

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.15>

УДК: 537.87

ЗАВИСИМОСТЬ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ АГРОПОЧВ В СВЕРХШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ ОТ ТИПА, СТЕПЕНИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ И ПРОФИЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ АГРОПОЧВ

Музалевский К.В., Фомин С.В., Каравайский А.Ю.

**Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии
наук - обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38**

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2022 г.

Аннотация. В данной работе исследовано влияние объемной влажности от 0% до 40% (вертикальных профилей влажности), плотности сухого сложения от 0.4 до 1.8 г/см³, содержания глинистой фракции от 0.15 до 0.55 г/г (типа агропочвы), среднеквадратических отклонений (СКО) высот неровностей поверхности от 0 до 4 см почвенного покрова на вариации коэффициента отражения в сверхширокой полосе частот от 100-400 МГц до 1.26-2.4 ГГц. Расчет коэффициента отражения выполнен для гладкой и шероховатой границы почвенного покрова. При расчете коэффициента отражения использовалась двух-релаксационная диэлектрическая модель Миронова (входные параметры: плотность сухого сложения, содержание глинистой фракции, объемная влажность почвы, частота электромагнитной волны). Показано, что коэффициент отражения является неоднозначной функцией содержания глинистой фракции и плотности сухого сложения почв; погрешность восстановления высоких значений влажности почв может быть в 5 раз выше, чем для сухих почв. По отношению к содержанию глинистой фракции и плотности сухого сложения почвы, СКО высот неровностей поверхности почвы является

доминирующим параметром неопределенность в задании, которого существенно влияет на погрешность восстановления влажности почв. Для рассмотренных разнообразных вертикальных профилей влажности почвы, показано, что эффективная толщина поверхностного слоя агропочвы, формирующего коэффициент отражения, не превышает 2 см при частоте зондирования выше 1 ГГц. При объемной влажности поверхности почвы более 28% величина коэффициента отражения во всем исследованном диапазоне частот от 433 МГц до 1.26 ГГц не зависит от вертикального распределения влаги. Проведенные исследования устанавливают количественные ограничения на точность восстановления влажности почвы при заданной погрешности исходных параметров модели: содержание глинистой фракции, плотности сухого сложения почвы, степени шероховатости поверхности почвы, которые должны учитываться при разработке алгоритмов дистанционного зондирования влажности агропочв.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, рефлектометрия, коэффициент отражения, 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, rsdkm@ksc.krasn.ru

Введение

Проведенные исследования в последнее время указывают [1-6] на перспективность применения сверхширокополосных методов радиолокации для дистанционного зондирования вертикальных профилей влажности поверхностного слоя почв. Частотный диапазон сверхширокополосных (СШП) радиоволновых методов дистанционного зондирования влажности почвы, с одной стороны, ограничен неоднозначной зависимостью комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) от влажности почв в МГц диапазоне

частот (ниже первых десятков МГц) [7]; с другой стороны, волны СВЧ диапазона (первые единицы ГГц) обладают ограниченной глубиной проникновения в почву и значительным рассеянием на случайных неровностях поверхности почвы и элементах растительного покрова [8].

Одним из основных элементов алгоритмов измерения влажности почвы, на основе СШП дистанционных рефлектометрических измерений, являются диэлектрические модели почв [1, 6]. В настоящее время известен ряд диэлектрических моделей: Бруггерман [9], де Лур [10], Бирчак [11], Добсон [12, 13], Шмагге [14], Боярский [15], Парк [16], Миронов [17], которые могут быть использованы для расчета КДП почв (как смеси различных компонент). Однако только некоторые из них (Добсон [12], Шмагге [14], Миронов [17]) использовались практически ранее или используются в настоящее время в спутниковых алгоритмах восстановления влажности почв (частота 1.4 ГГц) [18, 19]. С одной стороны, диэлектрические модели [12], [14], [17] созданы на ограниченном наборе почвенных образцов и нуждаются в дополнительной валидации. (Общая тенденция смещения рабочей частоты приборов дистанционного зондирования в МГц область указывает на особую актуальность проведения такого тестирования в сверхширокой полосе частот для широко используемых диэлектрических моделей [12], [14], [17]). С другой стороны, остается малоизученным вопрос о погрешности восстановления влажности почвы и вариаций коэффициента отражения в сверхширокой полосе частот в зависимости от вариаций параметров диэлектрических моделей: плотность почвы, тип почвы, влажность почвы, частота электромагнитной волны. Данному кругу вопросов в литературе посвящен крайне ограниченный набор статей [20, 21, 22]. В работе [20] продемонстрировано, что в Р (0.3-1 ГГц), L (1-2 ГГц), С (4-8 ГГц), X (8-12 ГГц) диапазонах частот точность расчета измеренных спектров действительной части КДП с использованием диэлектрических моделей (Добсон [12], Шмагге [14], Миронов [17]) зависит от типа и влажности почв (почвенные образцы содержали 6.7%, 9.7%, 19.1% и 39.2% глинистой фракции по весу). Утверждается, что диэлектрическая модель

Шмагге [14] по сравнению с моделью Добсон [12] с меньшей погрешностью описывают КДП сухих почв, а одно- [17] и двух- [23] релаксационные модели Миронова лучше описывают КДП слабоглинистых почв в МГц диапазоне частот. В работе [20] показано, что равенство в действительных значениях КДП на исследуемом наборе почв может достигаться при разнице во влажности, заданной в диэлектрических моделях до 9-12%. При этом погрешность восстановления влажности почвы будет превышать 4%, если погрешность задания содержания глинистой фракции в диэлектрических моделях превысит 1.4 раза [20]. Величина погрешности восстановления влажности почвы растет с увеличением влажности почвы (примерно до уровня максимального содержания связанной воды) [21, 22]. В работе [24] на примере 8-ми почв с вариацией глинистой фракции от 7% до 62%, показано, что одно-релаксационной модель Миронова [17] имеет большую точность при расчете КДП почвенных образцов в L-диапазоне частот по сравнению с диэлектрическими моделями Халликаинен [25], Добсон [12] и Шмагге [14]. При этом погрешности восстановления влажности почвы может достигать до 16% [24].

Вместе с тем, в литературе, помимо, влияния глинистой фракции остаются недостаточно изучены вопросы влияния содержания органического вещества, плотности сухого сложения, степени шероховатости поверхности почвы, а также вертикальных профилей влажности на вариации коэффициента отражения и погрешность восстановления влажности почвы в сверхширокой полосе частот. В данной работе подобные исследования проведены на основе двух-релаксационной модели Миронова [23], которая как было установлено в данной работе имеет наибольшую точность при расчете измеренных спектров КДП четырех образцов агропочв типичных для Красноярского и Краснодарского края по сравнению с диэлектрическими моделями Добсон [12], Шмагге [14], Миронов (одно- [17] и трёх- [26] релаксационная).

1. Двух-релаксационная рефракционная диэлектрическая модель почв

Двух-релаксационная диэлектрическая модель Миронова [23] была создана на основе шести образцов талых незасоленных почв (см. таб. 1, №1 - №6), отобранных из минерального горизонта, КДП которых была измерена коаксиально-волноводным методом в сверхшироком диапазоне частот. Почвы «А», «Е», «G», «H» отобраны Геотехнической лабораторией Экспериментальной станции водных путей, США. Образец «W» был отобран около реки Анстрат, (Германия, Турингия). Образец «Че» был отобран из пахотного слоя в районе г. Краснодара (Краснодарский край). Данными почвенными образцами представлено значительное разнообразие типов почвенного покрова с вариацией глинистой фракции, песка, ила и плотности сухого сложения от 7 % до 76 %, от 0% до 55%, от 22% до 93% (по весу) и от 0.7 до 1.8 г/см³, соответственно. Характеристики почвенных образцов приведены в таб. 1.

Таблица 1. Характеристики почвенных образцов.

