потребовалось установить зависимости показателей преломления и поглощения  $n_t$  и  $\kappa_t$  от  $W_t$ . В результате анализа литературных данных о диэлектрических свойствах почв, различающихся органо-минеральным и гранулометрическим составом, отобранных в различных климатических зонах России и США [3-6], найдено, что между показателем преломления и максимальным содержанием связанной воды имеется высокая корреляция (рис. 1). Эту связь можно выразить в виде уравнений линейной регрессии  $n_t = n(W_t, f)$  и  $\kappa_t = \kappa(W_t, f)$ , где  $f$  – частота электромагнитного излучения. Частотная зависимость в уравнениях регрессии связана с частотной дисперсией комплексного показателя преломления связанной воды. Для иллюстрации частотной зависимости ниже приведены найденные уравнения регрессии, имеющие вид для частоты 1,67 ГГц:

$$n_t = 5,21 \cdot W_t + 1,66, \quad \kappa_t = 0,77 \cdot W_t + 0,12 \quad (2)$$

и для частоты 6 ГГц:

$$n_t = 4,97 \cdot W_t + 1,64, \quad \kappa_t = 0,86 \cdot W_t + 0,1. \quad (3)$$

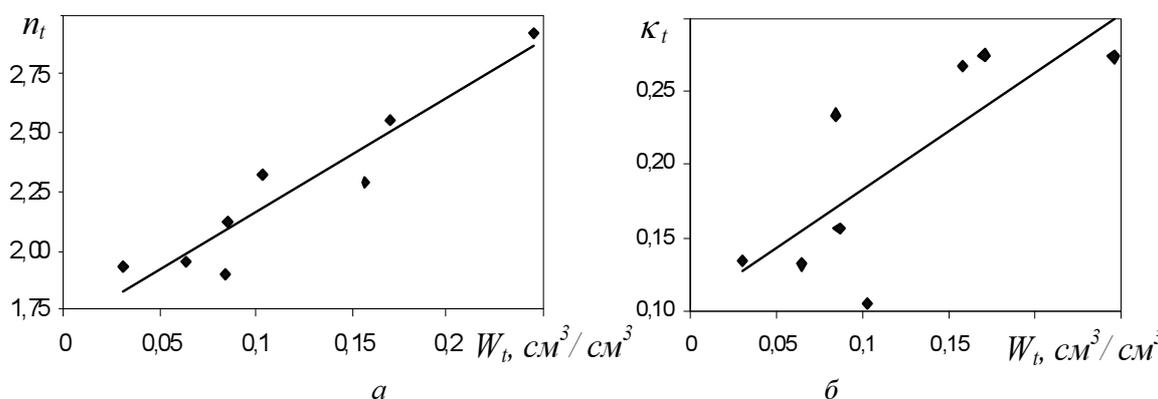


Рис. 1. Зависимости показателя преломления  $n_t$  (а) и показателя поглощения  $\kappa_t$  (б) от максимального содержания связанной воды  $W_t$  (в объемных долях) для различных типов почв на частоте 6 ГГц

Комплексный показатель преломления свободной почвенной влаги может быть найден с помощью релаксационной модели Дебая. Однако для того, чтобы значения диэлектрической проницаемости почв, рассчитанные по рефракционной модели, соответствовали экспериментальным данным, параметры модели Дебая почвенной влаги должны немного отличаться от параметров модели Дебая истинно свободной воды. В частности, статическая диэлектрическая константа для почвенной влаги при температуре 22°C должна быть равной 101 [6].

Необходимость отбора почвенных образцов и определения в лабораторных условиях максимальной доли связанной воды для каждого поля диэлектрическим методом ввиду трудоемкости этого процесса не позволяет охватить измерениями влажности больших территорий. С каждого поля берется лишь небольшое количество образцов. При этом не достигается нужной представительности данных, так как свойства почв могут изменяться даже в пределах одного поля. Кроме того, при отборе образцов нарушается естественная структура почвы и ее плотность. Поэтому даже построенная на основе лабораторных измерений радиационно-влажностная зависимость отличается от реальной для данного конкретного поля, что приводит к снижению точности определения влажности.

Задачу определения параметра  $W_t$  можно решить путем дистанционных измерений, если определить коэффициенты собственного радиотеплового излучения почвы до промерзания и после промерзания на глубину, превышающую глубину зондирования.

