

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.5>

УДК: 537.87

## ШИРОКОПОЛОСНЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ И СТЕПЕНИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ

К.В. Музалевский

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии  
наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Статья поступила в редакцию 3 ноября 2022 г.

**Аннотация.** В данной работе предложена численно-аналитическая модель коэффициента отражения электромагнитной волны от шероховатой границы почвенного покрова, на основе которой, в диапазоне частот от 520 МГц до 1,26 ГГц, разработан широкополосный метод измерения среднеквадратического отклонения (СКО) высот неровностей и объемной влажности поверхности почв. При построении модели коэффициента отражения, поле отраженной волны от шероховатой границы почвенного покрова представлено в виде суммы вторичных полей от бесконечного множества элементарных горизонтальных рассеивающих площадок (с заданным средним размером), набор которых на поверхности почвы осуществляется в пределах первой зоны Френеля. Поле каждой элементарной рассеивающей площадки представляется в виде среднего поля от результата стохастической интерференции бесконечного множества когерентных элементарных источников вторичных волн с плоским фронтом, вертикальное положение которых определено высотой неровностей в каждой точке поверхности почвы в пределах размеров элементарной рассеивающей площадки. Показано, что созданная модель описывает величину полного значения коэффициента отражения (когерентная и диффузная компоненты) с

коэффициентом детерминации  $R^2=0,981$  и СКО не более 0,35дБ относительно коэффициента отражения, рассчитанного с использованием метода конечных разностей и метода интегральных уравнений. На примере 16 почвенных образцов, комплексная диэлектрическая проницаемость которых измерена для широкого диапазона плотностей 0,7–1,8 г/см<sup>3</sup>, влажности, гранулометрического состава (0–76%) и содержания органического вещества (0,6–6,9%) показана принципиальная возможность восстановления СКО высот неровностей и объемной влажности шероховатой поверхности почвенного покрова с коэффициентом детерминации СКО не хуже, чем  $R^2=0,909$  (СКО=0,4 см) и  $R^2=0,975$  (СКО=2%), соответственно, относительно истинных значений. Результаты работы имеют широкое прикладное значения как для одночастотных, так и многочастотных методов обработки радарных и радиометрических данных с целью разработки новых алгоритмов повышенной точности измерения влажности почв.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, радиолокация, радиометрия, рефлектометрия, коэффициент отражения, излучательная способность, шероховатая поверхность, почвы, комплексная диэлектрическая проницаемость почв, дистанционные методы измерения влажности почв.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках гранта РНФ и Красноярского краевого фонда науки № 22-17-20042.

**Автор для переписки:** Музалевский Константин Викторович, email: rsdkm@ksc.krasn.ru

## Введение

Измерение влажности почвы на основе дистанционных микроволновых радарных и радиометрических наблюдений сильно подвержено влиянию шероховатости поверхности почвенного покрова. Модель коэффициента отражения электромагнитной волны от шероховатой поверхности почвы

является составной частью физических моделей радарного рассеяния и радиотеплового излучения.

Наиболее известные аналитические модели радарного рассеяния разработаны для шероховатых поверхностей: а) с малыми по отношению к длине волны СКО высот  $\sigma_{ш}/\lambda \ll 1$  неровностей поверхности почвы (метод малых возмущений [1,2]), где  $\lambda$  – длина электромагнитной волны в свободном пространстве; б) для поверхностей с плавными переходами крупномасштабных неровностей  $|\nabla_{\perp} h(\vec{\rho})| \ll 1$  (метод Кирхгофа [1,2]), где  $\nabla_{\perp}$  – оператор дифференцирования в горизонтальной плоскости,  $z=h(\vec{\rho})$  – уравнение поверхности; в) метод малых возмущений склонов шероховатой поверхности [3], справедлив для произвольной степени шероховатости поверхности почвы, построен на основе идеи о разложении рассеянного поля в ряд по параметру  $\nabla_{\perp} h(\vec{\rho})$ , оставаясь справедливым от области условий метода «а» до области метода «б»; г) метод интегральных уравнений [4,5] справедлив для поверхности с разнообразной степенью шероховатости для которых выполняются условия  $0 < k_0 \sigma_{ш} < 3$ ,  $1 < k_0 l_k < 30$ , где  $k_0$  – волновое число свободного пространства,  $l_k$  – длина корреляции между высотами.

Разработаны полуэмпирические одночастотные и много частотные модели радарного рассеяния [6,7] и радиотеплового излучения [8,9], параметры которых определены на основе экспериментальных наблюдений. Полуэмпирические модели не позволяют рассчитать комплексные значения коэффициентов отражения, а трудоемкость вычислений уравнений для представления полей в комплексном виде для аналитических моделей особенно в сверхширокой полосе частот сопоставима с прямыми численными методами решения задач рассеяния на шероховатой границе почв [10,11].

Разработаны одночастотные (1,4ГГц) численно-аналитические модели переходного слоя [12-14], основанные на детерминистическом расчете коэффициента отражения от почвенного покрова, шероховатость поверхности которого представлена в виде переходного диэлектрического слоя. Вертикальный профиль диэлектрической проницаемости описывается на основе

рефракционной модели смеси, при этом вертикальное распределение объёмного содержания воздуха описано полиномиальной зависимостью. Высоты неровностей поверхности почвенного покрова моделировались с использованием Гауссова случайного процесса с использованием Гауссовой и экспоненциальной автокорреляционной функции. Среднеквадратические отклонения и длина корреляции высот неровностей поверхности почвенного покрова ( $\sigma_{ш}$ ,  $l_k$ ) оценивалась вдоль профиля длиной  $l_{\text{Брэгг}} = \lambda/2 \sin\theta^i$ , где  $\theta^i$  – угол падения волны на поверхность почвы, отсчитывается от нормали, опущенной на срединную линию уровня [12-14]. В месте с тем, до настоящего времени работоспособность детерминистических моделей переходного слоя, разработанных для фиксированных частот, не доказана в широком диапазоне частот.

В данной работе предложена стохастическая модель переходного слоя, основанная на классическом принципе Гюйгенса-Френеля при размещении вторичных источников на шероховатой поверхности почвенного покрова, справедливость которой доказана в широком диапазоне частот зондирующей волны. Созданная модель коэффициента отражения тестируется на основе экспериментальных данных работы [15], и результатах моделирования, полученных с использованием численной модели конечных разностей (Numerical Maxwell Model in 3-D Simulations, NMM3D) [10,11] и усовершенствованной модели интегральных уравнений (Advanced Integral Equation Model, AIEM) [12]. В работе [15] проведены эксперименты по измерению когерентной составляющей коэффициента отражения электромагнитной волны с плоским фронтом на частоте 10 ГГц в диапазоне углов наблюдений от  $20^\circ$  до  $65^\circ$  от песка комплексной диэлектрической проницаемостью (КДП) равной  $\epsilon_s = 3,0 + i0,0$  на горизонтальной и вертикальной поляризациях со среднеквадратическим отклонением (длиной корреляции) высот неровностей поверхности менее  $k_0\sigma_{ш} < 0,2$ ;  $k_0\sigma_{ш} = 0,5$  ( $k_0l_k = 5,4$ );  $k_0\sigma_{ш} = 1,39$  ( $k_0l_k = 10,6$ );  $k_0\sigma_{ш} = 1,94$  ( $k_0l_k = 11,8$ ), соответственно. При этом численное моделирование рассеяния плоской электромагнитной волны на основе методов

NMM3D, АИЕМ осуществлялось при следующих условиях задачи: 1)  $\theta^i=40^\circ$ ,  $f=1,4$  ГГц,  $0,02 < \sigma_{ш}/\lambda < 0,14$ ,  $l_k=10\sigma_{ш}$  [10]; 2)  $\theta^i=35^\circ$ ,  $\theta^i=55^\circ$ ,  $f=1,4$  ГГц,  $0 < k_0\sigma_{ш}\cos\theta^i < 1,6$ ,  $l_k=10\text{см}$  [12]; 3)  $\theta^i=30^\circ \dots 50^\circ$ ,  $f=4,75$  ГГц,  $\sigma_{ш}=0,4\text{см}$ , и  $\sigma_{ш}=1,12\text{см}$ ,  $l_k=8,4\text{см}$  [11].

### 1. Почвенные образцы

Данные измерений относительной комплексной диэлектрической проницаемости (КДП),  $\epsilon_s = \epsilon_s' + i\epsilon_s''$ , где,  $\epsilon_s'$  - действительная и  $\epsilon_s''$  - мнимая части КДП,  $i$  – мнимая единица, почвенных образцов были выбраны для охвата широкого спектра гранулометрического состава почв от песчаника до среднеглинистых почв, с различной плотностью сухого сложения, содержанием органического вещества и вариацией влажности от воздушно сухой до минимальной полевой влагоемкости. Измеренные величины КДП почвенных образцов были взяты из работ [16-18], а также использовались результаты собственных измерений. КДП почвенных образцов различными авторами и нами измерялись коаксиально волноводным методом при температуре 20°C. Характеристики почвенных образцов приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Характеристика почвенных образцов

№	Назв.	Гранулометрический состав (по весу), %				$\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	Тип почвы <sup>1</sup>	$f$ , ГГц	Лит.
		Глина	Ил	Песок	Орг. вещ.				
1	А	76	22	2	-	от <1,4 до 1,7>	Г	0,045-25	[16]
2	В	0	2	98	-		Пр		
3	С	4	8	88	-		Пс		
4	Д	14	9	77	-		Гсс		
5	Е	7	93	0	-		Глсг		
6	Ф	51	48	1	-		Гсг		
7	Г	13	32	55	-		Глс		
8	Н	34	64	2	-		Глг		
9	І	0	0	100	-		Пр		
10	Ј	54	46	0	-		Гсг		
11	К	7	89	4	-		Глсг		
12	Л	0	1	99	-		Пр		
13	М	41	57	2	2,3	1,1-1,4	Глг	0,045-15	[17]

14	Р	39	35	26	6,9	1,2-1,5	Глг	0,045-15	<sup>-2</sup>
15	W	30	50	20	0,6	0,7-1,8	Гтсг	0,1-10	[18]
16	Л	40	41	19	4,2	1,2-1,6	Глг	0,045-15	<sup>-2</sup>

<sup>1</sup>Г – тяжелоглинистые, Пр – песок рыхлый, Пс – супесчаная, Гсс – среднесуглинистые, Глс – лёгкосуглинистые, Гсг – среднеглинистые, Глг – лёгкоглинистые, Гтсг – тяжёлосуглинистые; <sup>2</sup>Собственные измерения.

