

**ПОДСПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЧВ НА ЧАСТОТАХ ОТ 1 МГц ДО 3 ГГц И СОПОСТАВЛЕНИЕ С
ДАНЫМИ SMAP¹**

Бобров П.П.⁽¹⁾, Беляева Т.А.⁽¹⁾, Костычов Ю.А.^(1,2), Крошка Е.С.⁽¹⁾,
Родионова О.В.⁽¹⁾, Яценко А.С.⁽²⁾

⁽¹⁾ Омский государственный педагогический университет, Омск, Россия

⁽²⁾ Институт радиопрофики и физической электроники Омского научного центра СО РАН, Омск, Россия

Аннотация. Описана методика и техника измерений в полевых условиях комплексной диэлектрической проницаемости почв, проводимых с целью оценки параметров диэлектрических моделей, применяемых в алгоритмах восстановления влажности почв методами спутниковой микроволновой радиометрии. Экспериментальные установки состояли из ячеек на основе симметричной полосковой линии и компактных векторных анализаторов цепей: LibreVNA, sv4401a и nanoVNA-V2 Plus4, позволяющих измерять комплексные коэффициенты передачи и отражения в диапазоне частот от 50 кГц до 4 ГГц (LibreVNA до 6 ГГц). Конструкция ячеек была спроектирована таким образом, чтобы повысить частоты возбуждения высших типов волн (начиная с Н¹) выше 3–5 ГГц при расстоянии между внешними проводниками 28,5 мм. Измерения проводились на пяти полях в разных районах Омской области в летний и осенний периоды. Диэлектрическая проницаемость почв определялась в слое 0-5 см с последующим определением влажности и сухой плотности образца почвы. Параллельно определялась влажность почвы в слоях 0-2 см и 2-4 см. Для оценки содержания физической глины (частиц размером менее 0,01 мм) в почвах использовались значения комплексной диэлектрической проницаемости на частоте 1 МГц и найденные путем диэлектрических измерений значения максимального количества связанной воды в почвах. Проведено сравнение полученных результатов с результатами определения содержания глины седиментационным методом. Производилось сравнение значений влажности, определённых при контактном отборе проб и восстановленных по данным дистанционных микроволновых радиометрических измерений на частоте 1,4 ГГц.

ВВЕДЕНИЕ

При дистанционном исследовании почв микроволновыми методами необходима информация о диэлектрических свойствах почв. Эти свойства отличаются у разных типов почв, что определяется в первую очередь различным содержанием связанной воды и ее диэлектрическими свойствами, различными в разных типах почв. В настоящее время за рубежом для вычисления комплексной диэлектрической проницаемости влажных почв в СВЧ-диапазоне широко применяется полуэмпирическая модель Добсона [Dobson, et al., 1985], в которой в качестве физических параметров почвы используется весовое содержание глины, песка и пыли. Эмпирические коэффициенты этой модели подобраны на основе диэлектрических измерений для 5-ти сельскохозяйственных почв. При этом влияние связанной воды учитывалось опосредованно через изменение показателя степени во влажностной зависимости диэлектрической проницаемости, который подбирался в зависимости от содержания глины, песка и пыли. В последние годы в алгоритме SMOS используется диэлектрическая модель Миронова [Mironov, et al., 2009], в которой диэлектрическая проницаемость связанной воды и ее количество являются входными параметрами. Все параметры определяются через содержание глины (по классификации USDA это частицы размером менее 0,002 мм), информация о которой приведена в данных SMAP Soil Moisture Level 3 (URL <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog?keyword=SMAP%20Soil%20Moisture>).

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 Trans. on Geosci and Remote Sens. 1985. V. GE-23. № 1. P. 35–45.

Mironov V. L., L. G. Kosolapova, and S. V. Fomin, "Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. vol. 47, no. 7, pp. 2059–2070.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-10037, <https://rscf.ru/project/23-27-10037/>.