№	Назв.	Гранулометрический состав (по весу), %				ρ_d , г/см ³	Тип почвы ¹	f , ГГц
		Глина	Ил	Песок	Орг. вещ.			
1	А	76	22	2	-	~1.4	Г	0.045-25
2	Е	7	93	0	-		Глсг	
3	G	13	32	55	-		Глс	
4	H	34	64	2	-		Глг	
5	W	30	50	20	0.6	0.7-1.8	Глг	0.1-10
6	Че	52			~2	1.1-1.6	Гтсг	0.2-14.8
7	Mo14	49	49	2	-	1.1-1.4	Гтсг	0.045-15
8	Mo18	41	57	2	2.3	1.1-1.6	Глг	0.045-15
9	Ро	39	35	26	6.9	1.2-1.5	Глг	0.045-15
10	Ле	40	41	19	4.2	1.2-1.6	Глг	0.045-15

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

Двух-релаксационная диэлектрическая модель Миронова [23] представляет собой рефракционную модель смеси сухой почвы $p=d$, связанной воды $p=b$, свободной воды $p=u$, и воздуха:

$$n_s = n_d + (n_b - 1) \cdot [W + (W_t - W) \eta(W - W_t)] + (n_u - 1)(W - W_t) \eta(W - W_t), \quad (1)$$

где W – объемная влажность почвы, W_t – максимальное содержание связанной воды, $n_p = \sqrt{\varepsilon_p} = n'_p + i n''_p$ – комплексный рефракционный индекс, $\eta(x)$ – функция Хёвисайда, $\eta(x)=0$ везде, исключая $\eta(x>0)=1$. КДП почвенной воды представлено в виде двух релаксационных процессов Дебая:

$$\varepsilon_p = \varepsilon'_p + i \varepsilon''_p = \varepsilon_{\infty p H} + \frac{\varepsilon_{0pL} - \varepsilon_{0pH}}{1 - i 2\pi f \tau_{pL}} + \frac{\varepsilon_{0pH} - \varepsilon_{\infty p H}}{1 - i 2\pi f \tau_{pH}} + i \frac{\sigma_p}{2\pi \varepsilon_r f}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\infty p}$ – высокочастотный предел, символы H и L относятся к высокочастотной, и низкочастотной релаксациям, ε_{0pL} , ε_{0pH} – статические диэлектрические проницаемости и τ_{pL} , τ_{pH} – времена релаксации.

Вместе с тем, погрешность, допускаемая моделью [23] при описании комплексной диэлектрической проницаемости почв, не участвовавших в её создании, остается неопределенной. Оценим погрешность, которую допускает модель [23] при моделировании КДП типичных агропочв «Мо14», «Мо18» и «Ле», «Ро» (см. таб. 1), образцы которых были отобраны из пахотного слоя (горизонт $A_{\text{пах}}$) в районе г. Краснодара (Краснодарский край) и пос. Менино (Красноярский край), соответственно. В качестве дополнительного сравнения проводились расчеты КДП этих агропочв с использованием диэлектрических моделей Добсона [12, 13], Шмагге [14] и Миронова (одно- [17] и трёх- [26] релаксационной). В качестве примера на рис. 1 приведены измеренные спектры КДП почвенного образца «Ро» с объемной влажностью 21.7% при сопоставлении с пятью диэлектрическими моделями.

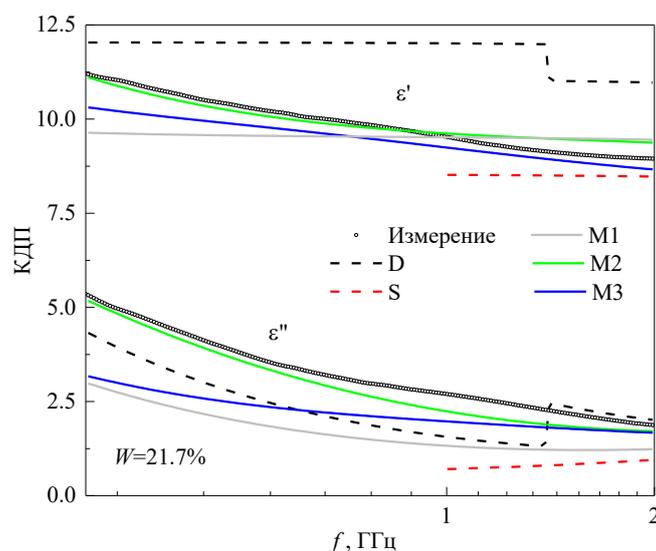


Рис. 1. Спектры КДП почвенного образца «Ро». Точки-измеренные значения. Рассчитанные спектры КДП на основе моделей: D) Добсона, S) Шмагге, M) Миронова (M1) одно-, (M2) двух- и (M3) трёх-релаксационной

На спектре КДП, рассчитанном на основе модели Добсона, в районе 1.3 ГГц имеется резкий скачек, который обусловлен погрешностью нахождения параметров модели Добсона для различных диапазонов частот более и менее 1.3 ГГц (см. работы [12] и [13]). Хотя модель Шмагге построена для фиксированных частот 1.4 ГГц и 5 ГГц, при расчете КДП почв в диапазоне частот от 1 ГГц до 2 ГГц использовалась модель Дебая для свободной воды [27]. Аналогично зависимостям представленным на рис. 1, на основе 5-ти диэлектрических моделей были рассчитаны спектры КДП с использованием измеренных значений содержания глинистой фракции, плотности сухого сложения и объемной влажности почв для образцов «Mo14», «Mo18», «Je» и «Po» (см. таб. 1). Соответствующие рассчитанные и измеренные спектры КДП были сопоставлены и проведен корреляционный анализ. Коэффициент детерминации (R^2), среднеквадратическое отклонение (СКО) между измеренными и рассчитанными значениями КДП приведены на рис. 2 для 4-х исследуемых типов почв.

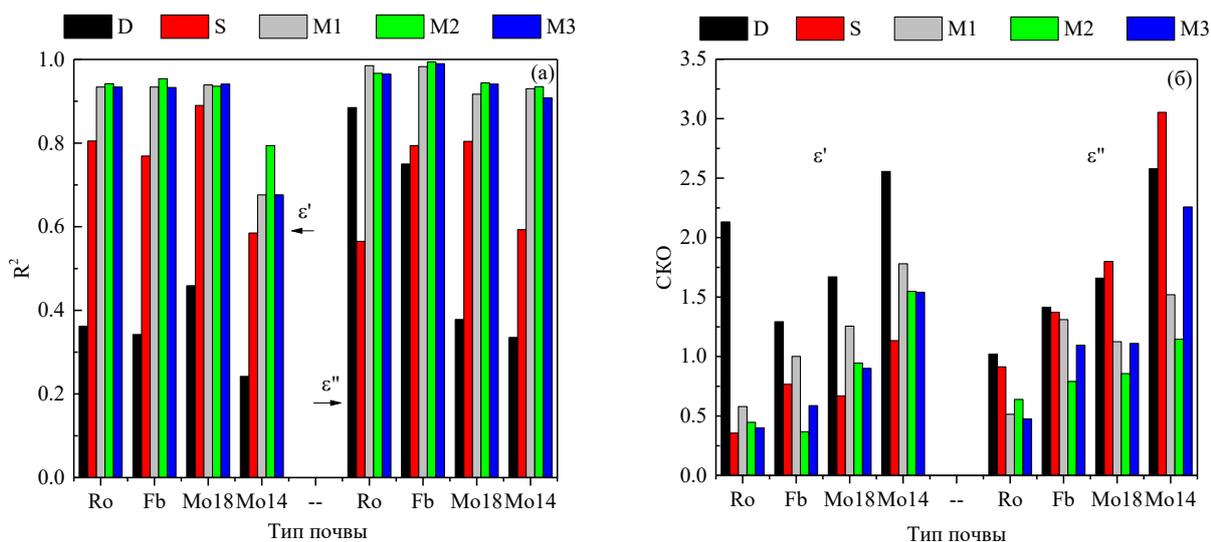


Рис. 2. Коэффициент корреляции и СКО между измеренными и рассчитанными значениями действительной и мнимой частями КДП почв «Мо14», «Мо18» и «Ле», «Ро», рассчитанные в среднем для диапазона частот от 300МГц до 2ГГц и всего диапазона влажностей почв при различных значениях их плотности сухого сложения и содержания органического вещества. Диэлектрические модели: D) Добсона, S) Шмагге, M) Миронова (M1) одно-, (M2) двух- и (M3) трёх-релаксационная

Модели Миронова (M1-одно, M2-двух, M3-трёх релаксационные) прогнозируют действительную и мнимую часть КДП почвенных образцов с наибольшим R^2 . Наихудшее СКО при прогнозировании действительной части КДП имеет модель Добсона (см. рис. 2б, черные столбики). Модель Шмагге в частотном диапазоне частот от 1-2 ГГц имеет наилучшую точность при прогнозировании действительной части КДП (красные столбики). Мнимая часть КДП прогнозируется всеми моделями примерно с одинаковым СКО при средней тенденции меньшей погрешности для модели M2. В целом данные представленные на рис. 2 позволяют заключить, что модель M2 в среднем с большим коэффициентом детерминации R^2 и меньшим СКО равными для действительной $R_{\epsilon'}^2=0.907$ ($SKO_{\epsilon'}=0.83$) и мнимой $R_{\epsilon''}^2=0.960$ ($SKO_{\epsilon''}=0.89$) частей КДП, соответственно, прогнозирует спектры КДП образцов агропочв «Мо14», «Мо18», «Ле», «Ро» (см. таб. 1). Двух-релаксационная диэлектрическая модель Миронова далее будет использоваться для исследования влияния вариаций глинистой фракции, плотности сухого сложения, влажности, степени

шероховатости поверхности агропочв на коэффициент отражения и эффективную глубину зондирования пахотного слоя.