Почвенные образцы «А»–«L» были отобраны Геотехнической лабораторией, Экспериментальной станции водных путей (США). Образец «М» был отобран на п-ве Ямал, Россия в районе Васькиных дач из минерального горизонта. Образцы «Р» и «Л» были отобраны в районе пос. Минино, Красноярский край, из верхнего слоя (А<sub>пах.</sub>) агропочвы. Образец «W» был отобран около реки Анстрат, (Германия, Турингия). В качестве примера на рис. 1 приведены измеренные значения показателя преломления,  $n_s = Re\sqrt{\epsilon_s}$ , и коэффициент поглощения,  $\kappa_s = Im\sqrt{\epsilon_s}$ , для почвы «Р». Как видно из рис. 1 показатель преломления и коэффициент поглощения почвы «Р» обладают существенной частотной дисперсией в МГц диапазоне частот.

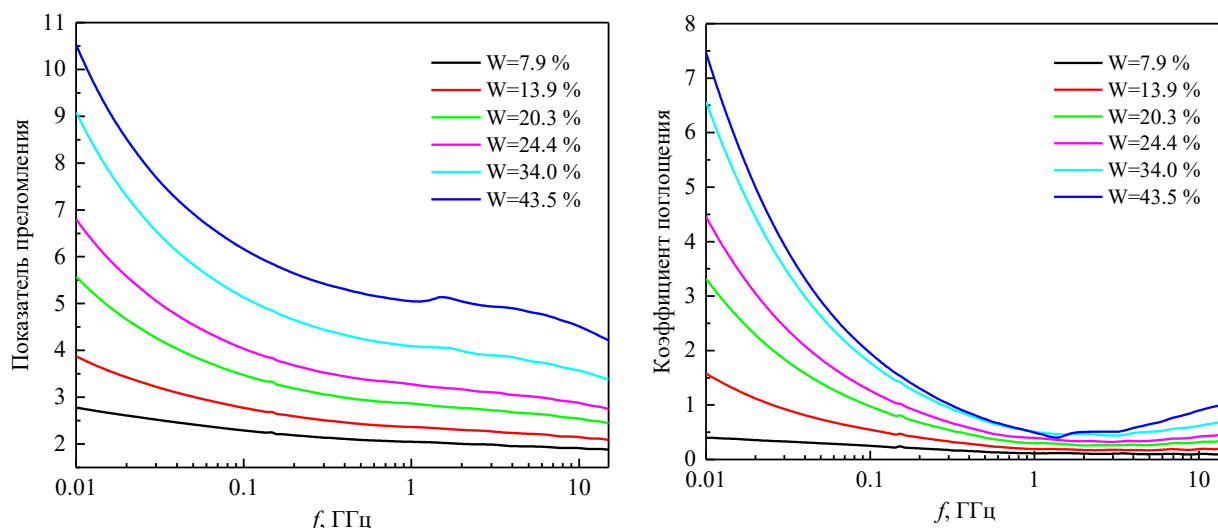


Рис. 1. Показатель преломления и коэффициент поглощения почвы «Р», измеренные при различной объёмной влажности

## 2. Модель высот неровностей поверхности почвенного покрова

Эксперименты показывают, что плотность распределения высот точек неровностей поверхности почвенного покрова приближенно может быть описана нормальным законом, в одномерном случае в виде [19, с. 69; 6]:

$$p(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\text{ш}}} \exp\left[-\frac{h^2}{2\sigma_{\text{ш}}^2}\right], \quad (1)$$

где  $h(x)$  – высота поверхности в точке с координатой  $x$ . Здесь, как и выше  $\sigma_{\text{ш}}$  – СКО высот неровностей поверхности почвы (мелкомасштабная неровность). Под мелкомасштабной неровностью понимается изменения  $h(x)$  на фоне рельефа на расстояниях смещения вдоль поверхности почвы  $\Delta x \ll \lambda$ . В отличие от крупномасштабных рельефных неровностей, которые проявляются в вариациях  $h(x)$  в пределах смещений  $\Delta x \gg \lambda$ . При этом экспериментально измеренные автокорреляционные функции высот неровностей поверхности почвенного покрова в большинстве случаев лучше описываются экспоненциальной зависимостью, нежели функцией Гаусса [11, с. 1743; 6, с. 372]:

$$p_h(\xi) = \exp\left[-\frac{|\xi|}{l_k}\right], \quad (2)$$

где  $l_k$  – длина корреляции.

Проведенный нами обширный анализ экспериментальных данных по измерениям шероховатости поверхности разнообразных почвенных покровов сельскохозяйственных земель [6,20-22], не позволяет выявить какую-либо закономерность обнаруживающую связь между  $\sigma_{\text{ш}}$  и  $l_k$  (см. рис. 2а). В месте с тем, средние склоны неровностей поверхности почвы  $\phi_{\text{ш}}(\sigma_{\text{ш}}) = \arctg(2\sigma_{\text{ш}}/l_k)$  с коэффициентом детерминации  $R^2=0,654$  и СКО=8,9° линейно зависят от СКО высот неровностей поверхности почвенного покрова.

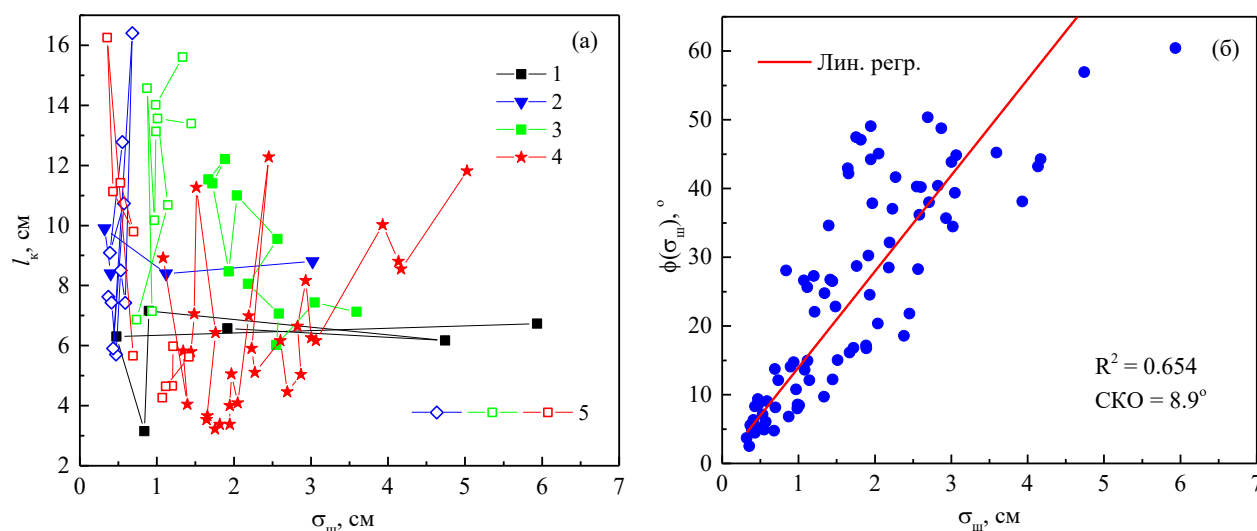


Рис. 2. Зависимость длины корреляции  $l_k$  (а) и средних склонов  $\phi_{ш}$  (б) от СКО  $\sigma_{ш}$  высот неровностей поверхности почвы: 1) [20], 2) [6], 3) [21, с. 159], 4) [22, с. 55], 5) собственные измерения с использованием фотогравиметрического метода на поле №2 в районе пос. Минино (Красноярский край) в период с 11 по 19 сентября 2022 г.

В связи с тем, что ни зависимость  $l_k$  от  $\sigma_{ш}$ , ни  $\phi_{ш}$  от  $\sigma_{ш}$  не могут быть описаны какой-либо аналитической функцией достаточно точно, для дальнейшего моделирования коэффициентов отражения на основе данных, представленных на рис. 2, был сформирован следующий репрезентативный набор пар экспериментально измеренных значений  $\sigma_{ш}$  и  $l_k$  (см. Таблицу 2).

Таблица 2. Репрезентативный набор СКО и длин корреляции высот неровностей поверхности почвы для различных профилей

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\sigma_{ш}$ , см	0,32	0,48	0,53	0,84	0,87	0,90	1,01	1,12	1,34	1,92	2,38	3,02	4,74
$l_k$ , см	9,9	6,3	11,4	3,2	14,6	7,2	13,6	8,4	15,6	6,6	14,2	8,8	6,2

Синтезирование высот неровностей поверхности почвенного покрова, распределенных по нормальному закону и имеющих экспоненциальную корреляционную функцию, осуществлялось по численной методике, изложенной в работе [23, см. стр. 124]. В качестве примера, на рис. 3 приведено по одной реализации четырёх профилей, синтезированных на основе данных Таблицы (2).