Цель работы: разработка способа оценки содержания глины в почвах путем измерения диэлектрической проницаемости почвы в полевых условиях.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЯЧЕЙКА

Основным требованием к экспериментальной установке была невысокая цена комплектующих изделий и простота изготовления, поэтому в качестве основы для измерительной ячейки была выбрана симметричная полосковая линия (СПЛ). Измеряемый диапазон частот с помощью ячеек на базе СПЛ ограничивается сверху возникновением волн высших типов. Первой волной высшего типа является волна $H^{(1)}$. Критическая длина волны для этого типа (при воздушном заполнении) может быть определена из приближенного выражения [Справочник, 1982]:

$$\lambda_{cr} = 2w(1 + \pi b/4w), \quad (1)$$

где w – ширина центральной полоски, b – расстояние между внешними электродами. При заполнении СПЛ диэлектриком критическая длина волны возрастает пропорционально корню квадратному из действительной части комплексной диэлектрической проницаемости (КДП). Таким образом, повышение рабочей частоты требует уменьшения размеров поперечного сечения СПЛ и, в частности, ширины центральной полоски. Увеличить верхнюю рабочую частоту измерительной ячейки на базе СПЛ позволяет уменьшение ширины центральной полоски в рабочей области, заполняемой почвой, без уменьшения расстояния между внешними проводниками. При этом ширина центральной полоски, необходимая для согласования с 50-омным входом ячейки, меньше, чем при однородном воздушном заполнении и остается неизменной в рабочей области. Возрастание волнового сопротивления в рабочей области в $\sqrt{\epsilon'_1}$ раз учитывается при расчете КДП исследуемого вещества. Это обеспечивает возрастание критической частоты в области измерений в $\sqrt{\epsilon'_1}$ раз. Конструкция ячейки, ее блок-схема и картина волновых поверхностей показаны на рис. 1 и 2. Измерение калибровочных жидкостей показало, что погрешность измерения действительной части КДП почв в мегагерцовом диапазоне может составлять 1-3%, а в гигагерцовом – 2-9% [Bobrov et al., 2024].

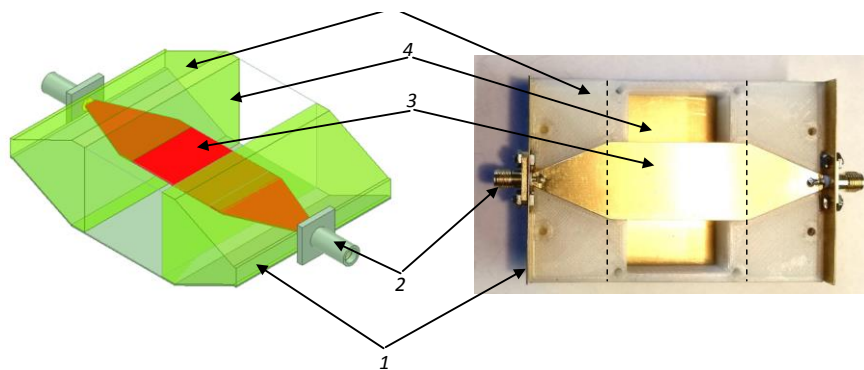


Рис. 1. Вид измерительной ячейки в плоскости центральной полоски. 1 – корпус; 2 – СВЧ разъемы типа SMA; 3 – центральная полоска; 4 – рабочая область; 5 – переходные части

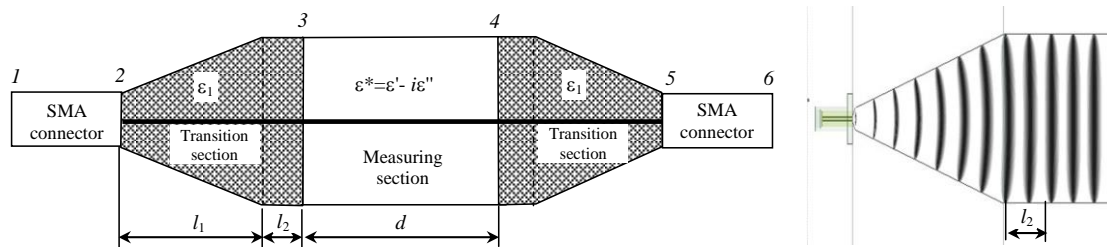


Рис. 2. Блок-схема измерительной ячейки (а) и картина волновых поверхностей при распространении в СПЛ.

Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И. Бахарев и др.; Под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.

