

## Оптическая толщина растительности с учётом диэлектрических характеристик воды в живых растениях

А. Н. Романов

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия  
E-mail: ran@iwep.ru*

Микроволновое излучение почвенного покрова с наземным растительным покровом зависит от диэлектрических характеристик как почвы, так и растительности. При дистанционном микроволновом зондировании возникает проблема выделения вкладов растительности и почвы в суммарное излучение подстилающей поверхности. В данной работе изучена возможность учёта диэлектрических характеристик воды в живых растениях при дистанционном определении влажности почвы в случае неполного экранирования растительностью микроволнового излучения почвы. Для этой цели исследованы зависимости диэлектрических характеристик элементов надземных частей (листьев, стеблей, колосьев) пшеницы, овса, ржи от объёмной влажности. Экспериментально установлено различие диэлектрических характеристик нижних (первых, вторых) и верхних (третьих – пятых) листьев, а также колосьев пшеницы в разные периоды спелости. Кроме того, выявлены различия диэлектрических характеристик живых и погибших всходов овса. Установлена зависимость показателей преломления и поглощения от объёмной влажности для хлебных злаков (пшеницы, ржи, овса). С использованием рефракционной модели определены показатели преломления и поглощения воды в растениях. На основе измеренных диэлектрических параметров рассчитана зависимость оптической глубины растительности от объёмной доли воды в растениях и оценено экранирующее влияние растительности на микроволновое излучение почвы.

**Ключевые слова:** растительность, почва, температура, влажность, показатели преломления и поглощения, оптическая толщина растительности, коэффициент излучения, микроволновый диапазон

Одобрена к печати: 03.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-223-234

### Введение

Излучение почвенного покрова с наземным растительным покровом в микроволновом диапазоне зависит от диэлектрических характеристик как почвы, так и растительности. При дистанционном зондировании в этом диапазоне необходимо выделение вкладов растительности и почвы в суммарное излучение подстилающей поверхности. Задача корректной интерпретации данных дистанционного микроволнового зондирования распадается на две части: 1) учёт влияния растительности на точность дистанционного определения физических характеристик почвы, возможный в случае неполного экранирования растительным покровом микроволнового излучения почвы; 2) дистанционное определение параметров растительности (биомассы, содержания воды и др.) в случае полного экранирования излучения почвы.

Важной характеристикой, влияющей на урожайность зерновых культур, является влажность почвы. В течение вегетационного периода влажность почвы может изменяться в значительных пределах: от засухи до переувлажнения в зависимости от погодных-климатических условий и мелиоративных мероприятий (для орошаемых полей). Для определения влажности на больших площадях используются методы дистанционного микроволнового зондирования, активно разрабатываемые с 1960–1970 гг. (Башаринов и др., 1968, 1974; Эткин, Шарков, 1976; Schmugge et al., 1974). Проблема повышения точности дистанционной оценки влажности почвы актуальна и в настоящее время. Одной из причин, снижающих точность определения влажности, становится влияние растительного покрова, экранирующего микроволновое излучение почвы (Чухланцев и др., 2003; Kirdiashev et al., 1979; Njoku, 1982; Wigneron et al., 1993). Радиоизлучательные характеристики растительности в значительной степени зависят от влагосодержания, которое, в свою очередь, коррелирует с фенологическими фазами

растения (Arendt et al., 2022; Chukhlantsev et al., 1989; Ferrazzoli et al., 1992; Monsiváis-Huerta et al., 2020). Сопоставление контактных измерений влажности почвы с радиояркой температурой поля овса в диапазоне 4,9–94 ГГц показало, что точность дистанционной оценки влажности почвы во время фазы роста зависит от влагосодержания растений, а также от размера и ориентации листьев (Matzler, 1990).

Использование спутниковых данных для регионального и глобального мониторинга пахотных земель особенно эффективно в регионах с недостаточным количеством наземных наблюдений (Dou et al., 2022; Guan et al., 2017; Oza et al., 2008; Pereira et al., 2020). Растительный покров моделируется как слой равномерно распределённых диэлектрических цилиндров (стеблей) и дисков (листьев) (Huang et al., 2016). Для разработки моделей микроволнового зондирования подстилающей поверхности и дистанционной оценки влажности почвы под слоем растительности необходимо изучение диэлектрических характеристик почв с наземной растительностью (Burke, Schmugge, 1982; Itoligar et al., 2020; Li et al., 2017). Обзор диэлектрических свойств разных сортов пшеницы, кукурузы, риса, зернового сорго, соевых бобов, овса, ячменя и озимой ржи приведён в работе (Nelson et al., 2015).

Влажность почвы оценивается на основе дистанционных измерений радиояркой температуры ( $T_{я}$ ) подстилающей поверхности. В работе (Wigneron et al., 2007) приведено описание модели L-MEB (*англ.* L-band microwave emission of the biosphere, микроволновое излучение биосферы в L-диапазоне), учитывающей свойства растительности. Согласно исследованию (Kerr et al., 2012), формула расчёта  $T_{я}$ , известная под названием ( $\tau$ - $\omega$ )-модель, имеет вид:

$$T_{я} = \chi_{HV} \gamma T_{\Pi} + (1 - \omega)(1 - \gamma)(1 + \gamma r_{HV}) T_{P}, \quad (1)$$

где  $T_{\Pi}$ ,  $T_{P}$  — эффективная термодинамическая температура в скин-слое почвы и растительности;  $\omega$  — альbedo однократного рассеяния растительного покрова,  $\omega = 0,05-0,20$ ;  $\gamma$  — коэффициент ослабления растительности  $\gamma = \exp(-\tau/\cos\theta)$ ;  $\tau$  — оптическая толщина растительности, характеризующая ослабление растительностью микроволнового излучения подстилающей поверхности;  $\theta$  — угол зондирования;  $\chi_{HV}$ ,  $r_{HV}$  — коэффициенты излучения и отражения почвенного покрова на горизонтальной  $H$  (от *англ.* horizontal) и вертикальной  $V$  (от *англ.* vertical) поляризации,  $\chi_{HV} = 1 - |r_{HV}|^2 \exp(-z)$ ;  $z$  — параметр, учитывающий шероховатость подстилающей поверхности. При использовании вместо  $\omega$  коэффициента отражения ( $r$ ) оптически толстого растительного слоя формула (1) становится точной при больших значениях  $\tau$  (Чухланцев, Шутко, 2012). Методики расчёта эффективной температуры (Шутко, 1986) и учёта шероховатости (см. например, (Yashchenko, Bobrov, 2016)) в данной работе не рассматриваются, так как хорошо известны.