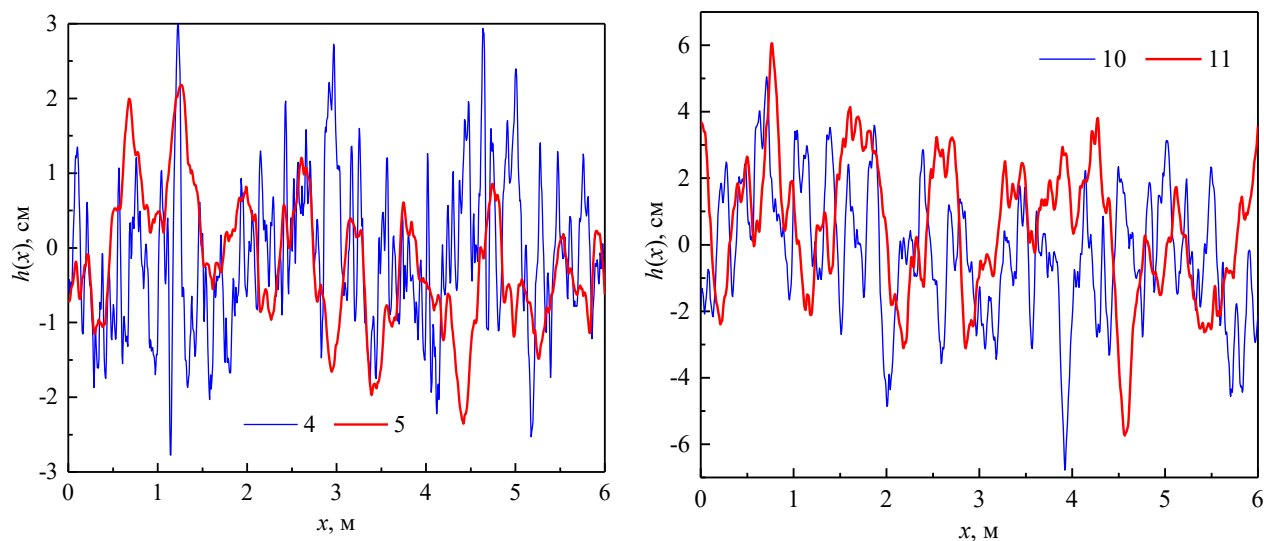


Рис. 3. Реализация 4-ого, 5-ого, 10-ого и 11-ого профилей (см. Таблицу 2) неровностей поверхности почвы

### 3. Численно-аналитическая модель коэффициента отражения

Пусть плоская электромагнитная волна падает из воздуха под углом  $\theta^i$  на шероховатую границу почвенного покрова (см. рис. 4). Угол падения отсчитывается от нормали, опущенной на некоторую усредненную горизонтальную линию уровня шероховатой поверхности ( $z=0$ ), относительно которого  $\langle h(x) \rangle|_{z=0}=0$ ,  $\langle \rangle$  – способ обозначения усреднения. На поверхности почвы отсутствуют крупномасштабные неровности (рельеф). Представим поле отраженной волны от шероховатой границы почвенного покрова в виде суммы вторичных полей  $E_p^{sc}(\theta^i, f)$  от бесконечного множества ( $p=1, \dots, N_{\text{пл.}} \rightarrow \infty$ ) элементарных горизонтальных рассеивающих площадок со средним размером  $\Delta l$ , набор которых на поверхности почвы осуществляется в пределах первой зоны Френеля.

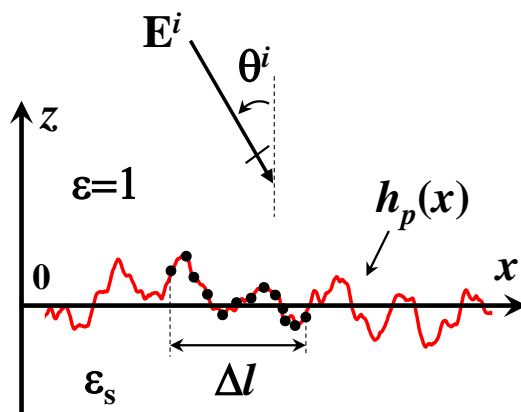


Рис. 4. Геометрия задачи

Поле каждой элементарной рассеивающей площадки  $E_p^{sc}(\theta^i, f)$  представим в виде среднего поля от результата статистической интерференции [24] бесконечного множества ( $m=1, \dots, N_{и.} \rightarrow \infty$ ) когерентных элементарных вторичных источников (плоских волн), вертикальное положение которых определено высотой  $h_p(x)$  в каждой точке  $x$  в пределах элементарной рассеивающей площадки  $\Delta l$  (см. рис. 4):

$$E_p^{sc}(\theta^i, f) = A_0(\theta^i, f, \epsilon_s) \frac{1}{N_{и.}} \sum_{m=1}^{N_{и.}} \exp[-2ik_0 h_p(x_m) \cos \theta^i], \quad (3)$$

где  $A_0(\theta^i, f, \epsilon_s) = E_0 R_{\text{глад.,г,в}}(\theta^i, f, \epsilon_s)$  – амплитуда источников,  $E_0$  – амплитуда падающей волны,  $R_{\text{глад.,г,в}}(\theta^i, f, \epsilon_s)$  – коэффициент отражения Френеля от плоской границы раздела воздух–почва на горизонтальной (г) и вертикальной (в) поляризациях, здесь как и выше  $\epsilon_s$  – КДП почвенного покрова,  $k_0 = 2\pi f/c$  – волновое число свободного пространства,  $c$  – скорость света в вакууме,  $h_p(x)$  –  $p$ -ая реализация случайного распределения высот, содержащая элементарную площадку. Для определенности в уравнении (3) временная зависимость комплексных амплитуд поля определена  $e^{-i\omega t}$ . В данном подходе пренебрегается дифракцией волн на выступах и склонах неровностей поверхности почвы, явлениями взаимного затенения площадок и взаимодействия источников. При этом полагается, что амплитуда источников в каждой точке элементарной площадки одинакова и пропорциональна коэффициенту отражения Френеля, а фазы источников имеют случайные

значения, обусловленные профилем высот неровностей поверхности почвы  $h_p(x)$  в пределах элементарной площадки  $\Delta l$ . Рассмотрение поверхности почвы в виде совокупности независимо рассеивающих элементарных площадок не является строго обоснованным для поверхностей с произвольным профилем шероховатостей. Подобное рассмотрение допустимо с тем большим основанием, чем больше размер элементарных рассеивающих площадок, и чем они точнее аппроксимируют профиль неровностей рассеивающей поверхности (условия для применимости метода Кирхгофа) [25]. Однако, представление отраженного поля в виде волн элементарных источников, расположенных на различной высоте в слое шероховатой поверхности, соответствует принципу Гюйгенса-Френеля [26, с. 27]. Окончательно абсолютные значения когерентной компоненты коэффициента отражения,  $R_{\text{ког.}}(\theta^i, f)$ , и полного значения коэффициента отражения (когерентная и диффузная компоненты),  $R_{\text{ког.+диф.}}(\theta^i, f)$  могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$\begin{aligned} R_{\text{ког.}}(\theta^i, f) &= \frac{1}{N_{\text{пл.}}|E_0|} \left| \sum_{p=1}^{N_{\text{пл.}}} E_p^{sc}(\theta^i, f) \right|, \\ R_{\text{ког.+диф.}}(\theta^i, f) &= \frac{1}{N_{\text{пл.}}|E_0|} \sum_{p=1}^{N_{\text{пл.}}} |E_p^{sc}(\theta^i, f)|. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнения (3)-(4) выражают численно-аналитическую модель (чам) коэффициента отражения от шероховатой поверхности почвы.

#### 4. Тестирование численно-аналитической модели коэффициента отражения

Для расчета коэффициентов отражения по формулам (3) и (4) необходимо определить размер  $\Delta l$  элементарной площадки, в пределах которой осуществляется усреднение полей от вторичных источников и далее по всему ансамблю профилей шероховатости поверхности почвы. С этой целью мы воспользовались литературными данными численного расчета коэффициентов отражения (излучательной способности) почвенного покрова на основе решения граничной задачи о рассеянии волн методом конечных разностей (Numerical Maxwell Model in 3-D Simulations, NMM3D) [10,11] и улучшенным методом интегральных уравнений (Advanced Integral Equation Model, AIEM) [12]. Параметр  $\Delta l$  находился для каждого частного случая в ходе решения обратной

задачи при минимизации нормы невязки между коэффициентами отражения, рассчитанными с использованием моделей (NMM3D, АИЕМ), и с помощью созданной численно-аналитической модели (3)-(4). Во всех используемых независимых численных расчетах автокорреляционная зависимость между различными точками высот неровностей поверхности почвы описывалась экспоненциальной функцией (2). Дополнительно было проведено сравнение с аналитической моделью (ам) когерентного коэффициента отражения, оценка которого получена в условиях нормального распределения высот неровностей поверхности почвенного покрова [24, 27]:

$$R_{a.m.,г,в}(\theta^i, f) = |R_{глад.,г,в}(\theta^i, f)| \exp[-(2k_0\sigma_{ш}\cos\theta^i)^2]. \quad (5)$$