В незамерзшей почве, когда влажность почвы  $W$  больше, чем  $W_b$ , часть влаги находится в связанном состоянии, а часть – в свободном, ее объемная доля равна  $W_u = W - W_t$ . При замерзании почвы свободная вода превращается в лед, диэлектрическая проницаемость которого в микроволновом диапазоне постоянна. При этом в почве существует незамёрзшая связанная вода в количестве, равном  $W_b$ , диэлектрическая проницаемость которой почти не изменяется при изменении температуры от +20 Сe до -5 Сe [2]. Таким образом, при замерзании почвы изменяется диэлектрическая проницаемость только одного компонента почвенной смеси – свободной влаги.

В случае промерзшей почвы комплексный показатель преломления определяют из соотношений, также полученных из рефракционной модели:

$$n_2 = n_t + (n_c - 1) \cdot W_c, \quad \kappa_2 = \kappa_t + \kappa_c \cdot W_c, \quad (4)$$

где  $n_c=1,77$  – действительная часть коэффициента преломления льда;  $\kappa_c=0,028$  – мнимая часть;  $W_c=\rho \cdot W_u$  – объемная доля льда;  $\rho=1,09$  - отношение плотности воды к плотности льда.

В эксперименте коэффициент излучения измеряют как отношение:

$$\chi = \frac{T_{я}}{T}, \quad (5)$$

где  $T_{я}$  – радиояростная температура почвы, измеряемая дистанционно с помощью микроволнового радиометра;  $T$  – термодинамическая температура почвы, измеряемая дистанционно с помощью инфракрасного термометра. Коэффициент излучения можно определить также как

$$\chi = 1 - R, \quad (6)$$

где  $R = \left| \frac{\dot{n} - 1}{\dot{n} + 1} \right|^2$  – коэффициент отражения при вертикальном зондировании.

Из (6) может быть найдена разность коэффициентов излучения  $\chi_2$  промерзшей и  $\chi_1$  незамерзшей почвы

$$\Delta\chi = \chi_2 - \chi_1 = \left| \frac{\dot{n}_1 - 1}{\dot{n}_1 + 1} \right|^2 - \left| \frac{\dot{n}_2 - 1}{\dot{n}_2 + 1} \right|^2 \quad (7)$$

Поскольку  $n_i$  и  $\kappa_i$  входят в выражения как для  $\chi_2$ , так и для  $\chi_1$ , поэтому  $\Delta\chi$  лишь слабо зависит от этих величин, а следовательно, и от  $W_t$ , что позволяет осуществить параметризацию максимального содержания связанной воды  $W_t$ .

Из уравнений (1)-(4) и (7) могут быть получены уравнения регрессии для определения объемной доли свободной воды  $W_u$  при любом  $W_t$  как параметре. Такие уравнения для  $W_t = 0,15$  имеют вид:

$$\begin{aligned} W_u &= 2,10 \cdot \Delta\chi^2 + 0,82 \cdot \Delta\chi + 5 \cdot 10^{-4} \quad (\text{для частоты } 1,67 \text{ ГГц}), \\ W_u &= 2,0 \cdot \Delta\chi^2 + 0,81 \cdot \Delta\chi + 5 \cdot 10^{-4} \quad (\text{для частоты } 6 \text{ ГГц}) \end{aligned} \quad (9)$$

Графики этих зависимостей представлены на рис. 2.

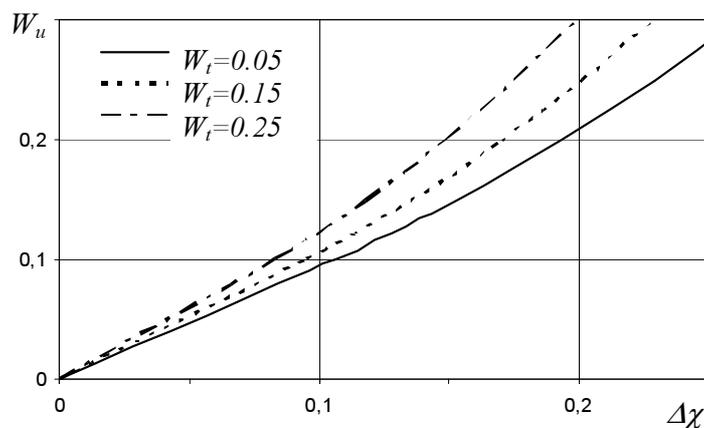


Рис. 2. Зависимости объемной доли свободной воды  $W_u$  от разности коэффициентов излучения мерзлой и незамерзшей почв на частоте 6 ГГц для разных значений максимального количества связанной воды  $W_t$  (в объемных долях)