В формуле (1) ключевыми величинами, позволяющими учесть влияние растительности, являются  $\gamma$  и  $\tau$ . Для расчёта  $\tau$  используют соотношение (Schmugge, Jackson, 1992):

$$\tau = 4\pi \frac{h}{\lambda} \text{Im} \sqrt{\varepsilon} = 4\pi \frac{h}{\lambda} \kappa, \quad (2)$$

где  $h$  — высота растительности;  $\lambda$  — длина волны;  $\varepsilon$  — комплексная диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$ ,  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$  — действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости;  $\sqrt{\varepsilon} = n + i\kappa$ ,  $\varepsilon' = n^2 - \kappa^2$ ,  $\varepsilon'' = 2n\kappa$ ,  $n$ ,  $\kappa$  — показатели преломления и поглощения. Приведённые параметры зависят от высоты и биомассы растительности, количества воды в элементах растений.

Одновременное восстановление характеристик почвы и растительности приводит к неопределённости в их оценке. В работе (Романов и др., 2024) рассмотрен случай, когда растительный покров практически полностью экранирует микроволновое излучение подстилающей поверхности ( $\gamma \approx 0$ ). Из представленных результатов следует, что даже высохший лес заметным образом экранирует микроволновое излучение подстилающей поверхности.

Цель настоящей работы заключается в исследовании в микроволновом диапазоне диэлектрических характеристик разных элементов наземной растительности (на примере хлебных зерновых культур), а также смоделированных на их основе зависимостей  $\tau(W)$ ,  $\gamma(W)$  в том случае, когда пренебречь микроволновым излучением почвы нельзя.

## Методика исследований

В лабораторных условиях на длине волны  $\lambda=21$  см измерялись диэлектрические характеристики различных элементов надземной части хлебных зерновых культур (листьев, стеблей, колосьев пшеницы, овса, ржи), находящихся на разных стадиях вегетации, а также шляпок подсолнечника, стеблей, листьев и початков кукурузы. Измерения проводили на лабораторной установке мостового типа с использованием измерителя разности фаз ФК2-18. Определяли ослабление и сдвиг фазы электромагнитной волны, прошедшей через образец, помещённый в коаксиальный волновод длиной 3,7 см с диаметром внешнего и внутреннего проводников 1,6 и 0,7 см соответственно. Добивались максимального заполнения объёма контейнера исследуемым образцом. Подробное описание лабораторной установки и диэлектрических измерений приведено в работе (Romanov, 2022). Для описания диэлектрических характеристик элементов растительности использовали  $n$  и  $\kappa$ . Объёмная ( $W = V_W/V$  [см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>]) и массовая ( $W_M = M_W/M$  [г/г]) доли воды в образцах связаны соотношением  $W = (\rho_{wet}/\rho_w)W_M$ , где  $V$ ,  $V_W$  — объём сырой растительности и воды;  $M$ ,  $M_{dry}$ ,  $M_W$ ,  $\rho_{wet}$ ,  $\rho_w$  — масса и плотность сырой, сухой растительности и воды,  $M = M_{dry} + M_W$ ,  $\rho_{wet} = \rho_w W$ .

В ходе эксперимента влажность исследуемых растительных образцов изменяли высушиванием при комнатной температуре и свободном доступе воздуха от естественной влажности на момент срывания растения до сухого состояния. Измерения диэлектрических характеристик образцов проводили при температуре  $(25 \pm 1)$  °С.

## Результаты и обсуждение

Микроволновое излучение почвенного покрова с наземным растительным покровом зависит от температуры, влажности, гранулометрического состава, засоленности почвы, биомассы и влажности растительности, а также от того, живая растительность или отмершая. Учёт диэлектрических характеристик растительности необходим для повышения точности определения влажности почвы под растительным покровом, играющим роль ослабляющего слоя, экранирующего микроволновое излучение почвы.

Элементы растительности значительно различаются по диэлектрическим свойствам. Для хлебных злаков (на примере пшеницы) экспериментально установлено различие диэлектрических характеристик нижних (первых, вторых) и верхних (третьих — пятых) листьев. Также наблюдаются различия диэлектрических характеристик колосьев пшеницы, срезанных на разных стадиях созревания. Значительные различия установлены для стеблей, листьев и молодых початков кукурузы. Так, например, для кукурузных стеблей ( $W = 0,8$  см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>)  $n = 7,7$ ,  $\kappa = 0,9$ ; для листьев ( $W = 0,4$  см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>)  $n = 3,3$ ,  $\kappa = 0,55$ ; для сердцевин молодых початков ( $W = 0,3$  см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>)  $n = 6,34$ ,  $\kappa = 0,92$ ; для внутренней части (ваты) шляпок подсолнечника ( $W = 0,7$  см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>)  $n = 6,26$ ,  $\kappa = 1$ .

На *рис. 1* (см. с. 226) приведены зависимости  $n(W)$  и  $\kappa(W)$  для пшеницы и овса, аппроксимированные с помощью программы Origin 6.1 прямыми линиями:

$$n = A_0 + A_1 W, \quad (3)$$

$$\kappa = B_0 + B_1 W, \quad (4)$$

где  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $B_0$ ,  $B_1$  — эмпирические коэффициенты, приведённые в *табл. 1*.