На рис. 5–7 представлены результаты сопоставления значений коэффициентов отражения, рассчитанных на основе численно-аналитической модели (3)-(4) и методами NMM3D, АИЕМ при оптимально найденном значении размера элементарной рассеивающей площадки  $\Delta l$ , в каждом из случаев. Установлено, что найденные значения  $\Delta l$  зависят от частоты падающей волны и для всех рассмотренных случаев варьировались в пределах от  $\Delta l/\lambda \approx 0,9$  до 1,4. Вариации  $\Delta l$  также обусловлены углом зондирования  $\theta^i$ , величинами среднеквадратического отклонения,  $\sigma_{ш}$ , и корреляционной длиной,  $l_k$ , высот неровностей поверхности почвенного покрова. Однако, какую-либо зависимость  $\Delta l$  от  $\theta^i$ ,  $\sigma_{ш}$ ,  $l_k$  установить не удалось при определяющей зависимости  $\Delta l$  от частоты зондирующей волны. В качестве нижнего предела оцененные размеры элементарных площадок рассеяния хорошо согласуются по порядку величины со спектральной компонентой шероховатости поверхности почвы, соответствующей волновому числу  $2k_0\cos\theta^i$  [28, с. 480], т.е. для  $\Delta l_{min} = \lambda/2 \cos\theta^i$ . С другой стороны, сверху размер таких площадок в оптическом диапазоне оценивается величиной  $\Delta l_{max} > \lambda$  [29, с. 67]. Укажем также на аналогию с элементарным электрическим диполем, чей максимум излучения приходится в направлении перпендикулярном его оси при  $\Delta l_{max} < 1.25 \lambda$  [30, с. 54]. С ростом среднеквадратического отклонения высот неровностей поверхности почвенного

покрова возрастает доля диффузного рассеяния. Данное явление хорошо описывается предложенной простой моделью (3)-(4) при сравнении как с методом NMM3D [10, 11], так и АИЕМ [12] (см. рис. 5-7). Предложенная модель (3)-(4) демонстрирует бóльшую точность (см. рис. 6, красная и синяя линии; рис 7, голубая, тёмно-зеленая линии и красная, черная и синяя линии), по сравнению с эмпирической моделью [8], параметры которой были оптимально подобраны на основе экспериментально измеренных значений излучательной способности почв с различной степенью шероховатости (см. рис. 2а, кривая 1). Когерентная компонента, рассчитанная на основе численной модели (3)-(4) не зависит от длины корреляции и при увеличении количества элементарных площадок рассеяния совпадает (см. рис. 8) с аналитической моделью (5). Предложенная численно-аналитическая модель (см. рис. 8, усреднение коэффициента отражения для 10, 36 и 1000 реализаций элементарных рассеивающих площадок) хорошо описывает флуктуации, наблюдаемые в ходе эксперимента при ограниченном наборе числа усреднений 36, измеряемого в [15] коэффициента отражения (см. рис. 8, выколотые точки).

На рис. 9 представлены результаты сопоставления между значениями коэффициента отражения, рассчитанного на основе предложенной модели (3)-(4) и данными расчетов на основе прямого численного метода NMM3D [10,11] и метода АИЕМ [12], а также эксперимента [15] (см. рис. 5–8). Коэффициент детерминации и СКО между значениями полного (когерентная и диффузная компоненты) коэффициента отражения, рассчитанного на основе (3)-(4) и на основе методов NMM3D, АИЕМ, оказались равны  $R^2_{\text{ког.+диф.}}=0,981$  и  $\text{СКО}_{\text{ког.+диф.}}=0,35\text{дБ}$ . Коэффициент детерминации и СКО между значениями когерентной компонентой коэффициента отражения, рассчитанной на основе модели (3)-(4) и по данным эксперимента [15], оказались равны  $R^2_{\text{ког.}}=0,923$  и  $\text{СКО}_{\text{ког.}}=1,74\text{дБ}$  (завышенная погрешность свидетельствует о больших флуктуациях экспериментально измеренной в работе [15] когерентной компоненты коэффициента отражения).

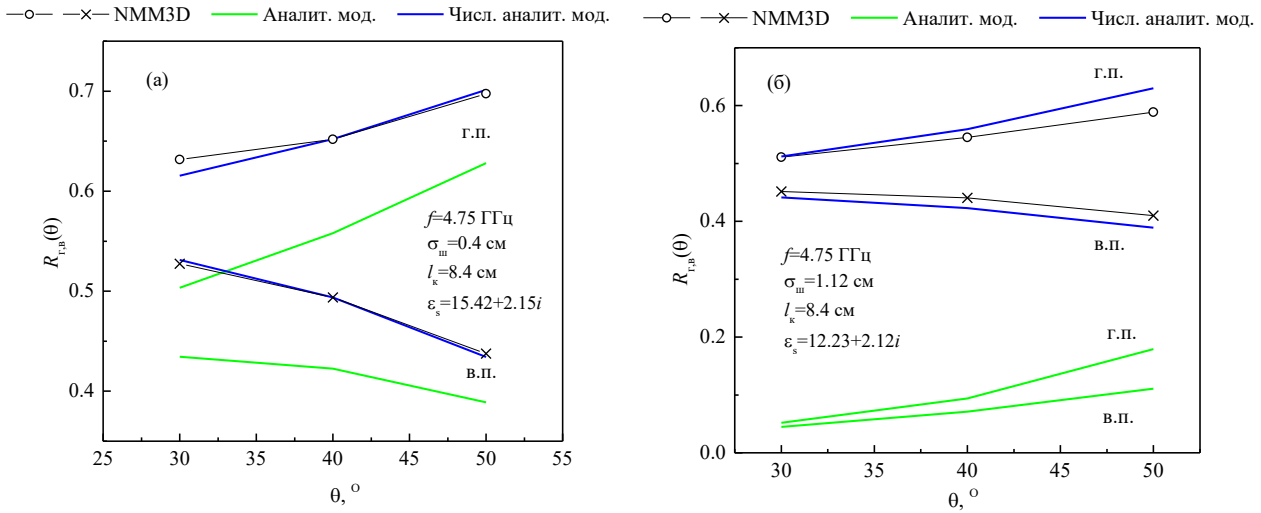


Рис. 5. Угловая зависимость коэффициента отражения (частота 4,75 ГГц) на горизонтальной (г.п.) и вертикальной (в.п.) поляризациях для почв с различной КДП и степенью шероховатости. Синяя линия - расчет по численно-аналитической модели (3)-(4). Зеленая линия - расчет по аналитической модели (5). Линия с символами – расчеты, приведенные в работе [11]. Оптимальный размер элементарной площадки равен  $\Delta l/\lambda=0,9$

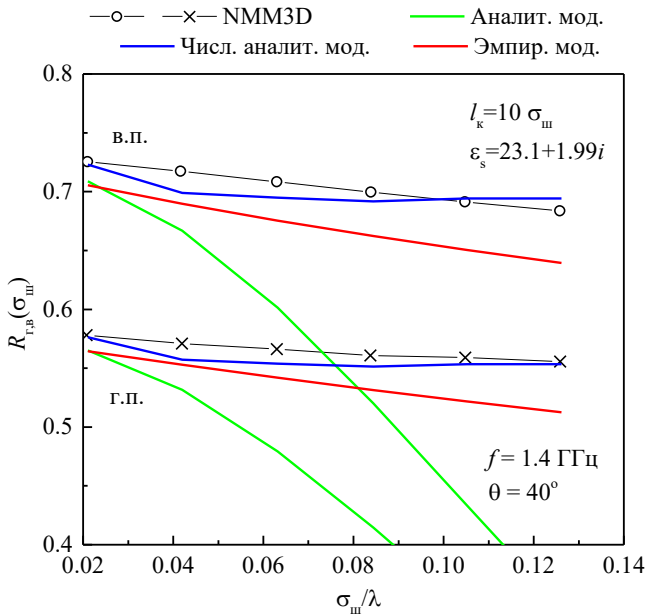


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения на вертикальной (в.п.) и горизонтальной (г.п.) поляризациях (фиксирован угол и частота наблюдений) от нормированного среднеквадратического отклонения высот неровностей поверхности почвы. Линия с символами – расчеты, приведенные в работе [10]. Зеленая линия - расчет по аналитической модели (5). Синяя линия – созданная численно-аналитическая модель (3)-(4); оптимальный размер элементарной площадки  $\Delta l/\lambda=1,1$ . Красная линия - расчеты на основе эмпирической модели [8, модель «А» из таб. 2]

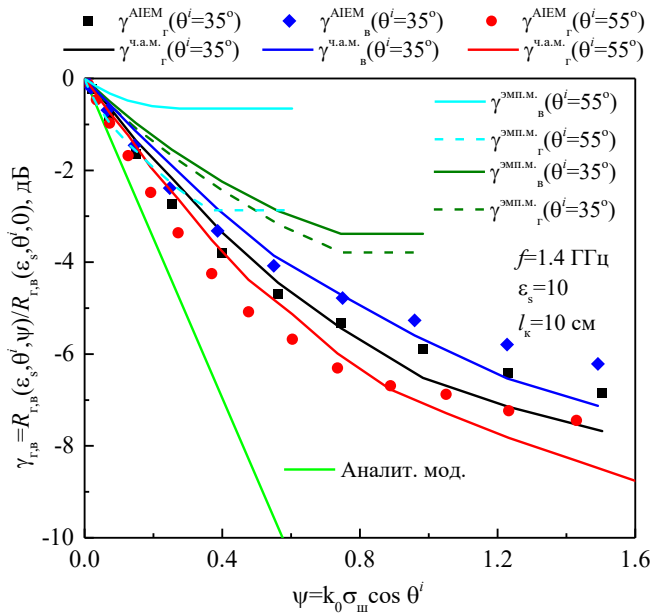


Рис. 7. Зависимость нормированного коэффициента отражения (частота 1,4 ГГц) на вертикальной (в) и горизонтальной (Г) поляризациях от нормированного среднеквадратического отклонения высот неровностей поверхности почвы. Синяя, черная и красные точки расчет методом интегральных уравнений (АИЕМ) из работы [12]. Светло-зеленая линия - расчет по аналитической модели (5). Синяя, чёрная и красная линии - расчет на основе численно-аналитической модели (3)-(4); оптимальный размер элементарной площадки  $\Delta l/\lambda=1,35$ . Тёмно-зелёные и голубые линии - расчеты на основе эмпирической модели [8, модель «А» из таб. 2]