Bobrov P. P., Kostychov Yu. A., Krivaltsevich V., Rodionova O. V. Low-cost cell based on symmetric stripline for soil permittivity measurement in the frequency range of 0.1–1 MHz to 5–7 GHz // Russian Physics Journal. 2024. Vol. 67, No. 8, pp. 1213-1222. DOI 10.1007/s11182-024-03243-9

<https://rdcu.be/dTe88>

КОМПАКТНЫЕ ВЕКТОРНЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ ЦЕПЕЙ (VNA)

Для исследований были выбраны компактные VNA, работающие в диапазоне частот от 50 кГц до 3-6 ГГц. Основные характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры компактных VNA

Параметр	LibreVNA	SV4401A	nanoVNA-V2 Plus4	SAA - 2N
Диапазон частот, МГц	0,05–6000	0,05-4400	0,05-4000	0,05-3000
Измеряемые параметры	$S_{11}, S_{12}, S_{22}, S_{21}$	S_{11}, S_{12}	S_{11}, S_{12}	S_{11}, S_{12}
Полоса (IFBW)	10 Гц – 50 кГц	30 Гц – 12,5 кГц	НД	НД
S_{11} от порта 2, дБ	< -25	-20 (до 1,5 ГГц) -15 (до 4,4 ГГц)	-20 (до 1,5 ГГц), -13 (до 4 ГГц)	-20 (до 1,5 ГГц) -13 (до 3 ГГц)
Дисплей	нет	7 inch IPS (1024 x 600)	4 inch TFT (480 x 320)	4 inch TFT (480 x 320)
Внутренняя память	нет	8 Гб	нет	нет

Общим недостатком приборов (кроме LibreVNA) является плохое согласование со стандартной линией порта 2 на верхнем краю частотного диапазона. Это приводит к большим погрешностям при измерении коэффициента передачи (параметра S_{12}). Поэтому при измерениях мы подключаем к порту 2 аттенюатор с затуханием 10 дБ и низким КСВН (<1,1) и производили калибровку с ним (рис. 3) [Бобров и др., 2024]. Оценку точности производили путем измерения стандартов КСВН и ослабления и почв в коаксиальных ячейках путем сравнения с результатами измерений с помощью VNA Rohde & Schwarz ZNB20. В частотном диапазоне 1-10 МГц погрешность измерения действительной части КДП ϵ' почв составляет 2,5-5%. На частотах 0,1-1 ГГц наблюдаются колебания в измеряемых значениях ϵ' . Максимальные отклонения от значений, полученных с помощью ZNB20, могут достигать 15-20%, однако эти отклонения существуют как выше, так и ниже линии ZNB20, что позволяет сглаживать результаты путем применения релаксационно-рефракционной модели [Bobrov et al., 2024].

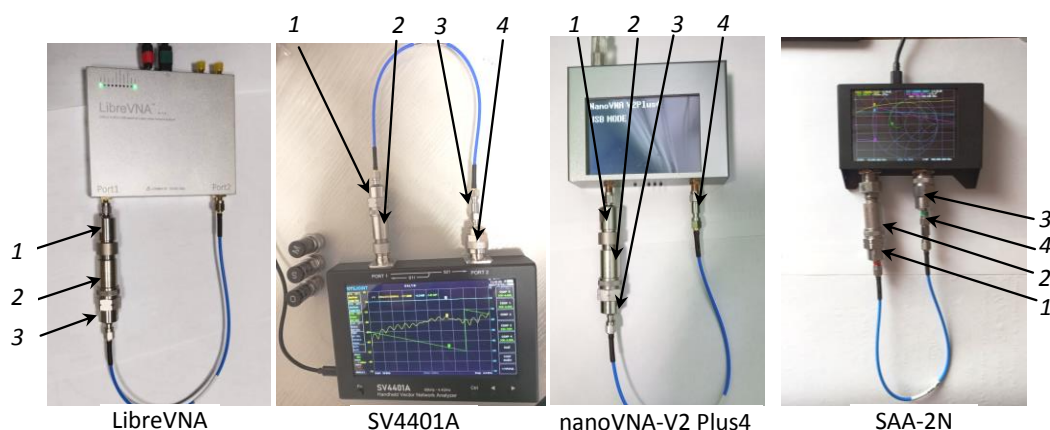


Рис.3. Подключение коаксиальной измерительной ячейки к разным приборам. 1, 3 – переходники N-SMA; 2 – коаксиальная измерительная ячейка; 4 – аттенюатор 10 дБ

Бобров П.П., Костычев Ю.А., Родионова О.В. Использование компактных векторных анализаторов параметров цепей для измерения диэлектрической проницаемости почв // Известия вузов. Физика. 2024. Т. 67. № 6 (799). С. 71-80.