На *рис. 1а* приведены  $n$  и  $\kappa$  разных элементов надземной части пшеницы: 1, 2 — нижняя и верхняя части стебля; 3–5 — нижний (первый), четвёртый и пятый (верхний) листья, 6 — жёлтый и зелёный колос. Видно, что различие  $n$  и  $\kappa$  для разных частей растения связано с разницей  $W$ . Изменение  $W$  может происходить как в результате погодных условий, так и в процессе созревания и отмирания растений. При этом следует отметить, что элементы растительности, различающиеся по диэлектрическим характеристикам, присутствуют на растении одновременно. В масштабах всего пшеничного поля растительный покров может быть представлен

как многослойная структура, состоящая из слоёв с изменяющимися во времени диэлектрическими параметрами, зависящими от содержания воды в этих элементах растений: 1) слой нижних листьев (первый и второй листья); 2) слой верхних листьев (третий – пятый листья); 3) слой колосьев. Для посевов кукурузы и подсолнечника выделение слоёв затруднительно из-за их большой биомассы и высокого влагосодержания, способных в значительной степени экранировать микроволновое излучение почвы.

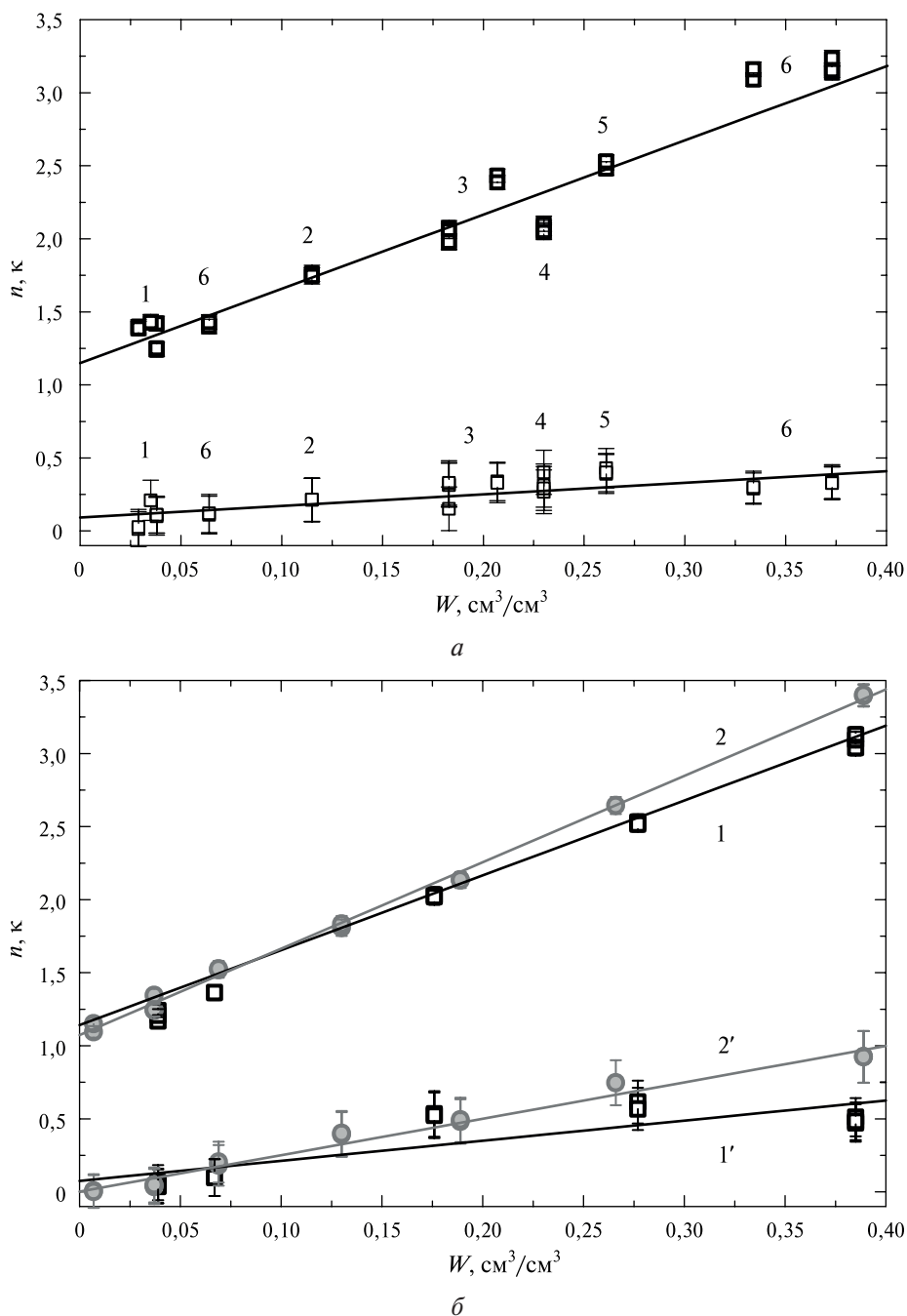


Рис. 1. Показатели преломления (1) и поглощения (2): а — пшеницы, б — овса

На рис. 1б приведены зависимости  $n(W)$  (1, 2) и  $k(W)$  (1', 2) для живых (1, 1') и отмерших (2, 2') всходов овса (для живых свежесрезанных растений измерения диэлектрических характеристик проводились в течение часа, для погибших — через 5 сут после срезания). Видно, что  $n$  и  $k$  живых и отмерших образцов заметно различаются.

Таблица 1. Эмпирические коэффициенты в формулах (3), (4)

Зерновая культура	$A_0$	$A_1$	$B_0$	$B_1$
Пшеница	1,14315	5,10234	0,09351	0,78606
Овёс (живые всходы)	1,00420	5,45697	0,04607	1,40145
Овёс (погибшие всходы)	1,06965	5,88971	0,00200	2,58362
Рожь	1,04813	5,65110	0,09171	0,26133

Для описания зависимостей  $(n, \kappa)(W)$  применим известную рефракционную модель (Birchak et al., 1974), записав её в следующем виде:

$$(n, \kappa) = \sum_{j=1}^m (n_j, \kappa_j) W_j, \tag{5}$$

где  $W_j = V_j/V$  — объёмная доля  $j$ -компоненты;  $V_j, V = 1$  — отдельные объёмы  $j$ -компоненты и всего образца.