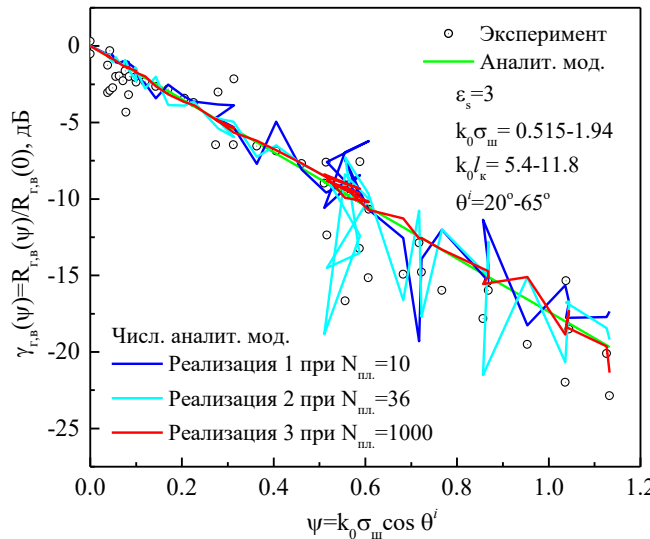


Рис. 8. Зависимость когерентной компоненты коэффициента отражения (частота 10 ГГц), измеренного в [15], в зависимости от нормированного среднеквадратического отклонения высот неровностей поверхности почвы. Зеленая линия - расчет по аналитической модели (5). Синяя, голубая и красные линии – численный расчет по модели (3)-(4) для различного числа реализаций профиля шероховатости поверхности почвы  $N_{пл}$

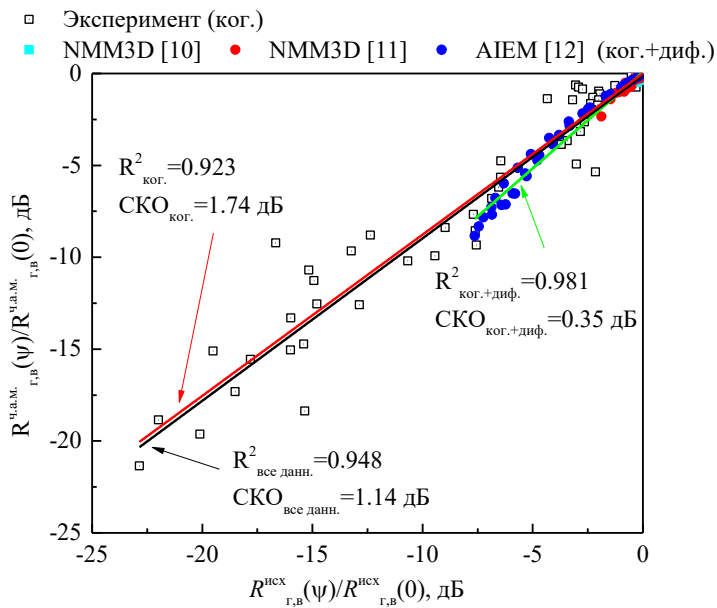


Рис. 9. Нормированный коэффициент отражения, рассчитанный на основе созданной численно-аналитической модели (чам) (3)-(4) со средним размером элементарных рассеивающих площадок  $\Delta l/\lambda=1.2$  в зависимости от исходных значений нормированных коэффициентов отражения, рассчитанных на основе моделей NMM3D и AIEM (см. рис. 5–7), а также измеренных (выколотые квадраты) в эксперименте (см. рис. 8)

## 5. Широкополосный рефлектометрический метод измерения влажности и степени шероховатости поверхности почвы

С целью разработки рефлектометрического метода измерения влажности и степени шероховатости поверхности почвы исследуем закономерности поведения коэффициента отражения от характеристик почвенного покрова. В ходе дальнейших расчетов с применением численной модели (3)-(4) средний размер элементарных площадок рассеяния будем задавать равным  $\Delta l/\lambda=1,2$ . Рассмотрим случай моностатической радиолокации при зондировании в надир  $\theta^i = 0$ . Также с целью уменьшения влияния плотности, влажности и типа почвенного покрова будем анализировать коэффициенты отражения волн от шероховатой границы нормированные на коэффициент отражения Френеля от гладкой границы  $R_{\text{глад.}}$ . Для определенности  $R_{\text{глад.}}$  рассчитывался при  $\epsilon_s=15,42+i2,15$ .

Когерентная компонента коэффициента отражения резко уменьшается по экспоненциальному закону как при увеличении частоты, так и СКО высот неровностей поверхности почвенного покрова (см. формулу (5) и рис. 10, зеленая линия). Полное значение коэффициента отражения за счет влияния диффузной компоненты рассеяния волны с ростом частоты при фиксированном значении  $\sigma_{\text{ш}}$



и  $l_k$  насыщается до некоторого уровня, определяемого величинами  $\sigma_{ш}$  и  $l_k$ . При заданном СКО высот неровностей поверхности почвы полное значение коэффициента отражения уменьшается с уменьшением длины корреляции  $l_k$ . Из данных представленных на рис. 10 видно, что как когерентная компонента, так и полное значение коэффициента отражения можно рассматривать как фильтр нижних частот с характерной частотой среза,  $f_{срез.}$ .

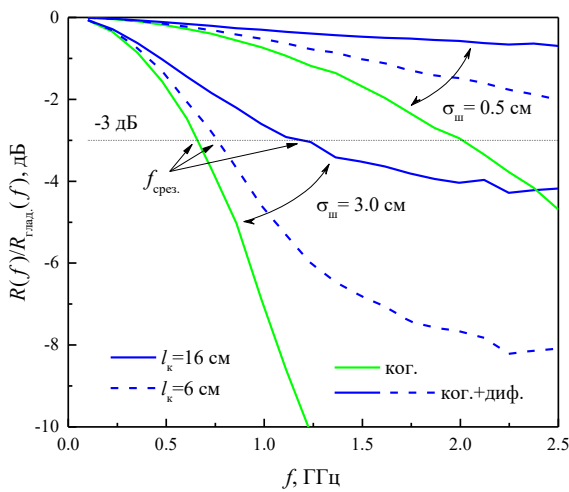


Рис. 10. Спектр нормированного коэффициента отражения, когерентная компонента и полное значение

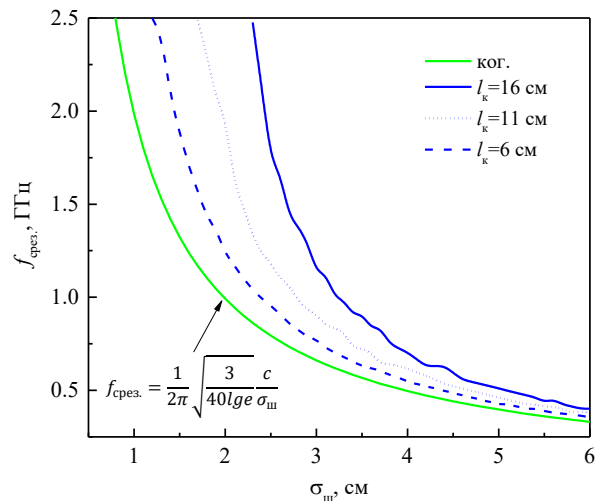


Рис. 11. Частота среза в спектре коэффициента отражения в зависимости от СКО и длины корреляции высот неровностей почвенного покрова

При стремлении длины корреляции  $l_k \rightarrow 0$ , частота среза стремится к частоте среза, соответствующей когерентной компоненте коэффициента отражения (см. рис. 11 формулу в подписи). Для обеспечения проникновения наибольшей мощности волны в почвенный слой выбираемая частота зондирования должна уменьшаться, как с увеличением  $\sigma_{ш}$ , так и с уменьшением  $l_k$ . При величинах  $\sigma_{ш} > 4$  см (см. рис. 11), выбор оптимальной частоты зондирования (менее 480 МГц) все меньше зависит от вариаций  $l_k$ . С другой стороны при малых значениях  $\sigma_{ш} < 3$  см (при  $l_k \sim 16$  см) –  $\sigma_{ш} < 2$  см (при  $l_k \sim 6$  см) выбор частот зондирования ниже частоты среза сокращает динамический диапазон изменений коэффициента отражения (см рис. 10 насыщение коэффициента отражения), что приводит к неоднозначности решения задачи

относительно  $\sigma_{ш}$  (см. рис. 11, большие вариации частот среза соответствуют малым вариациям  $\sigma_{ш}$  в области их малых значений). В результате проведенного анализа следует, что широкий набор вариаций параметров  $\sigma_{ш}$  и  $l_k$  как естественных, так и обрабатываем сельскохозяйственных почв (см. рис. 2 и таб. 2), обуславливает необходимость применение сверхширокополосных сигналов для дистанционного зондирования характеристик поверхности почвенного покрова.

Спектр фазы коэффициента отражения (когерентная компонента) был рассмотрен на примере сельскохозяйственной почвы «Р» (см. таб. 1) для двух объёмных влажностей  $W=6\%$  и  $W=20\%$  (см. рис. 12). СКО высот неровностей поверхности почвы по отношению к длине корреляции является определяющей величиной обуславливающую изменение фазы коэффициента отражения с ростом частоты. Для сильно шероховатой поверхности почвы при  $\sigma_{ш}=3\text{ см}$ , в МГц области частот наблюдается резкий рост фазы коэффициента отражения и последующее насыщение (на частотах выше 600 МГц фаза практически не меняется).