Bobrov P.P., Kroshka E.S., Muzalevskiy K. V. The Effect of Dielectric Relaxation Processes on the Complex Dielectric Permittivity of Soils at Frequencies from 10 kHz to 8 GHz – Part II: Broadband Analysis. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, T. 62, pp. 1–11, 2000411. DOI: 10.1109/TGRS.2023.3340693

ПОЛЕВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерения проводились на пяти полях в разных районах Омской области в летний и осенний периоды. Диэлектрическая проницаемость почв определялась в слое 0-5 см с последующим определением влажности и сухой плотности образца почвы в ячейке термостатно-весовым способом. Параллельно определялась влажность и температура почвы в слоях 0-2 см и 2-4 см при отборе проб с помощью колец Качинского (табл. 2, рис. 4).

Определение комплексной диэлектрической проницаемости почв в диапазоне частот от 0,1 МГц до 40–50 МГц производилось путем измерения комплексного коэффициента отражения от одного из разъемов ячейки при осуществлении режима холостого хода на другом разьеме. Расчет производился в предположении, что ячейка на этих частотах является сосредоточенным конденсатором. В диапазоне частот от 30-40 МГц до 3 ГГц производилось измерение комплексного коэффициента передачи и сопоставление с расчетным значением по формуле для тонкого диэлектрического слоя.

Таблица 2. Координаты полей на территории Омской области

Поле	Район	Координаты	
1	Горьковский район, п. Серебряное	55°42'01,5" с.ш.	74°05'19,7" в.д.
2	Называевский р-н, п. Налимово	55,628990 с.ш.	71.793667 в.д.
3	Русско-Полянский р-н	53°47'11.7" с.ш.	73°47'23.9" в.д.
4	Называевский р-н, п. Орлово –Кукушкино	55,735774 с.ш.	72,261013 в.д.
5	Любинский р-н, п. Камышловский	55.113091 с.ш.	72.905167 в.д.



Рис. 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерения частотной зависимости КДП почв приведены на рис. 5-9. Поскольку в периоды измерений влажность поверхностного слоя почв была невысокой, были дополнительно выполнены измерения почв, увлажненных до состояния полного капиллярного насыщения. Для сглаживания колебаний измеряемых значений использовалась релаксационно-рефракционная модель (сплошные линии на рисунках).

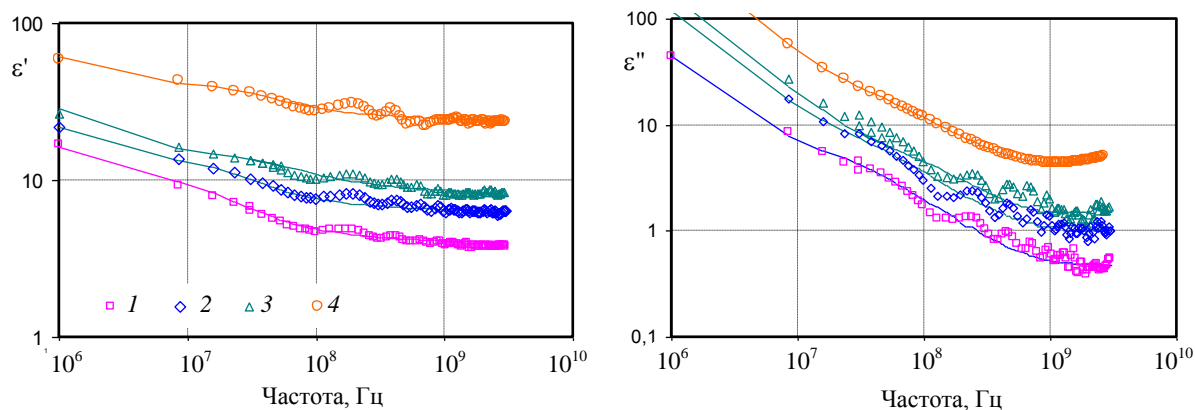


Рис. 5. Частотная зависимость действительной и мнимой частей КДП почвы № 1 в табл. 1. Влажность, $\text{м}^3/\text{м}^3$: 1 – 0,122; 2 – 0,162; 3 – 0,288; 4 – 0,498. Сухая плотность, $\text{г}/\text{см}^3$: 1 – 0,980; 2 – 1,02; 3 – 0,911; 4 – 0,998. Прибор sv4401a