2. Зависимость коэффициент отражения от частоты электромагнитной волны и влажности почв

Коэффициент отражения будем рассчитывать исходя из моностатической конфигурации зондирования в надир в диапазоне частот от 100 МГц до 2.4 ГГц. Почвенный покров рассмотрен в отсутствии растительности. Для расчета коэффициента отражения от гладкой поверхности почвы будет использоваться формула Френеля, в случае шероховатой границы будет рассчитываться полная компонента коэффициента отражения (диффузная + когерентная) на основе численно-аналитической модели [28, 29]. При этом высоты неровностей поверхности почвы будут задаваться распределенными по нормальному закону, а автокорреляционная функция между отдельными высотами неровностей поверхности почвы будет задана в виде экспоненты. Случай отражения волны от гладкой поверхности почвы рассмотрен в данном разделе. Анализ коэффициента отражения от шероховатой границы почвенного покрова дан в следующем пункте.

Спектр коэффициента отражения имеет выраженную частотную дисперсию в МГц диапазоне частот (см. рис. 3а). Причина этих явлений релаксационные процессы Максвелла-Вагнера, обусловленные поляризацией межфазных границ: вода-минерал, вода-воздух, которые могут иметь разные масштабы как по интенсивности, так и по частоте релаксаций [7]. С ростом частоты (более 855 МГц) частотная дисперсия коэффициента отражения становится менее, чем 1 дБ/ГГц (см. рис. 3а) в широком диапазоне вариаций объемной влажности от 4% до 30%, плотности сухого сложения от 0.8 до 1.4 г/см³, содержания глинистой фракции от 0.15 до 0.55 г/г почвы (см. также рис. 4а ниже). В СВЧ диапазоне частот (более 1 ГГц), при увеличении влажности с 4% до 30%, вариации плотности сухого сложения почвы от 0.8 до 1.4 г/см³ оказывают все меньшее влияние на вариации коэффициента отражения, которые

уменьшаются с 2.2 дБ до 0.3 дБ (см. рис. 3а). В МГц диапазоне частот (менее 300 МГц) влияние $\rho_{\text{сух.}}$ и $m_{\text{гл.}}$ на вариации коэффициента отражения сопоставимы при низких (порядка 4%) влажностях почвы (см. рис. 3а). Однако при увеличении влажности до 30% вариации глинистой фракции с 0.15 до 0.55 г/г не оказывают существенного влияния на изменения коэффициента отражения (менее 0.5 дБ) в МГц диапазоне частот (см. рис. 3а). В СВЧ диапазоне (выше 1 ГГц) при низкой влажности почвы (4%) вариация коэффициента отражения (2.9 дБ) за счет изменения плотности сухого сложения от 0.8 до 1.4 г/см³, более чем в два раза превышает вариации коэффициента отражения (1.1 дБ) за счет изменения содержания глинистой фракции от 0.15 до 0.55 г/г (см. рис. 3а и 3б). При увеличении влажности до 30% вариациями коэффициента отражения (<0.3 дБ) за счет изменения плотности сухого сложения почвы можно пренебречь, на фоне вариаций коэффициента отражения (~1 дБ) за счет изменения содержания глинистой фракции (см. рис. 3а и 3б). При увеличении содержания глинистой фракции от 0.15 до 0.55 г/г и вариациях плотности почвы от 0.8 до 1.4 г/см³, абсолютные изменения коэффициента отражения для сухой почвы (4%) в два раза больше (1.1-1.4 дБ), чем (0.6 дБ) для влажной почвы (30%) (см. рис. 3в и рис. 3г). При фиксированном содержании глинистой фракции, которая может варьироваться в широком диапазоне от 0.15 до 0.55 г/г, абсолютные изменения коэффициента отражения при увеличении плотности сухого сложения от 0.8 до 1.4 г/см³ для сухой почвы (4%) в 8 раз больше (2.5 дБ), чем (0.4 дБ) для влажной почвы (30%) (рис. 3г).

Влажностные зависимости коэффициента отражения в диапазоне частот от 433 МГц до 1.26 ГГц подобны и практически накладываются друг на друга при рассмотренных вариациях плотности сухого сложения и содержания глинистой фракции. (В связи с этим на рис. 3б приведены зависимости, рассчитанные на частоте 1.26 ГГц). При увеличении влажности почвы с 4% до 40%, коэффициент отражения увеличивается примерно на 9 дБ с -13 дБ до -4 дБ (см. рис. 3б). Точки изломов на этой зависимости в области объемных влажностей $W_t=7.4\%$, $W_t=14.2\%$, $W_t=21.0\%$, соответствуют точкам излома кусочно-линейной функции

диэлектрической модели (1) в области максимального содержания связанной воды $W=W_t$.