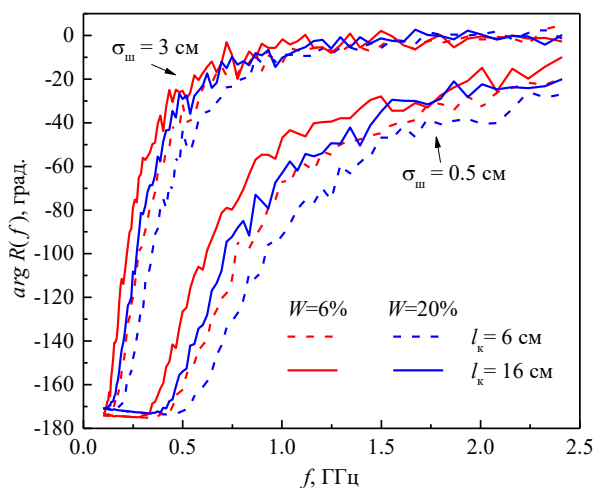


Рис. 12. Спектр фазы коэффициента отражения в зависимости от влажности почвенного покрова, СКО и длины корреляции высот неровностей поверхности почвенного покрова

Для менее шероховатой поверхности почвы с  $\sigma_{ш}=0,5\text{ см}$ , насыщение фазы коэффициента отражения наблюдается в ГГц области на частотах более 1,5 ГГц. В области насыщения, фаза коэффициента отражения не зависит от влажности

почвенного покрова (см. рис. 12). Сопоставление амплитудных (см. рис. 10) и фазовых (см. рис. 12) спектров коэффициентов отражения указывает на перспективность использования амплитудных спектров для восстановления влажности и шероховатости поверхности почвенного покрова. Т.к. фаза коэффициента отражения является неоднозначной функцией при вариации влажности и длины корреляции (см. рис. 12). Неоднозначность амплитудных спектров коэффициента отражения при вариации влажности и длины корреляции может быть устранена с помощью предложенного ниже алгоритма.

Методику измерения влажности и степени шероховатости поверхности почвенного покрова будем строить на основе полного значения коэффициента отражения. (Для когерентной компоненты подход аналогичный).

Первое, как видно из рис. 1 в МГц диапазоне частот спектр КДП обладает существенной частотной дисперсией. Расчеты (которые мы не приводим здесь) показывают, что вариации модуля коэффициента отражения Френеля  $|R_{\text{глад.}}(f)|$  в диапазоне частот от сотен МГц до первых единиц ГГц может достигать до 2дБ (при фиксированных значениях влажности и типе почвы). Данные изменения сопоставимы по величине с вариациями коэффициента отражения в зависимости от степени шероховатости поверхности почвы в области малых  $\sigma_{\text{ш}}$  в ГГц диапазоне частот и при больших  $\sigma_{\text{ш}}$  в МГц диапазоне частот (см. рис. 10). Вводя критерий  $d|R_{\text{глад.}}(f)|/df < 0,01$  мы определили для каждой из почв (см. таб. 1) граничную частоту  $f_{\text{дисп.}}$ , выше которой можно пренебречь явлениями дисперсии КДП почвы и считать  $|R_{\text{глад.}}(f)|$  не зависящим от частоты (см. рис. 13). Величина  $d|R_{\text{глад.}}(f)|/df$  зависит от влажности почвы и находилась как среднее от измеренных значений влажности для каждого из почвенных образцов. С коэффициентом детерминации  $R^2=0,715$  и СКО=0,1 МГц частота  $f_{\text{дисп.}}$ , выше которой можно пренебречь явлениями дисперсии КДП почвы и считать  $|R_{\text{глад.}}(f)|$  не зависящим от частоты, описывается линейной зависимостью:  $f_{\text{дисп.}}=0,26+0,7 m_{\text{гл.}}$ , где  $f_{\text{дисп.}}$  в ГГц,  $m_{\text{гл.}}$  – весовое содержание глины в почве в долях. На графике (см. рис. 13) отсутствуют песчаные почвы «В», «I», «L», для

которых условие  $d|R_{\text{глад.}}(f)|/df < 0,01$  выполняется для любых частот из диапазона выше 45 МГц. Для почвы «J» отсутствовали данные для объемной влажности менее 50% (максимальная влажность, принятая нами для анализа всех почв в этой работе) и нами эта почва не отражена на рис. 13. Для дальнейших расчетов будем задавать  $f_{\text{дисп.}}=520$  МГц, которое в среднем соответствует почвам «M», «L», «P», «W».

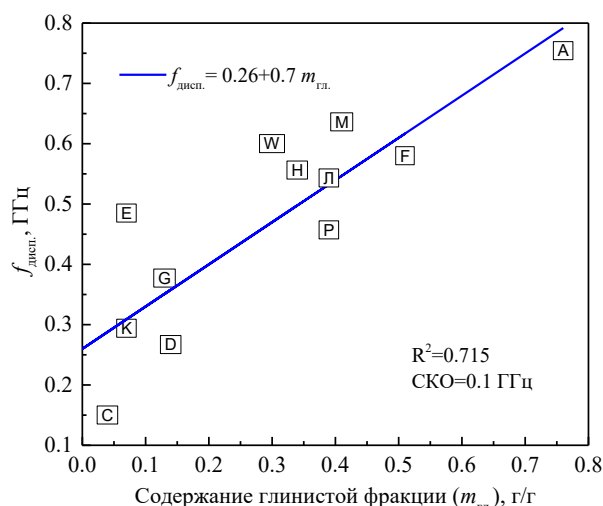


Рис. 13. Зависимость частоты дисперсии от содержания глинистой фракции в почвенных образцах

Второе, на частотах выше  $f_{\text{мин.}}=f_{\text{дисп.}}=520$  МГц для большинства почв будем пренебрегать вкладом частотной дисперсии КДП в коэффициент отражения. Отношение модулей коэффициентов отражения:  $R_{\text{норм.}}(f, \epsilon_s, \sigma_{\text{ш}}, l_k) = R_{\text{ког.+диф.}}(f, \epsilon_s, \sigma_{\text{ш}}, l_k) / R_{\text{ког.+диф.}}(f_{\text{мин.}}, \epsilon_s, \sigma_{\text{ш}}, l_k)$  слабо зависит от частотной дисперсии КДП и от самой величины КДП почвы (типа почвенного покрова, его влажности, плотности сухого сложения и содержания глинистой фракции) и в основном амплитудный спектр  $R_{\text{норм.}}(f, \epsilon_s, \sigma_{\text{ш}}, l_k)$  определяется степенью шероховатости поверхности почвы ( $\sigma_{\text{ш}}, l_k$ ).

Третье, как видно из графиков на рис. 10 модуль коэффициента отражения  $R_{\text{норм.}}(f, \epsilon_s, \sigma_{\text{ш}}, l_k)$  является неоднозначной функцией ( $\sigma_{\text{ш}}, l_k$ ) в промежуточной области  $0.5\text{см} < \sigma_{\text{ш}} < 3,0$  см. Т.е. всегда можно подобрать такую пару значений ( $\sigma_{\text{ш}1}, l_{k1}$ ), для которой спектр  $R_{\text{норм.}}(f, \epsilon_s, \sigma_{\text{ш}1}, l_{k1})$  может совпадать или быть близок к спектру  $R_{\text{норм.}}(f, \epsilon_s, \sigma_{\text{ш}2}, l_{k2})$ . Можно заметить, что влияние  $\sigma_{\text{ш}}$  на

спектральную форму  $R_{\text{норм.}}(f, \varepsilon_s, \sigma_{\text{ш}}, l_k)$  оказывает определяющее значение по сравнению с  $l_k$  (см. рис. 10). В результате для устранения данной неоднозначности предложено зафиксировать  $l_k$  величиной равной среднему значению  $l_{k,\text{эф}}=10\text{см}$ , оцененному на основе репрезентативных экспериментальных данных (см. таб. 2). В этом случае всегда можно подобрать такое однозначное значение  $\sigma_{\text{ш,эф}}$  для которого разница между информативными признаками оцениваемого нормированного коэффициента отражения  $R_{\text{норм.}}(f, \varepsilon_s(W_{\text{эф}}, m_{\text{гл,эф}}, \rho_{d,\text{эф}}), \sigma_{\text{ш,эф}}, l_{k,\text{эф}})$  и истинного значения  $R_{\text{норм.}}(f, \varepsilon_s, \sigma_{\text{ш}}, l_k)$ , вычисленного для какой-либо пары  $(\sigma_{\text{ш}}, l_k)$ , была минимальной:

$$F_1(\sigma_{\text{ш,эф}}) = \sum_{n=1}^{n=N_f} \left| \frac{\sigma_{\text{ш,эф}} = \min F_1(\sigma_{\text{ш,эф}}),}{R_{\text{норм.}}(f_n, \varepsilon_s, \sigma_{\text{ш}}, l_k) - R_{\text{норм.}}(f_n, \varepsilon_s(W_{\text{эф}}, m_{\text{гл,эф}}, \rho_{d,\text{эф}}), \sigma_{\text{ш,эф}}, l_{k,\text{эф}})} \right|, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_s = \varepsilon_s(W, m_{\text{гл}}, \rho_d)$  – КДП почвенного образца, при соответствующей истинной объемной влажности,  $W$ , и истинной плотности сухого сложения,  $\rho_d$ ,  $N_f$  – количество частот из диапазона:  $f_{\text{мин.}}=520$  МГц,  $f_{\text{макс.}}=1,26$  ГГц. В зависимости от доступного количества частот, на которых измерялась КДП почвенных образцов,  $N_f$  варьировалось от 9 до 80. Для определенности средние значения объемной влажности, содержания глинистой фракции и плотности сухого сложения задавались равными  $W_{\text{эф.}}=20\%$ ,  $m_{\text{гл,эф.}}=35\%$ ,  $\rho_{d,\text{эф.}}=1,3$  г/см<sup>3</sup>. При расчете нормированного коэффициента отражения использовалась двух-релаксационная рефракционная диэлектрическая модель Миронова [31]. Задача минимизации (6) решалась прямым методом путем подбора  $\sigma_{\text{ш,эф}}$  из области значений  $\sigma_{\text{ш,эф}} \in [0,1 \text{ см}, 6 \text{ см}]$  с шагом 0,1 см для всех почвенных образцов и для всего репрезентативного набора пар значений  $\sigma_{\text{ш}}$  и  $l_k$ . Таким образом найденные значения  $\sigma_{\text{ш,эф}}$  с коэффициентом детерминации  $R^2=0,909$  и СКО=0,4 см совпадают с истинными значениями  $\sigma_{\text{ш}}$ . Вертикальные вариации найденных значений  $\sigma_{\text{ш,эф}}$  обусловлены вариацией исходных значений  $l_k$  (см. рис. 14). В области истинных (исходных) значений  $\sigma_{\text{ш}} < 0,8 \text{ см}$  (СКО=±0,4 см), к найденным