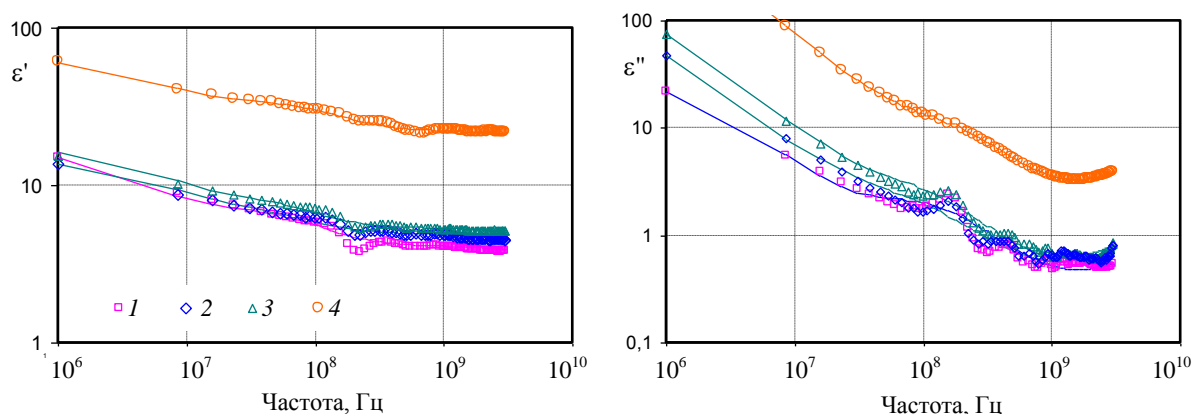


Рис. 6. Частотная зависимость действительной и мнимой частей КДП почвы № 2 в табл. 1. Влажность, $\text{м}^3/\text{м}^3$: 1 – 0,142; 2 – 0,185; 3 – 0,199; 4 – 0,488. Сухая плотность, $\text{г}/\text{см}^3$: 1 – 0,888; 2 – 0,793; 3 – 0,633; 4 – 1,21. Прибор nanoVNA-V2 Plus4

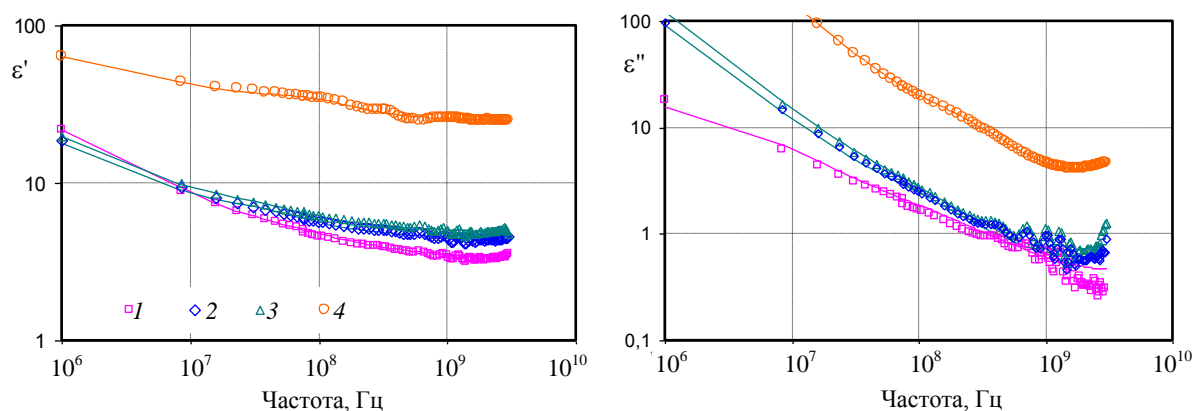


Рис. 7. Частотная зависимость действительной и мнимой частей КДП почвы № 3 в табл. 1. Влажность, $\text{м}^3/\text{м}^3$: 1 – 0,072; 2 – 0,159; 3 – 0,182; 4 – 0,531. Сухая плотность, $\text{г}/\text{см}^3$: 1 – 0,960; 2 – 0,72; 3 – 0,69; 4 – 1,13. Прибор LibreVNA