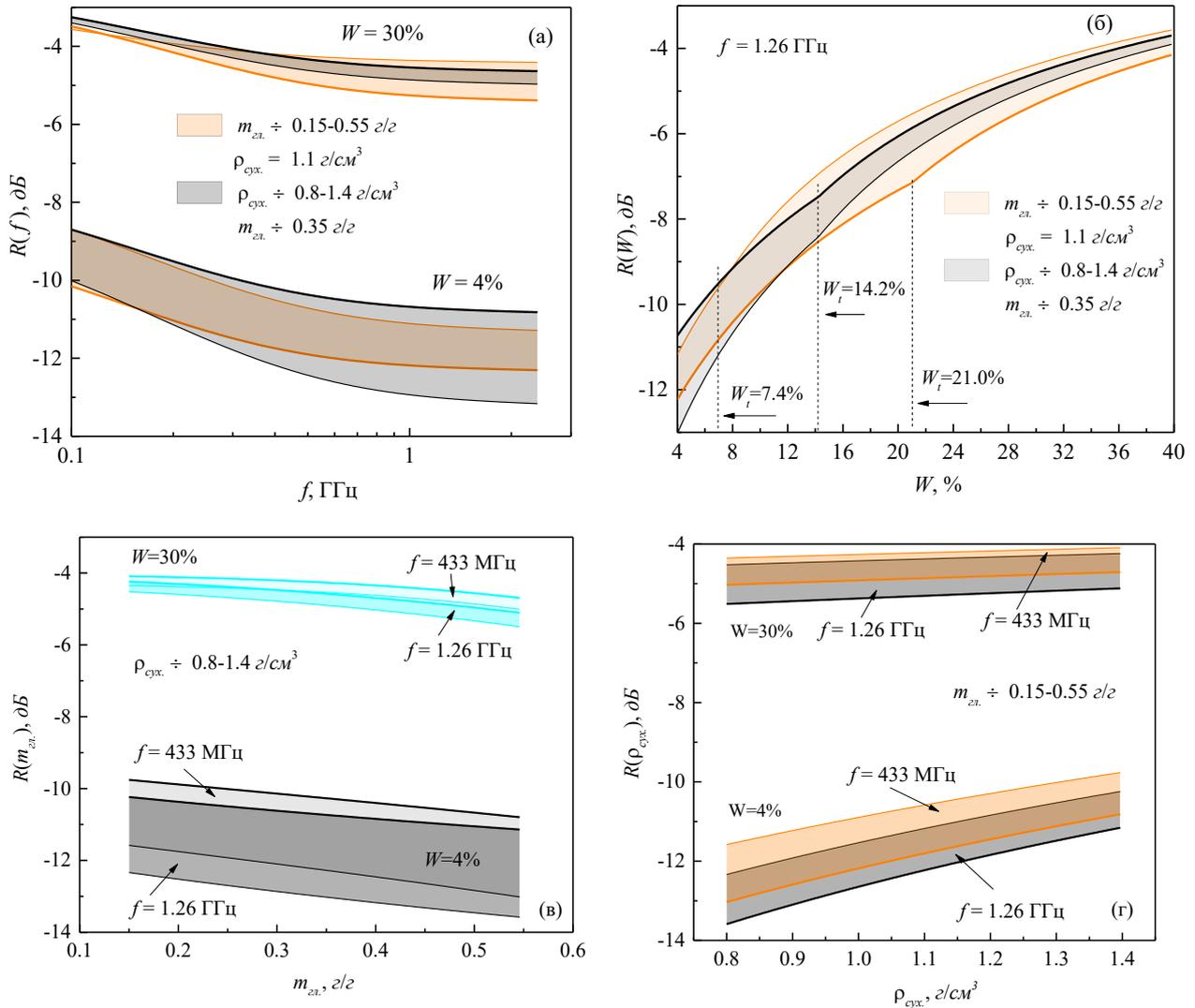


Рис. 3. Коэффициент отражения волны от гладкой поверхности почвы в зависимости от частоты, f , (а), объемной влажности, W , (б), содержания глинистой фракции, $m_{gl.}$, (в), и плотности сухого сложения, $\rho_{сух.}$, (г) почвы. Цветными полосами выделен диапазон вариаций коэффициента отражения, рассчитанный для соответствующих диапазонов вариаций $m_{gl.}$ (при фиксированной $\rho_{сух.}$) и $\rho_{сух.}$ (при фиксированной $m_{gl.}$)

Существуют значительные диапазоны вариаций частоты (см. рис. 3а), плотности сухого сложения почвы и содержания глинистой фракции (рис. 3б, 3в, 3г) в пределах которых, коэффициент отражения принимает одинаковое значение. В результате постановка задачи об одновременном определении $\rho_{сух.}$ и $m_{gl.}$ для влажных почв на основе многочастотных измерений

коэффициента отражения является неоднозначной (некорректной). По крайней мере одна из величин $\rho_{\text{сух}}$ или $m_{\text{гл}}$ должна быть задана с абсолютной точностью. При этом в области высоких значений влажности предпочтительно точно задавать содержание глинистой фракции (т.к. большие вариации плотности не приводят к значительным вариациям коэффициента отражения см. рис. 3в). В случае сухих почв предпочтительно точно знать плотность сухого сложения (т.к. вариации содержание глинистой фракции приводят к меньшим вариациям коэффициента отражения см. рис. 3в и 3г). С ростом содержания глинистой фракции (плотности сухого сложения) коэффициент отражения уменьшается (увеличивается) (см. рис. 3в и 3г).

Скорости нарастания коэффициента отражения с изменением частоты в МГц диапазоне частот при вариациях влажности от 4 до 30%, плотности сухого сложения от 0.8 до 1.4г/см³, содержания глинистой фракции от 0.15 до 0.55 г/г близки между собой (см. рис. 4а). Чувствительность коэффициента отражения при уменьшении частоты растет от долей дБ/ГГц в ГГц диапазоне до порядка - 11 дБ/ГГц в МГц диапазоне частот (см. рис. 4а). Скорость нарастания коэффициента отражения с ростом влажности почвы от 4% до 40% уменьшается примерно в 10 раз с 0.55-0.7 дБ/%, до 0.07-0.09дБ/% во всем исследуемом диапазоне частот от 433 МГц до 1.26 ГГц и слабо зависит от вариации плотности сухого сложения и содержания глинистой фракции (см. рис. 4б). (Имеются скачки скорости нарастания коэффициента отражения при влажностях равных максимальному содержанию связанной воды $W=W_i$). Из данных представленных на рис. 4б также следует, что в случае измерения коэффициента отражения с погрешностью 0.5дБ, минимальная погрешность восстановления влажности сухой (скорость нарастания 0.5дБ/% при влажности 6%) и влажной (скорость нарастания 0.1 дБ/% при влажности ~32%) почвы должна составлять около 1% и 5%, соответственно. Для сухих почв (4%) наблюдается наибольшая чувствительность коэффициента отражения к вариациям содержания глинистой фракции (см. рис. 4в) и плотности сухого сложения (см. рис. 4г).

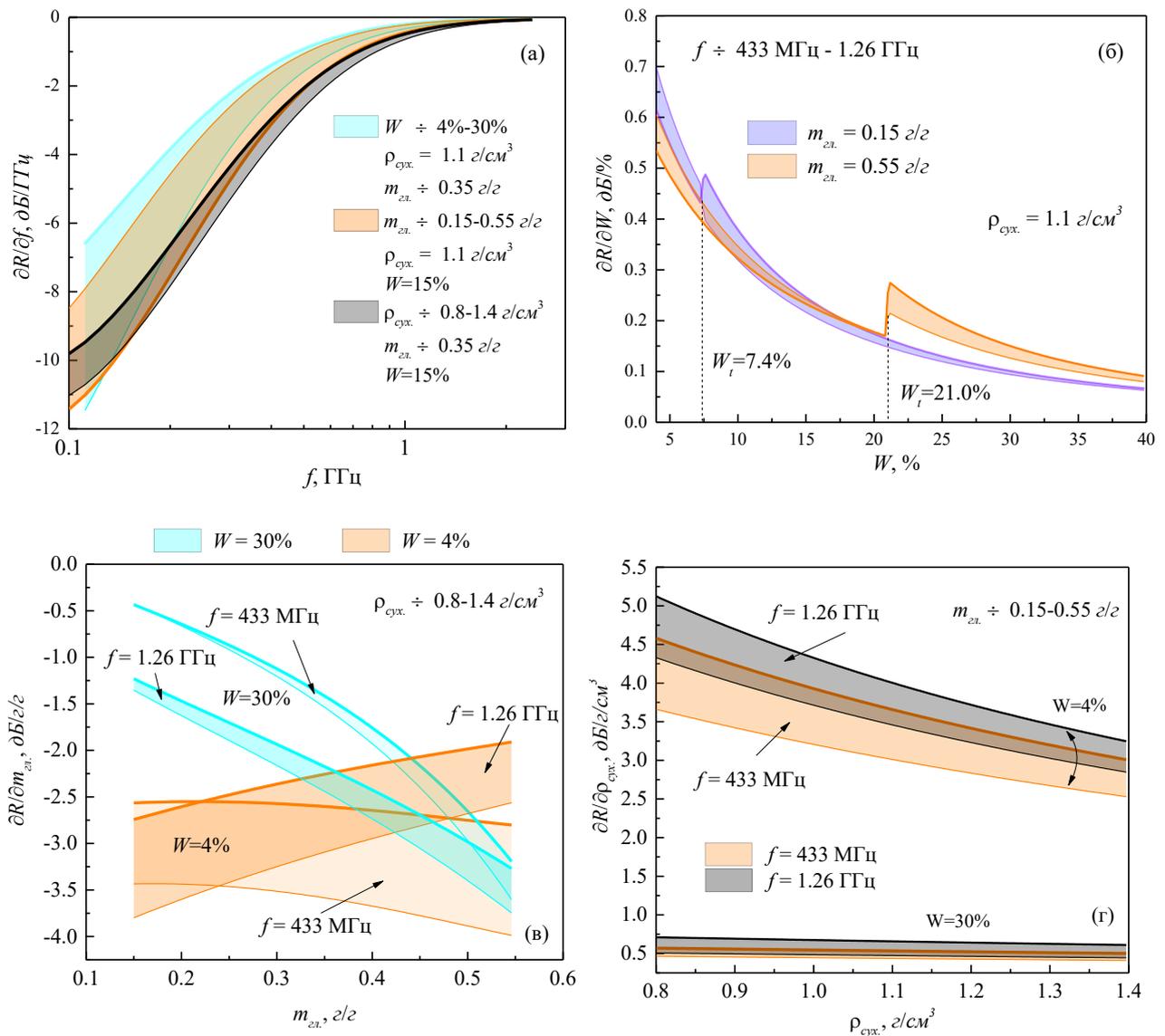


Рис. 4. Частные производные коэффициента отражения от частоты, f , (а), объемной влажности, W , (б), содержания глинистой фракции, $m_{\text{гл.}}$, (в), и плотности сухого сложения, $\rho_{\text{сух.}}$, (г) почвы. Цветными полосами выделен диапазон вариаций коэффициента отражения, рассчитанный для диапазонов вариаций соответствующих параметров (см. подписи на рисунках)

При высоких значениях влажности почвы (30%) коэффициент отражения обладает слабой чувствительностью к вариациям плотности сухого сложения почвы, менее 0.7 дБ/г/г/см^3 . При этом с ростом содержания глинистой фракции чувствительность коэффициента отражения увеличивается с $\sim -1 \text{ дБ/г/г}$ до $\sim -4 \text{ дБ/г/г}$.