С учётом линейных зависимостей  $n(W)$  (3) и  $\kappa(W)$  (4) запишем формулу (5) в виде:

$$n = n_0 + n_B W, \quad 0 \leq W \leq 0,40, \tag{6}$$

$$\kappa = \kappa_0 + \kappa_B W, \quad 0 \leq W \leq 0,40, \tag{7}$$

где  $n_0 = A_0, \kappa_0 = B_0$  — показатели преломления и поглощения сухой растительности (см. табл. 1), взятые при  $W = 0$ ;  $n_B, \kappa_B$  — показатели преломления и поглощения воды, присутствующей в растительности. Численные значения  $n_B, \kappa_B$ , рассчитанные из соотношений (3), (4) и (6), (7) для разных видов растительности, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчётные значения  $n_B$  и  $\kappa_B$  воды в растениях

Зерновая культура	$W, \text{см}^3/\text{см}^3$	$n_B$	$\kappa_B$
Пшеница	0–0,4	6,102	0,786
Овёс (живые всходы)	0–0,4	6,457	1,401
Овёс (погибшие всходы)	0–0,4	6,890	2,584
Рожь спелая	0–0,11	6,651	0,261

Из табл. 2 видно, что значения  $n_B$  для разных видов растений примерно одинаковые. Основное различие диэлектрических характеристик разных видов растительности заключается в различии значений  $\kappa_B$ , которые также различаются для живых и погибших растений (на примере овса). Довольно высокое значение  $\kappa_B$  для погибших всходов овса (по сравнению с живыми всходами) может быть связано с тем, что при отмирании растения происходит растворение в воде каких-либо органических или минеральных веществ.

Возникает вопрос об оценке влияния растительного покрова на точность дистанционно-го определения влажности почвы. Учитывая диэлектрические свойства растительности, запишем выражение (2) в следующем виде:

$$\tau = 4\pi \frac{h}{\lambda} \kappa P, \tag{8}$$

где  $P$  — объёмная доля растений в единичном объёме  $V$ .

Из приведённых выше значений  $n, \kappa$  кукурузы и подсолнечника следует, что на  $\lambda = 21$  см при  $h = 1,5$  м для кукурузы  $\tau = 48,928P$ , для подсолнечника  $\tau = 73,574P$ . Отсюда следует, что  $\gamma$  будет меньше 0,0001 при  $P > 0,11$  и  $P > 0,17$  соответственно. Таким образом, при дистанционном зондировании на  $\lambda = 21$  см микроволновое излучение почвы будет практически полностью

экранироваться растительным слоем при указанных значениях  $P$ . В этом случае формула (1) примет вид:  $T_{\text{я}} = (1 - \omega)T_{\text{р}}$ .

Для зерновых культур экранирующее влияние растительного покрова на микроволновое излучение почвы начинает проявляться с объёмной долей растительности больше  $P > 0,001$ . Экспериментальные зависимости  $\tau(W)$  (рис. 2а), рассчитанные по формуле (8), и  $\gamma(\tau(W))$ , рассчитанные по формуле  $\gamma = \exp(-\tau/\cos\theta)$  для  $\theta = 42^\circ$ , имеют вид:

$$\tau = C_0 + C_1W, \quad 0 \leq W \leq 0,4, \tag{9}$$

$$\gamma = D_0 + D_1 \exp(-W/D_2), \quad 0 \leq W \leq 0,4. \tag{10}$$

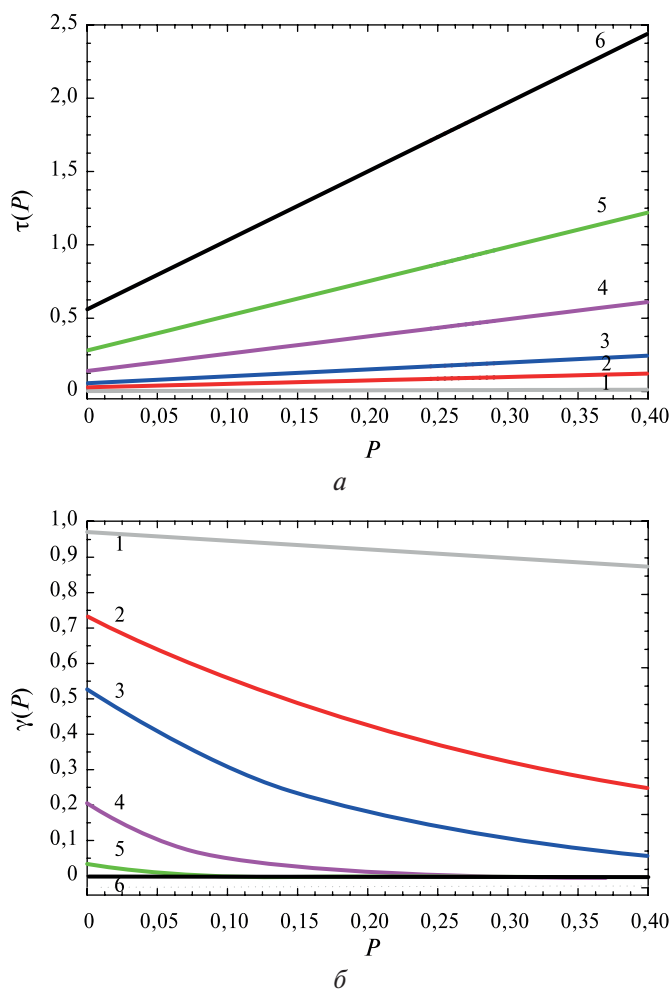


Рис. 2. Зависимость  $\tau(W)$  (а) и  $\gamma(W)$  (б) для пшеницы ( $h = 0,5$  м) с объёмной долей надземной части растений  $P = 0,001$  (1);  $P = 0,01$  (2);  $P = 0,02$  (3);  $P = 0,05$  (4);  $P = 0,1$  (5);  $P = 0,2$  (6)