таким образом  $\sigma_{ш,эф}$ . можно относиться как к подгоночным параметрам минимизирующим функционал (6), т.е. для подбора наиболее близкой спектральной формы  $R_{норм.}(f, \varepsilon_S(W_{эф.}, m_{гл.,эф.}, \rho_{d,эф.}), \sigma_{ш,эф.}, l_{к,эф.})$  к исходному значению  $R_{норм.}(f, \varepsilon_S, \sigma_{ш}, l_{к})$ . В области истинных (исходных) значений  $\sigma_{ш} > 0,8$  см, найденные значения  $\sigma_{ш,эф}$ . могут быть использованы для оценок среднеквадратических отклонений неровностей поверхности почвенного покрова.

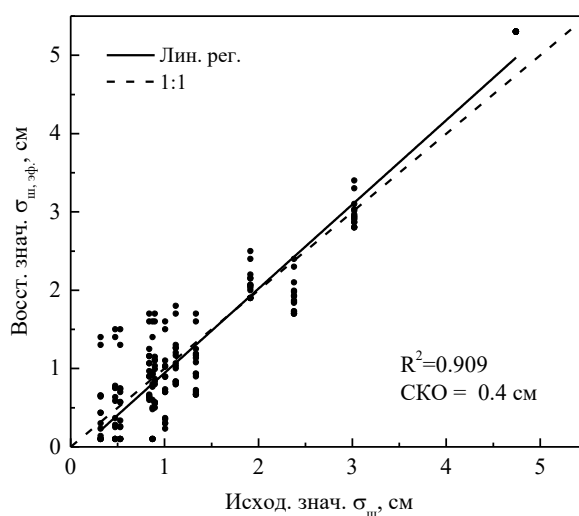


Рис. 14. SKO высот неровностей поверхности почвы, восстановленные на основе предложенного метода в зависимости от исходно заданных значений SKO высот неровностей поверхности почвы

Четвертое, в результате третьего шага, в независимости от типа почвы, её влажности, плотности сухого сложения, была подобрана спектральная форма нормированного коэффициента отражения, которая полностью определяется степенью шероховатости поверхности почвы, либо с использованием истинной пары значений  $(\sigma_{ш}, l_{к})$ , либо восстановленным параметром  $\sigma_{ш,эф}$ . при  $l_{к,эф}=10$  см. Тогда влажность почвы,  $W_{оц.}$ , может быть определена в ходе минимизации нормы невязки между информативными признаками оцениваемого коэффициента отражения  $R(f, \varepsilon_S(W_{оц.}, m_{гл.,эф.}, \rho_{d,эф.}), \sigma_{ш,эф.}, l_{к,эф.})$  и истинного значения  $R(f, \varepsilon_S, \sigma_{ш}, l_{к})$ .

$$W_{оц.} = \min F_2(W_{оц.}),$$

$$F_2(W_{оц.}) = \sum_{n=1}^{n=N_f} \left| \frac{R(f_n, \varepsilon_S, \sigma_{ш}, l_{к}) - R(f_n, \varepsilon_S(W_{оц.}, m_{гл.,эф.}, \rho_{d,эф.}), \sigma_{ш,эф.}, l_{к,эф.})}{R(f_n, \varepsilon_S, \sigma_{ш}, l_{к})} \right|, \quad (7)$$

здесь, как и в (6),  $\varepsilon_s = \varepsilon_s(W, m_{г.л.}, \rho_d)$  – КДП почвенного образца, при соответствующей истинной объемной влажности,  $W$ , и истинной плотности сухого сложения,  $\rho_d$ . Задача минимизации (7) решалась прямым методом путем подбора  $W_{оц.}$  из области значений  $W_{оц.} \in [0\%, 50\%]$  с шагом 2% для всех почвенных образцов и для всего репрезентативного набора пары значений  $\sigma_{ш}$  и  $l_k$ . При этом для каждой пары истинных значений  $\sigma_{ш}$  и  $l_k$  (которые использовались для расчета  $R(f_n, \varepsilon_s, \sigma_{ш}, l_k)$  в выражении (7)), использовались восстановленные на третьем шаге значения  $\sigma_{ш,эф.}$  и  $l_{k,эф.}=10\text{см}$  для расчета  $R(f, \varepsilon_s(W_{оц.}, m_{г.л.,эф.}, \rho_{d,эф.}), \sigma_{ш,эф.}, l_{k,эф.})$  в выражении (7). Таким образом найденные значения  $W_{оц.}$  с коэффициентом детерминации  $R^2=0,975$  и СКО=2% совпадают с истинными значениями  $W$  (см. рис. 15), при которых были измерены КДП почвенных образцов.

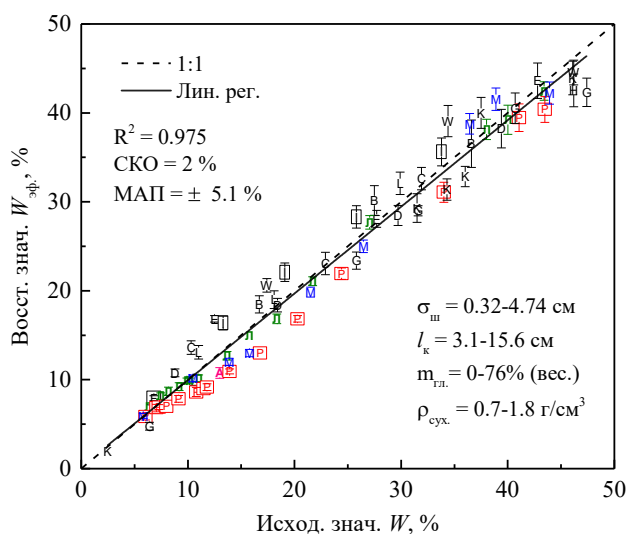


Рис. 15. Объемная влажность почвы, восстановленная на основе предложенного метода в зависимости от исходно заданных значений объемной влажности почвы. МАП-максимальная абсолютная погрешность

## Заключение

Предложенная в данной работе численно-аналитическая модель с пригодной для практического использования точностью описывает когерентную компоненту и полное значение коэффициента отражения электромагнитной волны от шероховатой границы поверхности почвенного покрова в зависимости от частоты электромагнитной волны, угла зондирования, КДП почвы,

среднеквадратического отклонения,  $\sigma_{ш}$ , и длины корреляции,  $l_k$ , высот неровностей поверхности почвенного покрова.

Несмотря на то, что набор независимых данных для тестирования созданной модели был ограничен частотами 1,4 ГГц, 4,75 ГГц и 10 ГГц, применение созданной модели в МГц диапазоне частот является обоснованным по нескольким причинам. Во-первых, тестирование модели осуществлялось в широких масштабах вариаций как абсолютных значений  $\sigma_{ш}$  и  $l_k$ , так и их значений относительно длины волны. Средний размер элементарной площадки рассеяния также определен по отношению к длине волны. Во-вторых, из анализа существующих моделей следует, что, если пренебречь частотной дисперсией КДП почвы, коэффициент обратного радарного рассеяния (излучения) определяется не столько абсолютными значениями  $\sigma_{ш}$  и  $l_k$  сколько их отношением или их величинами относительно длины волны.

Предложенная численно-аналитическая модель коэффициента отражения является приближенной и не учитывает дифракцию волн на выступах и склонах неровностей поверхности почвы, пренебрегается явлениями взаимного затенения элементарных площадок и взаимодействия волн на различных участках поверхности, не учитывается статистическое распределение наклонов элементарных рассеивающих площадок. Вместе с тем, данные ограничения не оказывают критического воздействия на точность предложенной модели коэффициента отражения при сопоставлении с экспериментами и с расчетами на основе прямых численных методов – конечных разностей и интегральных уравнений для широкой номенклатуры неровностей поверхности почвенного покрова и вариаций КДП почвы. По-видимому, именно фазовые соотношения между вторичными источниками поля элементарных рассеивающих площадок являются определяющим фактором при формировании коэффициента отражения для рассмотренных значений среднеквадратических отклонений и длин корреляций высот неровностей поверхности почвы. При этом амплитуда элементарных источников поля может быть задана одинаковой - пропорциональной коэффициенту отражения Френеля от



полупространства, диэлектрическая проницаемость которого совпадает с комплексной диэлектрической проницаемостью почвы; а оптимальный средний размер элементарных рассеивающих площадок может быть задан равным  $\Delta l = 1,2\lambda$ .