3. Зависимость коэффициента отражения от степени шероховатости поверхности почвы

Степень влияния вариации СКО высот неровностей поверхности почвы $\sigma_{ш}$ от 0 до 4 см и объёмной влажности почвы от 4% до 30% на изменения коэффициента отражения практически идентична (см. рис. 5).

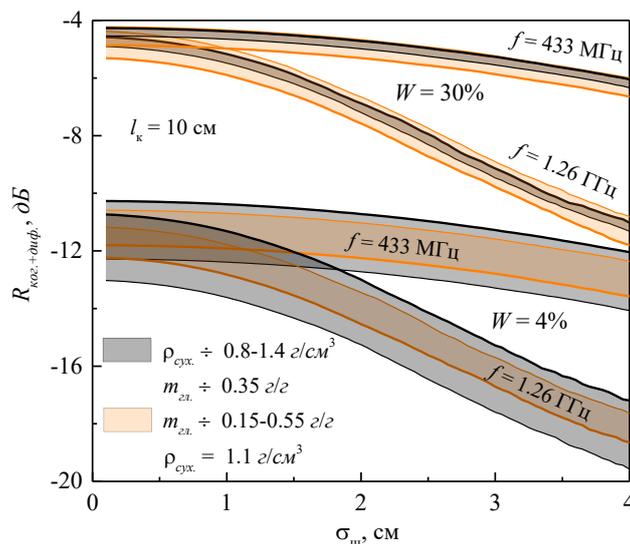


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от СКО высот неровностей поверхности почвы. Длина корреляции задана равной $l_k=10$ см

В результате невозможно осуществить дистанционные рефлектометрические измерения влажности почвы, без оценки степени шероховатости ее поверхности. Расчеты (см. рис. 5) показывают, что алгоритмы восстановления $\sigma_{ш}$ на основе измерения коэффициентов отражения будут наиболее эффективны: а) в случае высокой влажности почв, чем для сухих почв; б) при использовании широкого спектра частот, включая ГГц область, нежели при использовании волн только МГц диапазона частот.

При СКО высот неровностей поверхности почвы менее $\sigma_{ш}=0.9$ см и $\sigma_{ш}=2.2$ см, соответственно на частотах 1.26 ГГц и 433 МГц, вариациями коэффициента отражения в пределах (0.5 дБ) можно пренебречь (см. рис. 5). Пределы вариаций коэффициента отражения при изменении содержания глинистой фракции и плотности сухого сложения аналогичны, тем что были описаны в пункте 2. В зависимости от частоты волны существует область

значений от 0 до $\sigma_{ш}$, в пределах которой вариации коэффициента отражения за счет изменения плотности сухого сложения и содержания глинистой фракции в почве сопоставимы с вариациями коэффициента отражения за счет изменения $\sigma_{ш}$. В этой связи одночастотных измерений коэффициента отражения недостаточно для однозначного определения $\sigma_{ш}$ в следствии значительных вариаций коэффициента отражения в зависимости от $\rho_{сух.}$ и $m_{гл}$ (см. рис. 5).

4. Влияние неточности априорной информации о значениях плотности сухого сложения, содержание глинистой фракции и степени шероховатости поверхности почвы на погрешность восстановления влажности почв

Алгоритмы восстановления влажности почв, основанные на физических моделях (радарного рассеяния, излучения), требуют априорной информации о точных значениях плотности сухого сложения, содержания глинистой фракции, степени шероховатости поверхности почвы [1, 6]. Оценим минимальную погрешность, которую можно допустить в неточности задания этих параметров, при восстановлении объемной влажности почвы с погрешностью не более $\pm 2\%$. Постановка рефлектометрической задачи аналогична той, что описана в пункте 2. Влажность почвы находилась в ходе решения задача минимизации нормы невязки:

$$W_{оц.} = \min \sum_{n=1}^{n=N_f} \left| \frac{R(f_n, \varepsilon_s, \sigma_{ш}) - R^{оц.}}{R(f_n, \varepsilon_s, \sigma_{ш})} \right| \quad (3)$$

между информативными признаками истинного значения $R(f_n, \varepsilon_s, \sigma_{ш})$ и оцениваемого значения $R^{оц.} = R(f_n, \varepsilon_s(W_{оц.}, m_{гл.} \pm \Delta m_{гл.}, \rho_d \pm \Delta \rho_d), \sigma_{ш} \pm \Delta \sigma_{ш})$ коэффициента отражения. Здесь $f_n \in [433 \text{ МГц}, 1.26 \text{ ГГц}]$, $N_f=100$, $\varepsilon_s = \varepsilon_s(W, m_{гл.}, \rho_d)$ – КДП почвенного образца, при соответствующей истинной объемной влажности, W , и истинной плотности сухого сложения, ρ_d , длина корреляции t неровностей поверхности почвы задавалась равной $l_k = 10 \text{ см}$. Задача минимизации (3) решалась прямым методом путем подбора $W_{оц.}$ из области значений $W_{оц.} \in [0\%, 50\%]$ с шагом 0.1% в случае вариаций

последовательно каждой из величин $m_{гг.}$, ρ_d , $\sigma_{ш}$ в пределах $\pm\Delta m_{гг.}$, $\pm\Delta\rho_d$, $\pm\Delta\sigma_{ш}$ (см. рис. 6).

Для сухой (6%) и влажной (30%) почвы при сохранении погрешности восстановления влажности почвы $\pm 2\%$, неопределенность в задании $m_{гг.}=0.35\pm 0.05$ г/г может допускать неопределенность в задании плотности сухого сложения от 0.7 до 1.48 г/см³ и от 0.55 до 1.8 г/см³, соответственно для сухой и влажной почвы (см. рис. 6а). Неопределенность в задании $\rho_{сух.}=1.1\pm 0.1$ г/см³ может допускать неопределенность в задании содержания глинистой фракции от 0.19 до 0.47 г/г и от 0.1 до 0.54 г/г, соответственно для влажной и сухой почвы (см. рис. 6б). Из данных представленных на рис. 6в видно существенное влияние СКО высот неровностей поверхности почвы на погрешность восстановления влажности в зависимости от частоты. При сохранении погрешности восстановления влажности почвы $\pm 2\%$ на частотах менее 1.26 ГГц, неопределенность в задании $\sigma_{ш}$ не должна превышать от 10% до 30% от истинного значения ($\sigma_{ш} = 1.0$ см и $\sigma_{ш} = 2.9$ см) при зондировании влажности почвы в диапазоне от 30% до 6%, соответственно. При уменьшении частоты зондирования до 433 МГц, неопределенность в задании $\sigma_{ш}$ может быть увеличена в несколько раз (по сравнению с частотой зондирования 1.26 ГГц) для почв влажностью не более 30% (см. рис. 6в).