Численные коэффициенты в соотношениях (9) и (10) для разных значений  $P$  приведены в табл. 3. На рис. 2 показаны зависимости  $\tau(W)$  и  $\gamma(W)$  (см. рис. 2б), рассчитанные по формулам (5), (6) для пшеничного поля ( $h = 0,5$  м и  $P = 0,001-0,200$ ). Величины  $\tau$  и  $\gamma$  также в значительной мере зависят от  $P$ , представляющего собой долю растительности в единичном объёме. Зависимости  $\tau(P)$  и  $\gamma(P)$  для разных значений  $W$  (рис. 3, см. с. 229), построенные на основе результатов лабораторных измерений диэлектрических характеристик растений, имеют вид:

$$\tau = E_0 + E_1P, \quad 0 \leq P \leq 0,2, \tag{11}$$

$$\gamma = F_0 + F_1 \exp(-P/F_2), \quad 0 \leq P \leq 0,2, \tag{12}$$

численные коэффициенты приведены в табл. 4.



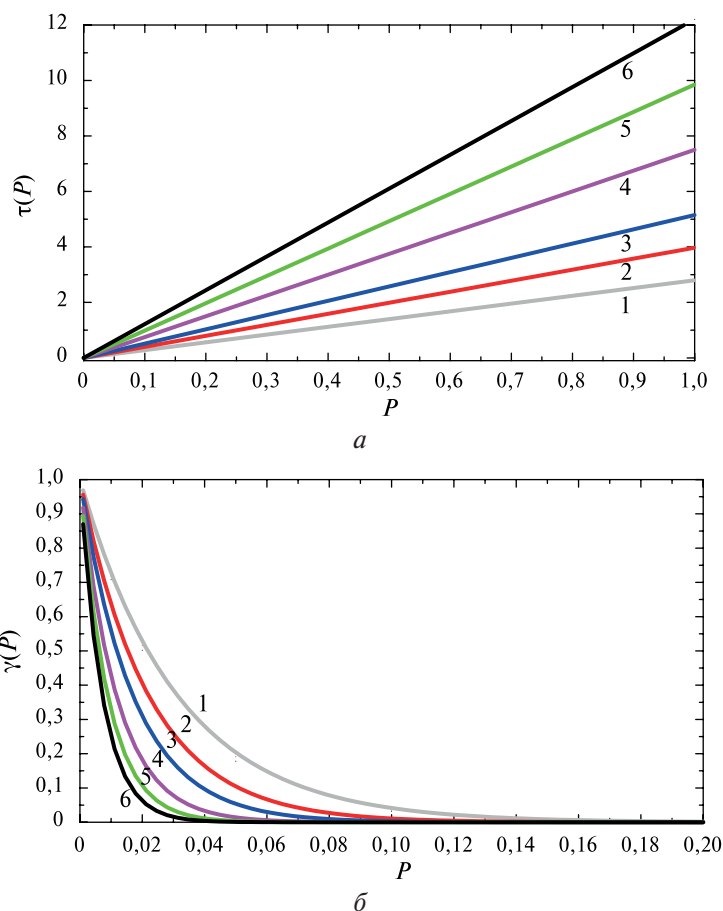


Рис. 3. Зависимость  $\tau(P)$  (а) и  $\gamma(P)$  (б) для пшеницы ( $h = 0,5$  м) с объёмной влажностью  $W = 0,0$  (1);  $W = 0,05$  (2);  $W = 0,01$  (3);  $W = 0,2$  (4);  $W = 0,3$  (5);  $W = 0,4$  (6)

Таблица 3. Эмпирические коэффициенты в формулах (9), (10) для разных значений  $P$

$P$	$C_0$	$C_1$	$D_0$	$D_1$	$D_2$
0,001	0,00284	0,02339	0–0,0001	0,98772	3,81692
0,010	0,02797	0,23523		0,72705	0,37349
0,020	0,05595	0,47039		0,52951	0,18701
0,050	0,13991	1,17589	0	0,20410	0,07480
0,100	0,27980	2,35180		0,04166	0,03727
0,200	0,55959	4,70367		0,00191	0,01423

Таблица 4. Эмпирические коэффициенты в формулах (11), (12) для разных значений  $P$

$W$	$E_0$	$E_1$	$F_0$	$F_1$	$F_2$
0	0,000160	2,79789	0	1,00030	0,03144
0,005	0,000060	2,91497		0,99965	0,03022
0,010	0,000064	3,03298		0,99986	0,02900
0,050	$-2,01444 \cdot 10^{-5}$	3,97403		1,00016	0,02215
0,100	$-2,14009 \cdot 10^{-4}$	5,15025		0,99981	0,01709
0,200	$-2,38272 \cdot 10^{-5}$	7,50193		0,99963	0,01173
0,300	$1,76088 \cdot 10^{-4}$	9,85284		0,99984	0,00893
0,400	$-2,90303 \cdot 10^{-5}$	12,20507		0,99944	0,00721

Из рис. 3 следует, что даже для сухой растительности величина  $\gamma$  становится пренебрежимо малой при  $P > 0,2$  и вклад растительности в микроволновое излучение подстилающей поверхности становится определяющим. Для сравнения на рис. 4 приведены теоретические зависимости коэффициентов излучения ( $\chi$ ) от объёмной доли воды в почве и растении, рассчитанные по формуле  $\chi = 4n/((n+1)^2 + \kappa^2)$  для угла зондирования  $\theta = 0$  на основе лабораторных измерений диэлектрических характеристик почвы и разных элементов разных растений при полном заполнении измерительного контейнера образцом. Зависимости  $\chi(W)$ , аппроксимированные прямыми линиями, имеют следующий вид:

1)  $\gamma = 1$  (почва без растительности):

$$\chi = 0,9435 - 1,05921W, \quad R = -0,96, \quad \sigma = 0,037; \tag{13}$$

2)  $\gamma = 0$  (растительность, полностью экранирующая микроволновое излучение почвы):

$$\chi = 0,9972 - 0,72065W, \quad R = -0,93, \quad \sigma = 0,035. \tag{14}$$

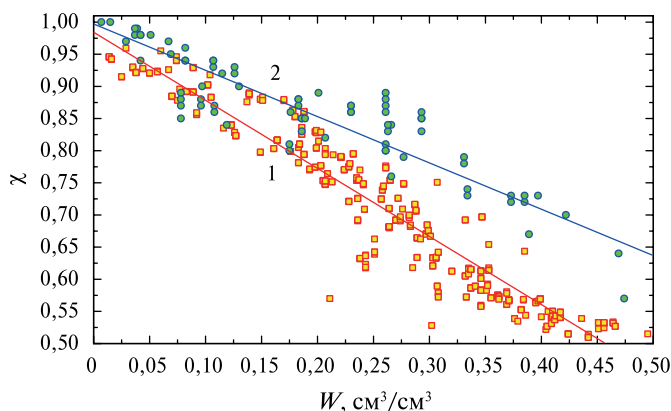


Рис. 4. Зависимость коэффициентов излучения ( $\chi$ ) от  $W$  для почвы (1) и растительности (2)

На рис. 4 видно, что значения  $\chi$  для почвы и растительности различаются во всём диапазоне  $W$ , но наибольшее различие, достигающее  $\Delta\chi \approx 0,15$ , наблюдается при высоких значениях  $W$ . Применимость соотношений (13) и (14) возможна при  $\gamma = 1$  и  $\gamma = 0$ . Эти соотношения могут быть использованы для интерпретации данных микроволнового зондирования почвенного покрова с наземной растительностью.

### Заключение

Таким образом, в результате проведённых исследований экспериментально установлено различие диэлектрических характеристик разных элементов растительности (листьев, стеблей, колосьев) пшеницы, овса, ржи, подсолнечника, находящихся на разных стадиях вегетации. С использованием рефракционной модели рассчитаны показатели преломления и поглощения воды в разных растениях. Из анализа экспериментальных данных следует вывод, что показатели преломления ( $n_v$ ) воды в разных растениях имеют близкие значения, а показатели поглощения ( $\kappa_v$ ) заметным образом различаются. При этом наблюдается различие  $\kappa_v$  живых и погибших растений (на примере всходов овса), что может быть связано с растворением органических и минеральных веществ в растительном соке.

С использованием измеренных диэлектрических характеристик рассчитаны значения оптической глубины растительности и величины  $\gamma$ , характеризующей ослабление микроволнового излучения почвенного покрова растительностью. На примере зерновых злаков (пшеницы) показано, что величина  $\gamma$  становится пренебрежимо малой при объёмной доле растений



$P > 0,20$ . Соответственно, при развитом растительном покрове и высоком содержании воды в растениях определение влажности почвы становится проблематичным. При  $P < 0,2$  точность дистанционного определения  $W$  зависит как от  $P$ , так и от  $W$ . Влияние растительности может быть учтено путём использования формулы (1) и соотношений, аналогичных (9)–(12).

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-20041 (<https://rscf.ru/project/22-17-20041>).

## Литература

1. Башаринов А. Е., Тучков Л. Т., Поляков В. С., Ананов Н. И. Измерение радиотепловых и плазменных СВЧ-излучений. М.: Советская редакция, 1968. 390 с.
2. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиотепловое излучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 188 с.
3. Романов А. Н., Хвостов И. В., Рябинин И. В., Романов Д. А., Трошкин Д. Н. Дистанционные микроволновые индикаторы сухости леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 21. 2024. № 1. С. 197–209. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-197-209.
4. Чухланцев А. А., Шутко А. М. Особенности определения влажности почвы СВЧ-радиометрическим методом в лесных районах // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 2. С. 3–10.
5. Чухланцев А. А., Шутко А. М., Головачев С. П. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 11. С. 1285–1311.
6. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 192 с.
7. Эткин В. С., Шарков Е. А. Возможности дистанционного исследования Земли при помощи радиофизических систем // Косм. исслед. земных ресурсов: методы и средства измерений и обработки информации. М.: Наука, 1976. С. 99–109.
8. Arendt B., Grathwohl A., Waldschmidt C., Walter T. Influence of Vegetation on the Detection of Shallowly Buried Objects with a UAV-Based GPSAR // IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. Kuala Lumpur, Malaysia, 2022. P. 100–103. DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883635.
9. Birchak J., Gardner C., Hipp J., Victor J. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture // Proc. IEEE. 1974. V. 62. No. 1. P. 93–98. DOI: 10.1109/PROC.1974.9388.
10. Burke H.-H. K., Schmugge T. J. Effects of varying soil moisture contents and vegetation canopies on microwave emissions // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1982. V. GE-20. No. 3. P. 268–274. DOI: 10.1109/TGRS.1982.350442.
11. Chukhlantsev A. A., Golovachev S. P., Shutko A. M. Experimental study of vegetable canopy microwave emission // Advances in Space Research. 1989. V. 9. No. 1. P. 317–321. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(89\)90499-7](https://doi.org/10.1016/0273-1177(89)90499-7).
12. Dou Q., Xie Q., Peng X. et al. Soil moisture retrieval over crop fields based on two-component polarimetric decomposition: a comparison of generalized volume scattering models // J. Hydrology. 2022. V. 615. Pt. A. Article 128696. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128696>.
13. Ferrazzoli P., Guerriero L., Paloscia S. et al. Modeling polarization properties of emission from soil covered with vegetation // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1992. V. 30. No. 1. P. 157–165. DOI: 10.1109/36.124226.
14. Guan K., Wu J., Kimball J. S. et al. The shared and unique values of optical, fluorescence, thermal and microwave satellite data for estimating large-scale crop yields // Remote Sensing of Environment 2017. V. 199. P. 333–349. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.043>.
15. Huang H., Liao T.-H., Tsang L. et al. Combined active and Passive microwave remote sensing of Soil Moisture for vegetated surfaces at L-band // Progress in Electromagnetic Research Symp. (PIERS). Shanghai, China, 2016. P. 2528–2529. DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735036.
16. Itolihar A. B., Joshi A. S., Deshpande S. S. et al., Dielectric and Emissive Properties of Sorghum (Jowar) Vegetation at C-Band Microwave Frequency // Materials Today: Proc. 2020. V. 23. Pt. 2. P. 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.022>.
17. Kerr Y. H., Waldteufel P., Richaume P. et al. The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 5. P. 1384–1403. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184548.
18. Kirdiashev K. P., Chukhlantsev A. A., Shutko A. M. Microwave radiation of the earth's surface in the presence of vegetation cover // Radio Engineering and Electronics. 1979. V. 24. P. 256–264.
19. Li D., Yang C., Du Y. Efficient Method for Scattering from Cylindrical Components of Vegetation and Its Potential Application to the Determination of Effective Permittivity // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2017. V. 55. No. 11. P. 6120–6127. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2720849.