Показано, что созданная модель позволяет с коэффициентом детерминации  $R^2_{\text{ког.}} = 0,923$  и СКО<sub>ког.</sub> не более 1,7дБ описывать экспериментально измеренную когерентную компоненту коэффициента отражения (на частоте 10 ГГц) на вертикальной и горизонтальной поляризации, при вариации угла зондирования от  $\theta = 20^\circ$  до  $\theta = 65^\circ$ , среднеквадратического отклонения высот неровностей поверхности почвенного покрова от  $k_0\sigma_{\text{ш}} < 0,2$  до  $k_0\sigma_{\text{ш}} = 1,94$ , длины корреляции от  $k_0l_{\text{к}} = 5,4$  до  $k_0l_{\text{к}} = 11,8$ . Коэффициент детерминации и среднеквадратическое отклонение между полным значением (когерентная и диффузная компоненты) коэффициента отражения, рассчитанного с использованием созданной модели, и рассчитанного на основе метода конечных разностей и метода интегральных уравнений составили  $R^2_{\text{ког.+диф.}} = 0,981$  и СКО<sub>ког.+диф.</sub> = 0,35дБ, соответственно. Данные оценки были получены в рамках следующих условий задач о рассеянии волны: а)  $\theta^i = 40^\circ$ ,  $f = 1,4$  ГГц,  $0,02 < \sigma_{\text{ш}}/\lambda < 0,14$ ,  $l_{\text{к}} = 10\sigma_{\text{ш}}$ ; б)  $\theta^i = 35^\circ$  и  $\theta^i = 55^\circ$ ,  $f = 1,4$  ГГц,  $0 < k_0\sigma_{\text{ш}}\cos\theta^i < 1,6$ ,  $l_{\text{к}} = 10$  см; в)  $\theta^i = 30^\circ \dots 50^\circ$ ,  $f = 4,75$  ГГц,  $\sigma_{\text{ш}} = 0,4$  см,  $\sigma_{\text{ш}} = 1,12$  см,  $l_{\text{к}} = 8,4$  см.

На основе созданной модели показано, что коэффициент отражения представляет собой фильтр низких частот, частота среза которого зависит от среднеквадратического отклонения и длины корреляции высот неровностей шероховатой поверхности почвенного покрова. Частота среза близко к экспоненциальному закону уменьшается при увеличении среднеквадратических отклонений и уменьшении длины корреляции высот неровностей поверхности почвенного покрова.

Показано, что на основе наблюдения спектра модуля полного значения коэффициента отражения в диапазоне частот от 520 МГц до 1,26 ГГц возможно проводить одновременно оценку как СКО высот неровностей  $\sigma_{\text{ш,эф.}}$ , так и

объемной влажности,  $W_{\text{оц.}}$ , поверхности почвенного покрова с точностью пригодной для практического применения. Найденные значения  $W_{\text{оц.}}$  с коэффициентом детерминации  $R^2=0,975$  и СКО=2% совпадают с истинными значениями  $W$ , при которых были измерены КДП почвенных образцов. Найденные значения  $\sigma_{\text{ш,эф.}}$  с коэффициентом детерминации  $R^2=0,909$  и СКО=0,4 см совпадают с истинными значениями  $\sigma_{\text{ш}}$  (при заданном среднем значении  $l_{\text{к,эф.}}=10$  см).

Результаты работы имеют широкое прикладное значения как для одночастотных, так и многочастотных методов обработки радарных и радиометрических данных дистанционного зондирования с целью разработки новых алгоритмов повышенной точности измерения влажности почвы.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках гранта РНФ и Красноярского краевого фонда науки № 22-17-20042.

### Литература

1. Rytov S.M., Kravtsov Yu. A., Tatarskii V.I. *Principles of Statistical Radiophysics 4. Wave propogation through random media*. Springer-Verlag. 1989. 188 p. <https://link.springer.com/book/9783642726842>
2. Ceraldi E., Franceschetti G., Iodice A., Riccio D. Estimating the soil dielectric constant via scattering measurements along the specular direction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. V.43. №2. P.295-305. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.841357>
3. Voronovich A. Small-slope approximation for electromagnetic wave scattering at a rough interface of two dielectric half-spaces. *Waves in Random Media*. 1994. V.4. №3. P.337-367. <https://doi.org/10.1088/0959-7174/4/3/008>
4. Fung A.K., Li Z.Q., Chen K.S. Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992. V.30. №2. P.356-369. <https://doi.org/10.1109/36.134085>

5. Chen K.S., Wu T.D., Tsang L., Li Q., Shi J.C., Fung A.K. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. V.41. №1. P.90-101. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.807587>
6. Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.T. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1992. V.30. №2. P.370-381. <https://doi.org/10.1109/36.134086>
7. Dubois P.C., van Zyl J., Engman T. Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1995. V.33. №4. P.915-926. <https://doi.org/10.1109/36.406677>
8. Lawrence H., Wigneron J. -P., Demontoux F., Mialon A., Kerr Y.H. Evaluating the Semiempirical H - Q Model Used to Calculate the L-Band Emissivity of a Rough Bare Soil. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2013. V.51. №7. P.4075-4084. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2226995>
9. Muzalevskiy K.V., Ruzhecka Z., Mironov V.L. Multifrequency Radiometric Method of the Temperature Profile Measurement in the Active Topsoil. *Radiophys Quantum El.* 2015. V.58. P.339-349. <https://doi.org/10.1007/s11141-015-9608-z>
10. Huang S., Tsang L., Njoku E.G., Chan K.S. Backscattering Coefficients, Coherent Reflectivities, and Emissivities of Randomly Rough Soil Surfaces at L-Band for SMAP Applications Based on Numerical Solutions of Maxwell Equations in Three-Dimensional Simulations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2010. V.48. №6. P.2557-2568. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2040748>
11. Zhou L., Tsang L., Jandhyala V., et al. Emissivity simulations in passive microwave remote sensing with 3-D numerical solutions of Maxwell equations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2004. V.42. №8. P.1739-1748. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.830639>
12. Schwank M. et al. Comparison of Two Bare-Soil Reflectivity Models and Validation With L-Band Radiometer Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 2010. V.48. №1. P.325-337. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2026894>

13. Schneeberger K., Schwank M., Stamm C., Rosnay P.D., Mätzler C., Flüher H. Topsoil structure influencing soil water retrieval by microwave radiometry. *Vadose Zone Journal*. 2004. V.3. P.1169-1179. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.1169>
14. Mätzler C. Thermal Microwave Radiation: *Applications for Remote Sensing*. The Institution of Engineering and Technology. Michael Faraday House, United Kingdom. 2006. 584 p. <https://doi.org/10.2136/vzj2004.1169>
15. De Roo R.D., Ulaby F.T. Bistatic specular scattering from rough dielectric surfaces. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1994. V.42. №2. P.220-231. <https://doi.org/10.1109/8.277216>
16. Curtis J.O., Weiss C.A. Everett J.B. *Effect of soil composition on complex dielectric properties*. US Army Corps of Engineers. Technical report EL-95-34. 1995. 285 p.
17. Mironov V.L., Molostov I.P., Lukin Y.I., Karavaysky A.Y., Fomin S.V. Frequency-, temperature-, and texture-dependent dielectric model for frozen and thawed arctic mineral soils. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*. St. Petersburg-Russia. 2017. P.2546-2553. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262181>
18. Wagner N., Emmerich K., Bonitz F., Kupfer K. Experimental Investigations on the Frequency- and Temperature-Dependent Dielectric Material Properties of Soil. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2011. V.49. №7. P.2518-2530. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2108303>
19. Зубков С.Г. *Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности*. Москва, Советское радио. 1968. 224 с.
20. Wigneron J.-P., et al. Evaluating an Improved Parameterization of the Soil Emission in L-MEB. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2011. V.49. №4. P.1177-1189. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2075935>
21. Lawrence H. *Modelling the effects of surface roughness and a forest litter layer on passive microwave observations: application to soil moisture retrieval by the SMOS mission. Continental interfaces, environment*. PhD Thesis. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I. 2010. 236 p. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01024075>

22. de Agirre A.M. *Analysis of surface roughness in agricultural soils using in-situ measurements and remote sensing techniques*. PhD Thesis. University of Navarre. Pamplona-Spain. 2017. 179 p.  
<https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/28890?show=full>
23. Tsang L., Kong J., Ding K. *Scattering of Electromagnetic Waves: Numerical Simulation*. Wiley-Interscience. 2000. 436 p.
24. Городницкий Г.М. К вопросу о статистической интерференции при отражении света от матовых стеклянных поверхностей. *Оптика и спектроскопия*. 1963. Т.15. №1. С.113-118.
25. Полянский В.К., Рвачёв В.П. Рассеяние света при отражении от статистически распределенных микроплощадок. *Оптика и спектроскопия*. 1967. Т.12. №2. С.279-287.
26. Кошеляев Е.М., Бородулин В.П., Замбрицкий А.П., Пузанов А.А. Диффузное отражение света от шероховатых поверхностей. *Вестник Московского университета. Серия. Физика. Астрономия*. 1977. Т.18. №5. С.25-34.
27. Choudhury B.J., Schmugge T.J., Chang A., Newton R.W. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils. *Journal of Geophysical Research*. 1979. V.84. №9. P.5699- 5706. <https://doi.org/10.1029/JC084iC09p05699>
28. Ishimaru A. *Wave Propagation and Scattering in Random Media. Vol 2: Multiple Scattering, Turbulence, Rough Surfaces, and Remote-Sensing*. Academic press. 1978. 572 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-10906-3>
29. Иванов А.П. *Оптика рассеивающих сред*. Минск, Наука и техника. 1969. 592 с.
30. Драбакин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. *Антенно-фидерные устройства*. Москва, Советское радио. 1974. 536 с.
31. Mironov V.L., Bobrov P.P., Fomin S.V. Dielectric model of moist soils with varying clay content in the 0.04 to 26.5 GHz frequency range. *International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Krasnoyarsk-Russia. 2013. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2013.6693613>

**Для цитирования:**

Музалевский К.В. Широкополосный рефлектометрический метод измерения влажности и степени шероховатости поверхности почвы. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.5>