Таким образом, по двум измеренным значениям коэффициента излучения незамерзшей и промерзшей почвы можно найти первое приближение для объемной доли свободной воды  $W_u$ , приняв в качестве нулевого приближения для  $W_t$  значение, равное среднему арифметическому из наибольшего и наименьшего значений, наблюдаемых для всех типов почв. После этого по измеренному значению коэффициента излучения промерзшей почвы

$$\chi_2 = 1 - \left| \frac{\dot{n}_2 - 1}{\dot{n}_2 + 1} \right|^2, \quad (10)$$

и по первому приближению для объемной доли свободной воды можно найти первое приближение для максимального содержания связанной воды  $W_t$ , а затем уточнить количество свободной воды  $W_u$ . Соответствующие графики, полученные с помощью выражений (1) - (3), (10), приведены на рис.3. Этот итерационный процесс можно продолжить до получения значений  $W_t$  и  $W_u$  с заданной точностью.

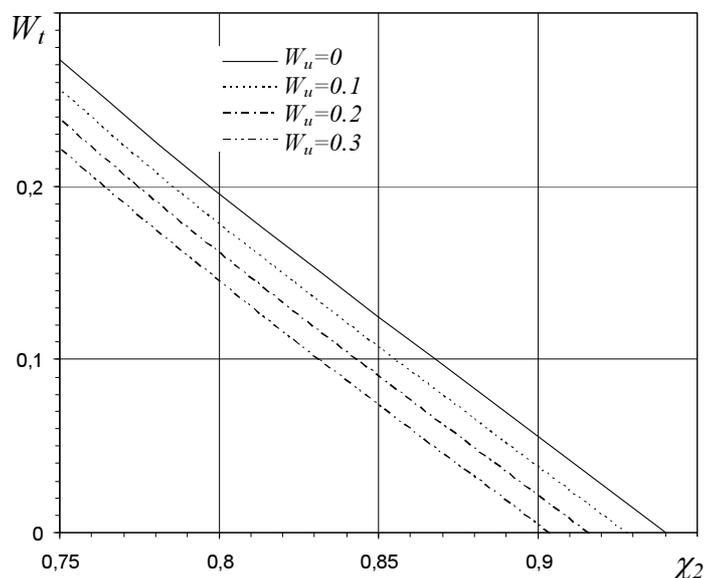


Рис. 3. Зависимости максимального содержания связанной воды  $W_t$  (в объемных долях) от коэффициента излучения мерзлой почвы  $\chi_2$  на частоте 6 ГГц при различных значениях доли свободной воды  $W_u$

Для проверки изложенной методики были проведены эксперименты по измерению коэффициента излучения на частоте 6 ГГц двух почвенных участков, различающихся содержанием гумуса и физической глины. Вследствие этого в почвах было различным максимальное содержание связанной воды  $W_t$  при почти одинаковой общей влажности. В качестве радиометра использовался серийный измеритель ПК7-20, настроенный на частоту 6 ГГц. Вид радиометрического комплекса показан на рис. 4.



Рис. 4. Радиометрический комплекс на частоты 2,7, 6 и 8,2 ГГц

Перед началом заморозка при температуре почвы от 0 до + 10°C над поверхностью выровненной, увлажнённой до влажности большей, чем  $W_l$ , почвы размещался микроволновый радиометр на высоте, достаточной для того, чтобы исследуемый участок почвы находился в волновой зоне. Антенна радиометра была направлена в надир. В соответствии с методикой радиометрических измерений были определены радиояростная температура и коэффициент излучения незамёрзшей почвы.

С началом замерзания почвы радиояростная температура возрастала, испытывая некоторые интерференционные осцилляции во времени (рис. 5), по окончании которых можно производить измерения радиояростной температуры почвы, промёрзшей на глубину большую, чем глубина зондирования. Чтобы температура поверхности почвы в процессе замерзания не опускалась ниже -5°C, для измерений необходимо использовать частоты сантиметрового диапазона, глубина зондирования на которых невелика и промерзание на эту глубину происходит быстро.