20. *Matzler C.* Seasonal evolution of microwave radiation from an oat field // *Remote Sensing of Environment*. 1990. V. 31. No. 3. P. 161–173. DOI: 10.1016/0034-4257(90)90086-2.
21. *Monsiváis-Huertero A., Judge J., Liu P.-W., Chakrabarti S.* Monitoring Vegetation Conditions Over Agricultural Regions Using Active Observations // *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. Waikoloa, HI, USA, 2020*. P. 4351–4354. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324414.
22. *Nelson S. O.* Chapter 15 — Dielectric Properties Data // *Dielectric Properties of Agricultural Materials and their Applications*. Academic Press, 2015. P. 211–246. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802305-1.00015-4>.
23. *Njoku E. G.* Passive Microwave Remote Sensing of Earth from Space: A Review // *Proc. IEEE*. 1982. V. 70. P. 728–749.
24. *Oza S. R., Panigrahy S., Parihar J. S.* Concurrent use of active and passive microwave remote sensing data for monitoring of rice crop // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2008. V. 10. No. 3. P. 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2007.12.002>.
25. *Pereira L. S., Paredes P., Melton F. et al.* Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data // *Agricultural Water Management*. 2020. V. 241. Article 106197. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106197>.
26. *Romanov A. N.* Some Behavior Features of Dielectric Properties of Water in Birch Wood at a Frequency of 1.41 GHz // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2022. V. 60. P. 1–8. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3157642.
27. *Schmugge T. J., Jackson T. J.* A dielectric model of the vegetation effects on the microwave emission from soils // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1992. V. 30. No. 4. P. 757–760. DOI: 10.1109/36.158870.
28. *Schmugge T. J., Gloersen P. W., Wilheit T., Geiger F.* Remote Sensing of Soil Moisture with Microwave Radiometry // *J. Geophysical Research*. 1974. V. 79. No. 2. P. 317–323.
29. *Wigneron J.-P., Calvet C., Kerr Y. et al.* Microwave emission of vegetation: sensitivity to leaf characteristics // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1993. V. 31. No. 3. P. 716–726. DOI: 10.1109/36.225537.
30. *Wigneron J.-P., Kerr Y., Waldteufel P. et al.* L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB) model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields // *Remote Sensing of Environment*. 2007. V. 107. No. 4. P. 639–655. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.014>.
31. *Yashchenko A. S., Bobrov P. P.* Impact of the Soil Moisture Distribution in the Top Layer on the Accuracy Moisture Retrieval by Microwave Radiometer Data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2016. V. 54. No. 9. P. 5239–5246. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2559162.

## Optical thickness of vegetation taking into account the dielectric characteristics of water in living plants

A. N. Romanov

*Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia  
E-mail: ran@iwep.ru*

The microwave emission of ground cover with ground vegetation depends on the dielectric characteristics of both the soil and the vegetation. With microwave remote sensing, the problem arises of isolating the contributions of vegetation and soil to the total radiation of the underlying surface. This work examines the possibility of taking into account the dielectric characteristics of water in living plants when remotely determining soil moisture in the case of incomplete shielding of soil microwave radiation by vegetation. For this purpose, the dependences of the dielectric characteristics of the elements of the above-ground parts (leaves, stems, ears) of wheat, oats, and rye on volumetric humidity were studied. The difference in dielectric characteristics of the lower (first, second) and upper (third-fifth) leaves, as well as ears of wheat at different periods of ripeness, was experimentally established. Differences in the dielectric characteristics of living and dead oat seedlings were revealed. The dependences of the refractive index and absorption on the volumetric humidity for cereals (wheat, rye, oats) have been established. Using a refractive model, the refractive index and absorption of water in plants were determined. Based on the measured dielectric parameters, the dependence of the optical depth of vegetation on the volume fraction of water in plants was calculated and the shielding effect of vegetation on the microwave radiation of the soil was assessed.

**Keywords:** vegetation, soil, temperature, humidity, refractive and absorption indices, optical thickness of vegetation, emissivity, microwave range