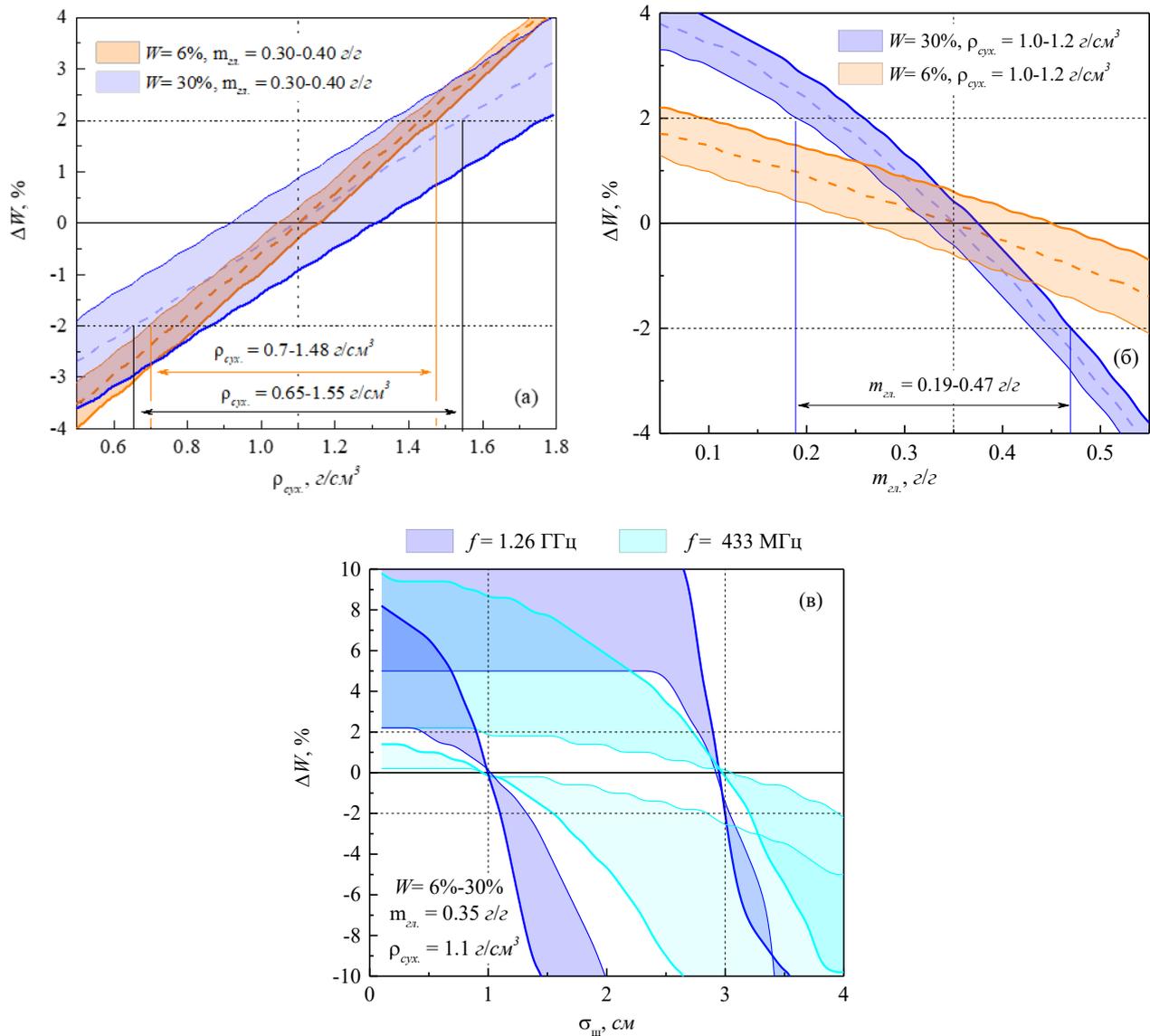


Рис. 6. Погрешность восстановления влажности почвы, ΔW , в зависимости от вариаций плотности сухого сложения, $\rho_{\text{сух.}}$, (а), содержания глинистой фракции, $m_{\text{гли}}$, (б) и СКО высот неровностей поверхности почвы, $\sigma_{\text{ш}}$, (в) относительно заданных (точных) значений

5. Влияние вертикальных профилей влажности почвы на вариации коэффициента отражения. Эффективная глубина зондирования

Спектр коэффициента отражения существенно определяется распределением влажности в поверхностном слое почвы некоторой толщины $l_{\text{эф}}$. В случае высоких значений объемной влажности ($W=30\%$) на поверхности почвы, спектр коэффициента отражения не зависит от глубинного распределения

влажности (см. рис. 7 и рис. 8а, профили 1,7) во всем исследуемом диапазоне частот от 433 МГц до 1.26 ГГц.

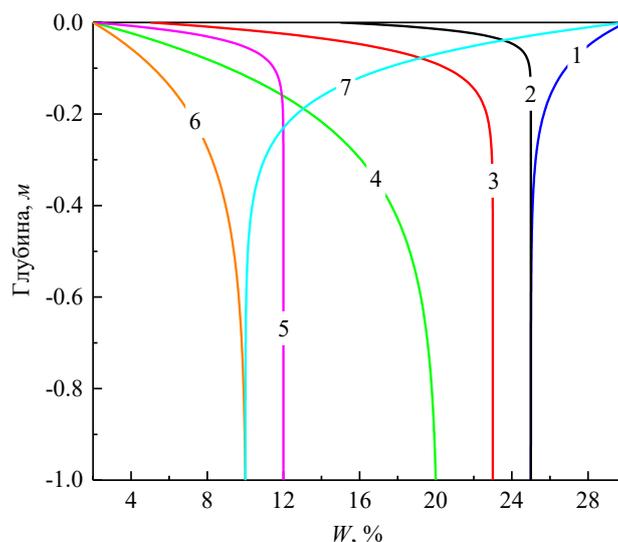


Рис. 7. Модельные вертикальные профили объемной влажности почвы

В случае сухой поверхности почвы ($W=2\%$) спектр коэффициента отражения выше 800 МГц не зависит от глубинного распределения влажности почвы, и только на частотах ниже 433 МГц значения коэффициентов отражения, рассчитанные для профилей 4 и 6, отличаются более, чем на 0.5дБ (см. рис. 7 и рис. 8а). В диапазоне частот выше 800 МГц также наблюдается неоднозначность коэффициента отражения при вариации глинистой фракции от 0.15 до 0.55 г/г и плотности сухого сложения от 0.8 до 1.4 г/см³ (см. рис. 7 и рис. 8а, профили 3-5). Из данных представленных на рис. 8а следует, что восстановление глубинного распределения влажности в более сухих почвах (см. рис. 7 и рис. 8а, профили 4,6) требует большей точности в задании плотности и содержания глины, чем в более влажных почвах (см. рис. 7 и рис. 8а, профили 1,7). Это объясняется тем, что вариации коэффициента отражения в более влажных почвах меньше, чем в более сухих почвах при изменении содержания глинистой фракции и плотности сухого сложения. На частотах выше 1-1.26 ГГц вариации СКО высот неровностей поверхности почвы от $\sigma_{ш}=0.5$ см до $\sigma_{ш}=1.5$ см не позволяют однозначно идентифицировать коэффициенты отражения высыхающей почвы, с влажностью поверхности менее 10% (см. рис. 7 и рис. 8б, профили 3,5,4). При этом, как и ожидается в МГц диапазоне частот влияние степени шероховатости

поверхности почвы существенно меньше, чем в ГГц диапазоне частот (см. рис. 8б).

Эффективная глубина зондирования, $l_{эф.}$, определяется частотой зондирования, типом профиля, но прямо не зависит от того более влажная или более сухая почва имеет место (см. рис. 9). Если обратить внимание на профили 4 и 6 (см. рис. 7), то ожидается, что глубина зондирования для профиля 4 в более влажной почве, должна быть меньше по сравнению с профилем 6 для более сухой почвы, однако результаты моделирования, представленные на рис. 9а, показывают, что это не так. Данный факт можно пояснить в ходе следующего рассуждения. Действительно глубина, на которую распространится волна с одинаковым затуханием будет больше в более сухой почве, чем в более влажной почве. Однако, по мере продвижения волны в глубь почвы, из-за согласующего влияния профилей влажности 4 и 6, парциальный вклад (на локальных глубинах) в общий коэффициент отражения будет уменьшаться до 0.