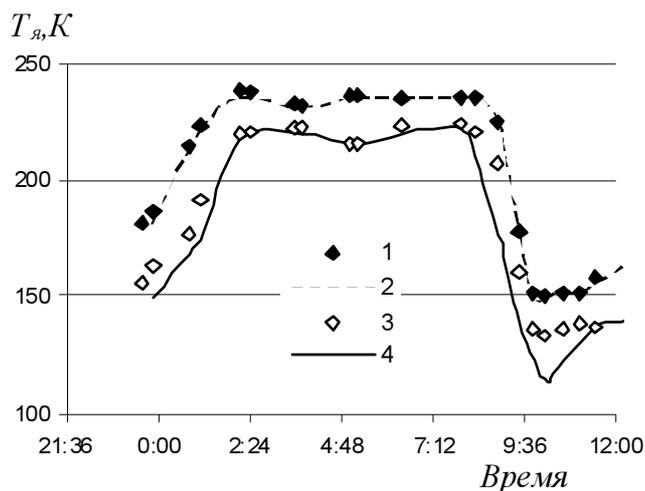


Рис. 5. Изменение радиояростной температуры почвы в процессе промерзания и последующего оттаивания. 1,2 - экспериментальные данные и рассчитанные на частоте 8,2 ГГц значения, соответственно; 3,4 - экспериментальные данные и рассчитанные на частоте 6 ГГц значения, соответственно

Измеренные значения  $T_a$  и термодинамической температуры  $T$  почвы в этот момент используются для определения коэффициента излучения  $\chi_2$  мёрзлой почвы. Результаты обработки данных эксперимента в соответствии с вышеизложенной методикой приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ участка	Кэфф. излучч. незамёрзшей почвы $\chi_1$	Кэфф. излучч. промёрзшей почвы $\chi_2$	$\chi_2/\chi_1$	$W_u$	$W_l$	$W$ радиометрическим способом	$W$ термостатно-весовым способом
1	0,714	0,813	0,099	0,10 0,105	0,16 (1-е пригл.) 0,16 (2-е пригл.)	0,265	0,27
2	0,690	0,842	0,151	0,17 0,16	0,105 (1-е пригл.) 0,11 (2-е пригл.)	0,27	0,28

Данная методика может быть использована и при установке радиометра на самолете. При этом разрешение, определяемое размерами излучающего пятна на поверхности земли, будет составлять 1-3 км. При установке радиометра на космическом аппарате разрешение составляет 10-50 км. В настоящее время разрабатываются различные методы повышения разрешающей способ-

ности спутниковых радиометров. Карты радиояркости территории, принадлежащей к одной климатической зоне, в зависимости от частоты съемки одной и той же местности могут быть получены в течение 3-5 дней. По двум картам, снятым до и после промерзания почвы, возможно построение карты влагосодержания почв на рассматриваемой территории.

### Литература

1. *Шутко А.М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.
2. *Комаров С.А., Миронов В.Л.* Микроволновое зондирование почв. Новосибирск: Научно-издательский центр СО РАН, 2000. 289 с.
3. *Mironov V.L.* Spectral dielectric properties of moist soils in the microwave band // Proc. of IGARSS'04, Anchorage, USA, 2004, V. 5, P. 3474 – 3477.
4. *Mironov V.L., Bobrov P.P.* Soil dielectric spectroscopic parameters dependence on humus content // Proc. of IGARSS'03, Toulouse, France, 2003, V. 2, P. 1106-1108.
5. *Беляева Т.А., Бобров А.П., Бобров П.П., Галеев О.В., Мандрыгина В.Н.* Определение параметров моделей диэлектрической проницаемости почв с различной плотностью и различным содержанием гумуса по данным экспериментальных измерений в частотном диапазоне 0,1-20 ГГц // Исследование Земли из космоса, 2003. №5. С. 28-34.
6. *Бобров П.П., Миронов В.Л., Ивченко О.А., Красноухова В.Н.* Спектроскопическая модель диэлектрической проницаемости почв, использующая стандартизованные агрофизические показатели // Исследование Земли из космоса, 2008. № 1. С. 15-23.