Accepted: 03.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-2-223-234

## References

1. Basharinov A. E., Tuchkov L. T., Polyakov V. M., Ananov N. I., *Izmerenie radioteplovykh i plazmennyykh SVCh-izlucheni* (Measurement of radiothermal and plasma radiation in the microwave band), Moscow: Sovetskoe radio, 1968, 320 p. (in Russian).
2. Basharinov A. E., Gurchich A. S., Egorov S. T., *Radioteplovoe izluchenie Zemli kak planety* (Radioemission of the Earth as a planet), Moscow: Nauka, 1974, 188 p. (in Russian).
3. Romanov A. N., Khvostov I. V., Ryabinin I. V., Romanov D. A., Troshkin D. N., Remote microwave indicators of forest dryness, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 1, pp. 197–209, DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-197-209.
4. Chukhlantsev A. A., Shutko A. M., Some aspects of microwave radiometry of soil moisture in forested areas, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2012, No. 2, pp. 3–10 (in Russian).
5. Chukhlantsev A. A., Shutko A. M., Golovachev S. P., Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies, *J. Communications Technology and Electronics*, 2003, Vol. 48, No. 11, pp. 1177–1202.
6. Shutko A. M., *SVCh-radiometriya vodnoi poverkhnosti i pochvogrunтов* (Microwave Radiometry of Water Surface and Grounds), Moscow: Nauka, 1986, 192 p.
7. Etkin V. S., Sharkov E. A., Possibilities of remote exploration of the Earth using radiophysical systems, In: *Space research of earth resources*, Moscow: Nauka, 1976, pp. 99–109.
8. Arendt B., Grathwohl A., Waldschmidt C., Walter T., Influence of Vegetation on the Detection of Shallowly Buried Objects with a UAV-Based GPSAR, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2022, pp. 100–103, DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883635.
9. Birchak J., Gardner C., Hipp J., Victor J., High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture, *Proc. IEEE*, 1974, Vol. 62, No. 1, pp. 93–98, DOI: 10.1109/PROC.1974.9388.
10. Burke H.-H. K., Schmugge T. J., Effects of varying soil moisture contents and vegetation canopies on microwave emissions, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1982, Vol. GE-20, No. 3, pp. 268–274, DOI: 10.1109/TGRS.1982.350442.
11. Chukhlantsev A. A., Golovachev S. P., Shutko A. M., Experimental study of vegetable canopy microwave emission, *Advances in Space Research*, 1989, Vol. 9, No. 1, pp. 317–321, [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(89\)90499-7](https://doi.org/10.1016/0273-1177(89)90499-7).
12. Dou Q., Xie Q., Peng X. et al., Soil moisture retrieval over crop fields based on two-component polarimetric decomposition: a comparison of generalized volume scattering models, *J. Hydrology*, 2022, Vol. 615, Pt. A, Article 128696, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128696>.
13. Ferrazzoli P., Guerriero L., Paloscia S. et al., Modeling polarization properties of emission from soil covered with vegetation, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, No. 1, pp. 157–165, DOI: 10.1109/36.124226.
14. Guan K., Wu J., Kimball J. S. et al., The shared and unique values of optical, fluorescence, thermal and microwave satellite data for estimating large-scale crop yields, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 199, pp. 333–349, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.043>.
15. Huang H., Liao T.-H., Tsang L. et al., Combined active and passive microwave remote sensing of Soil Moisture for vegetated surfaces at L-band, *Progress in Electromagnetic Research Symp. (PIERS)*, Shanghai, China, 2016, pp. 2528–2529, DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735036.
16. Itolihar A. B., Joshi A. S., Deshpande S. S. et al., Dielectric and Emissive Properties of Sorghum (Jowar) Vegetation at C-Band Microwave Frequency, *Materials Today: Proc.*, 2020, Vol. 23, Pt. 2, pp. 236–245, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.022>.
17. Kerr Y. H., Waldteufel P., Richaume P. et al., The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 5, pp. 1384–1403, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184548.
18. Kirdiashev K. P., Chukhlantsev A. A., Shutko A. M., Microwave radiation of the earth's surface in the presence of vegetation cover, *Radio Engineering and Electronics*, 1979, Vol. 24, pp. 256–264.
19. Li D., Yang C., Du Y., Efficient Method for Scattering from Cylindrical Components of Vegetation and Its Potential Application to the Determination of Effective Permittivity, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2017, Vol. 55, No. 11, pp. 6120–6127, DOI: 10.1109/TGRS.2017.2720849.
20. Matzler C., Seasonal evolution of microwave radiation from an oat field, *Remote Sensing of Environment*, 1990, Vol. 31, No. 3, pp. 161–173, DOI: 10.1016/0034-4257(90)90086-2.

21. Monsiváis-Huertero A., Judge J., Liu P.-W., Chakrabarti S., Monitoring Vegetation Conditions over Agricultural Regions Using Active Observations, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, Waikoloa, HI, USA, 2020, pp. 4351–4354, DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324414.
22. Nelson S. O., Chapter 15 — Dielectric Properties Data, In: *Dielectric Properties of Agricultural Materials and their Applications*, Academic Press, 2015, pp. 211–246, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802305-1.00015-4>.
23. Njoku E. G., Passive Microwave Remote Sensing of Earth from Space: A Review, *Proc. IEEE*, 1982, Vol. 70, pp. 728–749.
24. Oza S. R., Panigrahy S., Parihar J. S., Concurrent use of active and passive microwave remote sensing data for monitoring of rice crop, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, Vol. 10, No. 3, pp. 296–304, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2007.12.002>.
25. Pereira L. S., Paredes P., Melton F. et al., Prediction of crop coefficients from fraction of ground cover and height. Background and validation using ground and remote sensing data, *Agricultural Water Management*, 2020, Vol. 241, Article 106197, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106197>.
26. Romanov A. N., Some behavior features of dielectric properties of water in birch wood at a frequency of 1.41 GHz, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2022, Vol. 60, pp. 1–8, Article 4409208, DOI: 10.1109/TGRS.2022.3157642.
27. Schmugge T. J., Jackson T. J., A dielectric model of the vegetation effects on the microwave emission from soils, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, No. 4, pp. 757–760, DOI: 10.1109/36.158870.
28. Schmugge T. J., Gloersen P. W., Wilheit T., Geiger F., Remote sensing of soil moisture with microwave radiometry, *J. Geophysical Research*, 1974, Vol. 79, No. 2, pp. 317–323.
29. Wigneron J.-P., Calvet C., Kerr Y. et al., Microwave emission of vegetation: sensitivity to leaf characteristics, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1993, Vol. 31, No. 3, pp. 716–726, DOI: 10.1109/36.225537.
30. Wigneron J.-P., Kerr Y., Waldteufel P. et al., L-band microwave emission of the biosphere (L-MEB) model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields, *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 107, No. 4, pp. 639–655, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.014>.
31. Yashchenko A. S., Bobrov P. P., Impact of the Soil Moisture Distribution in the Top Layer on the Accuracy Moisture Retrieval by Microwave Radiometer Data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2016, Vol. 54, No. 9, pp. 5239–5246, DOI: 10.1109/TGRS.2016.2559162.