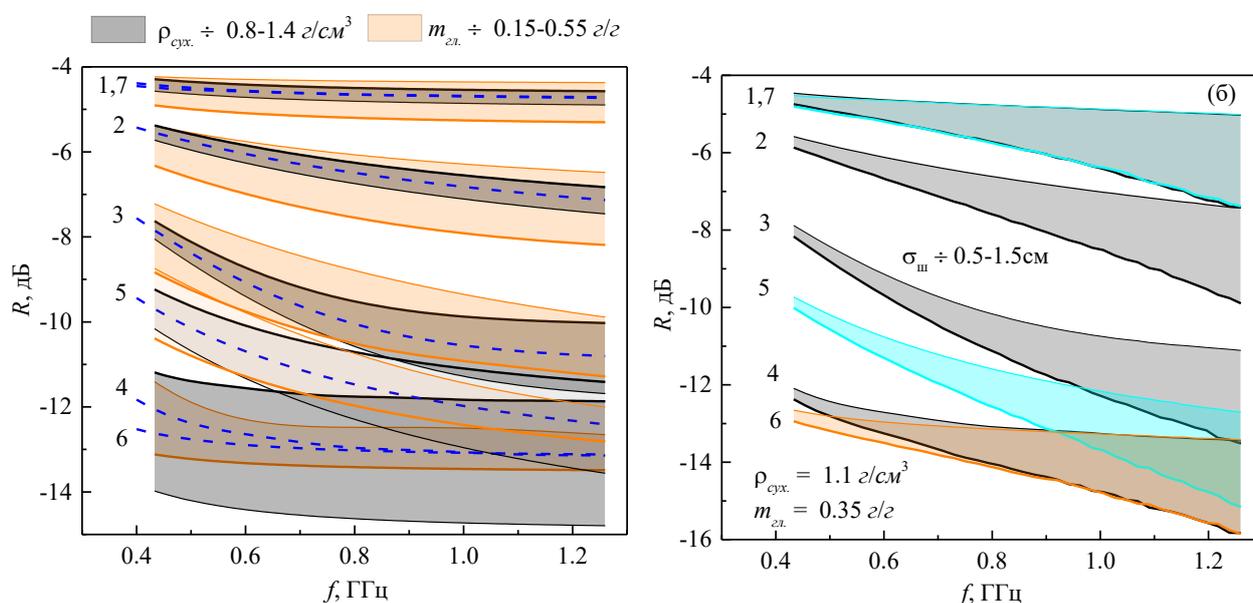


Рис. 8. Спектр коэффициента отражения, рассчитанный для различных профилей влажности (см. рис. 7) в зависимости от вариаций содержания глинистой фракции, плотности сухого сложения и СКО высот неровностей поверхности почвы

При этом максимальный вклад в коэффициент отражения будут вносить такие диапазоны глубин, на которых наблюдается максимальные градиенты диэлектрической проницаемости [30, стр. 172 и формула (15.22)]. Как видно из рис. 7 градиент влажности (а следовательно, и диэлектрической проницаемости) в поверхностном слое почвы больше у профиля 4, чем у профиля 6. В результате толщина эффективно отражающего слоя для профиля 6 меньше, чем у профиля 4. Несмотря на близкие влажности поверхности почвы у профилей 4 и 5, вследствие очевидного большего градиента влажности у профиля 5, чем у профиля 4, эффективная глубина зондирования почвы с профилем 5 больше, чем с профилем 4. Несмотря на близкую толщину эффективно отражающего слоя для профилей 4 и 7 (см. рис. 9а) вариация $l_{эф.}$ для более сухой почвы больше, чем для более влажной почвы при изменении плотности от 0.8 до 1.4 г/см³ (см. рис. 9в), и наоборот при изменении глины от 0.15 до 0.55 г/г (см. рис. 9б). Толщина эффективно отражающего слоя является существенно нелинейной функцией частоты при изменении содержания глинистой фракции (см. рис. 9б).

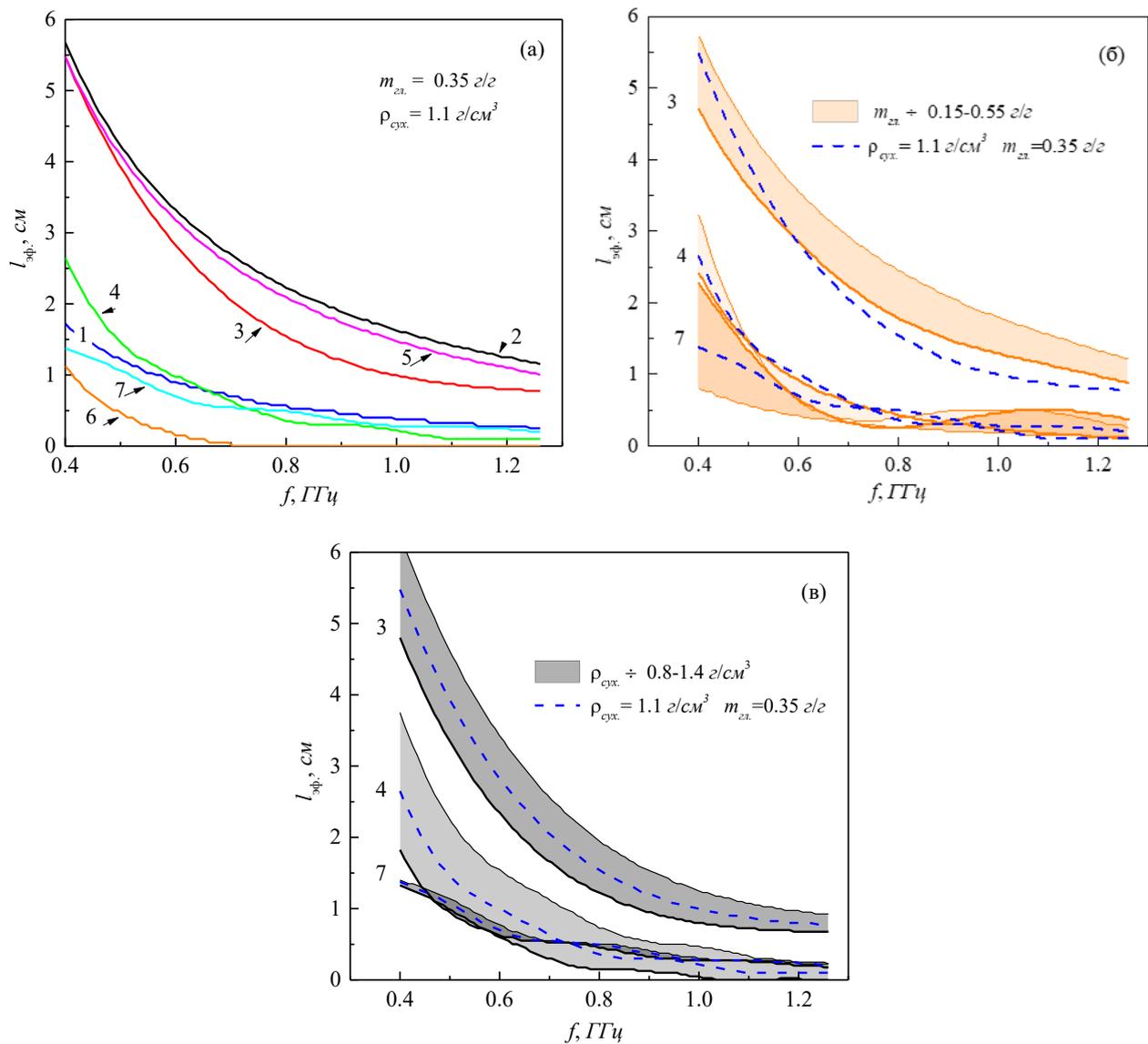


Рис. 9. Эффективная глубина зондирования в зависимости от частоты волны, различных профилей влажности (см. рис. 7), вариаций глинистой фракции и плотности сухого сложения почвы

Заключение

В работе детально исследовано влияние объемной влажности (вертикальных профилей влажности), плотности сухого сложения, содержания глинистой фракции (типа агропочвы), степени шероховатости поверхности почвенного покрова на вариации коэффициента отражения в сверхширокой полосе частот от 100-400 МГц до 1.26-2.4 ГГц. Показано, что коэффициент отражения является неоднозначной функцией содержания глинистой фракции $m_{гл}$ и плотности сухого сложения $\rho_{сух}$ почв. В алгоритмах восстановления влажности почвы по крайней мере одна из величин $m_{гл}$ или $\rho_{сух}$ должна быть

известна точно. Для влажных почв предпочтительно задавать точно величину содержания глинистой фракции, а для сухих почв плотности сухого сложения. При этом из-за слабой чувствительности коэффициента отражения к вариациям влажности (в области высоких значений порядка 30%), погрешность восстановления высоких значений влажности почв может быть в 5 раз выше, чем для сухих почв.

По отношению к содержанию глинистой фракции и плотности сухого сложения почвы, СКО высот неровностей поверхности почвы является доминирующим параметром неопределенность в задании, которого существенно влияет на погрешность восстановления влажности почв. Зондирование влажности почвы с использованием волн в узкополосном МГц диапазоне частот (влияние шероховатости в котором минимальны) затруднительно, вследствие неоднозначной зависимости коэффициента отражения от вариаций $m_{гл}$, $\rho_{сух}$ и $\sigma_{ш}$ в данном диапазоне частот. Неоднозначность значений коэффициента отражения по параметру $\sigma_{ш}$ (при $\sigma_{ш} > 0.9$ см) может быть устранена при измерении коэффициента отражения в сверхширокой полосе частот как минимум от 433 МГц до 1.26 ГГц.

Для рассмотренных разнообразных вертикальных профилей влажности почвы, показано, что эффективная толщина поверхностного слоя агропочвы, формирующего коэффициент отражения, не превышает 2 см при частоте зондирования выше 1 ГГц. Изменения эффективной толщины отражающего слоя не превышают 10-20% при вариации плотности сухого сложения от 0.8 до 1.4 г/см³ и содержания глинистой фракции от 0.15 до 0.55 г/г. При этом вариации коэффициента отражения могут достигать нескольких дБ, приводя к неоднозначной идентификации различных профилей влажности на частотах выше 800 МГц. При объемной влажности поверхности почвы более 28% величина коэффициента отражения во всем исследованном диапазоне частот от 433 МГц до 1.26 ГГц не зависит от вертикального распределения влаги.

Проведенные исследования устанавливают количественные ограничения на точность восстановления влажности почвы при заданной погрешности

исходных параметров модели: содержание глинистой фракции, плотности сухого сложения почвы, степени шероховатости поверхности почвы. Установлены диапазоны вариаций этих параметров, допускающие неоднозначность трактовки значений коэффициентов отражения и дальнейшую некорректную постановку задачи о восстановлении влажности почв, которые должны учитываться при разработке алгоритмов дистанционного зондирования влажности агропочв.

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

Литература

1. Voronovich A.G., Lataitis R.J. Soil Moisture Profile Retrievals Using Reflection of Multifrequency Electromagnetic Signals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. V.60. №2006510. P.1-10.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3204522>
2. Voronovich A.G., Lataitis R.J. Soil Moisture Retrieval Using Reflection Coefficients: Numerical Experiments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021. V.59. №11. P.8957-8967.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3037012>
3. Minet J., Wahyudi A., Bogaert P., et al. Mapping shallow soil moisture profiles at the field scale using full-waveform inversion of ground penetrating radar data. *Geoderma*. 2011. V.161. №3-4. P.225-237.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.023>
4. Музалевский К.В. Дистанционное измерение профилей влажности в пахотном слое почвы на основе поляриметрических наблюдений коэффициента отражения в Р- и С-диапазонах частот. Эксперимент. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т.17. №3. С. 145-148.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-145-148>

5. Muzalevskiy K.V. Retrieving soil moisture profiles based on multifrequency polarimetric radar backscattering observations. Theoretical case study. *International Journal of Remote Sensing*. 2021 V.42. №2. P.506-519. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1809743>
6. Muzalevskiy K.V. A new method for remote sensing of moisture profiles in the arable layer at three frequencies; experimental case study. *International Journal of Remote Sensing*. 2021. V.42. №7. P.2377-2390. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1851795>
7. Bobrov P.P., Belyaeva T.A., Kroshka E.S., Rodionova O.V. The Effect of Dielectric Relaxation Processes on the Complex Dielectric Permittivity of Soils at Frequencies From 10 kHz to 8 GHz - Part I: Experimental. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2022. V.60. №2005409. P.1-9. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3180727>
8. Ulaby F.T., Long D.G. *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. The University of Michigan Press: Ann Arbor, MI, USA. 2013. 1116 p.
9. Bruggeman D. A. G. Berechnung verschiedemer physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. *Ann. Phys.* 1935. V.416. №7. P.636-679.
10. de Loor G.P. Dielectric Properties of Heterogeneous Mixtures Containing Water. *Journal of Microwave Power*. 1968. V.3. №2. P.67-73.
11. Birchak J.R., Gardner C.G., Hipp J.E., Victor J.M. High dielectric constant microwave probes for sensing soil moisture. *Proceedings of the IEEE*. 1974. V.62. №1. P.93-98. <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9388>
12. Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., El-rayes M.A. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1985. V.GE-23. №1. P.35-46. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1985.289498>
13. Peplinski N.R., Ulaby F.T., Dobson M.C. Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1995. V.33. №3. P.803-807. <https://doi.org/10.1109/36.387598>

14. Wang J.R., Schugge T.J. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1980. V.GE-18. №4. P.288-295. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1980.350304>
15. Boyarskii D.A., Tikhonov V.V., Komarova N.Yu. Model of Dielectric Constant of Bound Water in Soil for Applications of Microwave Remote Sensing. *Progress In Electromagnetics Research*. 2002. V.35. P.251-269. <https://doi.org/10.1163/156939302X01227>
16. Park C.-H. et al. New Approach for Calculating the Effective Dielectric Constant of the Moist Soil for Microwaves. *Remote Sensing*. 2017. V.9. №7. P.732. <https://doi.org/10.3390/rs9070732>
17. Mironov V.L., Kosolapova L.G., Fomin S.V. Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2009. V.47. №7. P.2059-2070. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2011631>
18. Wigneron J.-P. et al. Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the L-band SMOS & SMAP soil moisture retrieval algorithms. *Remote Sensing of Environment*. 2017. V.192. P.238-262. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.01.024>
19. Zeng J., Chen K.S., Bi H. and Chen Q. A Preliminary Evaluation of the SMAP Radiometer Soil Moisture Product Over United States and Europe Using Ground-Based Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2016. V.54. №8. P.4929-4940. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2553085>
20. Zhang L., Meng Q., Hu D., Zhang Y., Yao S., Chen X. Comparison of different soil dielectric models for microwave soil moisture retrievals. *International Journal of Remote Sensing*. 2020. V.41. №8. P.3054-3069. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1698077>

21. Guo P., Shi J., Gao B., Wan H. Evaluation of errors induced by soil dielectric models for soil moisture retrieval at L-band. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2016. P.1679-1682. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729429>
22. Liu J, Liu Q. Soil Moisture Estimate Uncertainties from the Effect of Soil Texture on Dielectric Semiempirical Models. *Remote Sensing*. 2020. V.12. №14. P.2343. <https://doi.org/10.3390/rs12142343>
23. 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. *Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications*. 2013. P.1-4. <https://doi.org/10.1109/SIBCON.2013.6693613>
24. Yayong S., et al. Preliminary Applicability Analysis of Soil Dielectric Constant Model of the Different Soil Texture Condition. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2019. P.7148-7151. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8900240>
25. Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.C., et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-part I: empirical models and experimental observations. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*. 1985. V.23. №1. P.25-34. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1985.289497>
26. Миронов В.Л., Фомин С.В., Лукин Ю.И. Трехрелаксационная обобщенная рефракционная диэлектрическая модель влажных почв. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2015. Т.58. №8-2. С.28-31.
27. Stogryn A. Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water (Correspondence). *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1971. V.19. №8. P.733-736. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1971.1127617>
28. Музалевский К.В. Широкополосный рефлектометрический метод измерения влажности и степени шероховатости поверхности почвы. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2022. №12. (в редакции)

29. Muzalevskiy K.V. Numerical-Analytical Model of Reflection Coefficient for Rough Soil Surface in Wide Frequency Range. *Proceedings of 8th All-Russian Microwave Conference (RMC)*. 2022. P.1-4.
30. Бреховских Л.М. *Волны в слоистых средах*. Москва, Изд-во Академии наук СССР. 1957. 503 p.

Для цитирования:

Музалевский К.В., Фомин С.В., Каравайский А.Ю. Зависимость отражательных свойств агропочв в сверхширокой полосе частот от типа, степени шероховатости поверхности и профилей влажности агропочв. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.11.15>