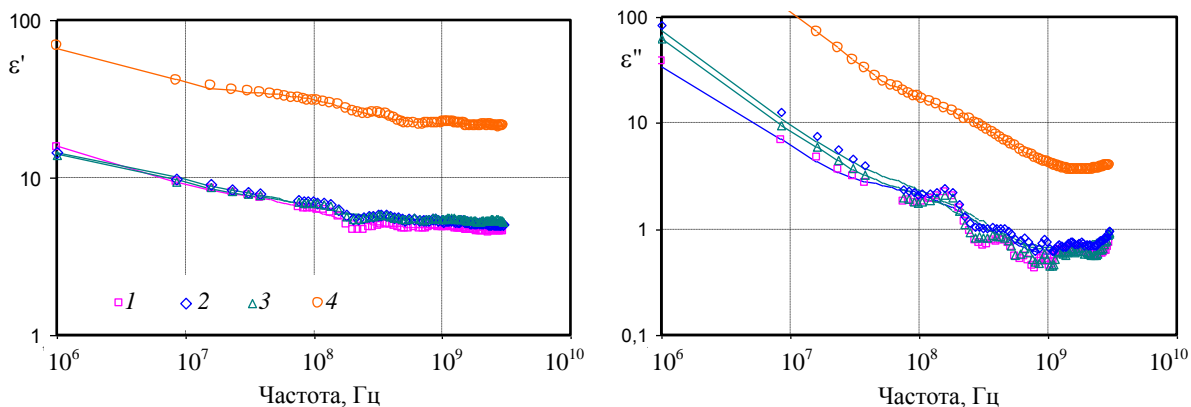


Рис. 8. Частотная зависимость действительной и мнимой частей КДП почвы № 4 в табл. 1.
Влажность, м³/м³: 1 – 0,190; 2 – 0,202; 3 – 0,224; 4 – 0,477. Сухая плотность, г/см³: 1 – 0,832; 2 – 0,777; 3 – 0,782; 4 – 1,23.
Прибор nanoVNA-V2 Plus4

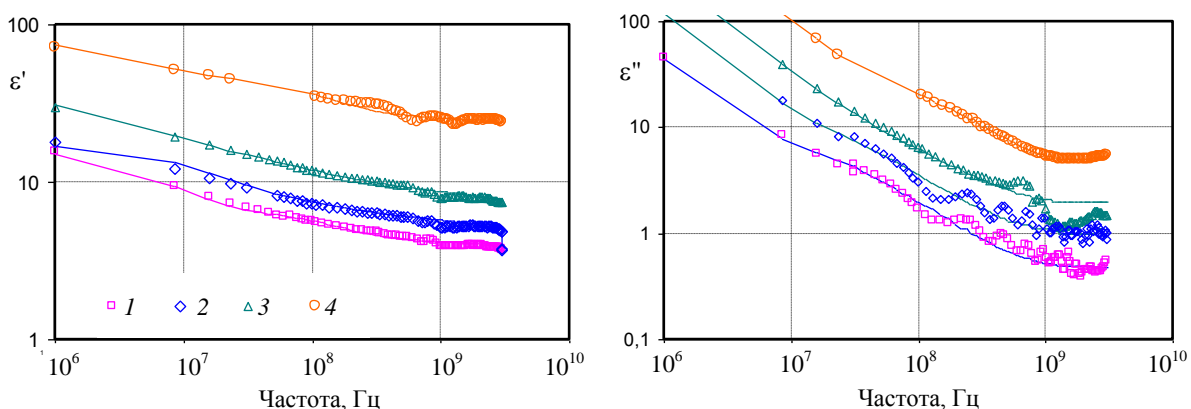


Рис. 9. Частотная зависимость действительной и мнимой частей КДП почвы № 5 в табл. 1.
Влажность, м³/м³: 1 – 0,178; 2 – 0,230; 3 – 0,270; 4 – 0,542. Сухая плотность, г/см³: 1 – 0,928; 2 – 0,831; 3 – 0,969; 4 – 1,15.
Прибор nanoVNA-V2 Plus4

Содержание гумуса и гранулометрический состав почв, определяемый методом седиментации, были измерены в сторонней организации. Практика показала, что содержание глины (по Качинскому, это частицы размером менее 0,01 мм), измеряемое у одной и той же почвы в разных организациях или даже в одной организации, но с перерывом в несколько месяцев, может отличаться на 50-70%. В то же время метод лазерной дифракции обнаруживает в почвах в 2-3 раза больше глины, чем метод седиментации. Большое количество зарубежных и отечественных статей посвящено этой проблеме, которая окончательно не решена. В табл. 3 мы привели результаты тех измерений, которые лучше всего согласуются с результатами диэлектрических измерений.

Таблица 3. Содержание гумуса и гранулометрический состав почв

№	Сод. гумуса, %	Количество фракций с размерами частиц в мм, % к сухой почве (по Качинскому)						
		1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001	<0,01
1	5,5	0,2	28,1	36,5	8,9	18,7	7,6	35,2
2	5,1	1	25,3	30,5	16,2	15,4	11,6	39,3
3	4,2	2,6	30,4	22,5	15,2	21,4	7,9	44,5
4	6,9	0,4	39,1	16,6	13,7	10,6	19,6	46,3
5	4,7	6,2	5,8	27,9	30,2	14,6	15,3	60,1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГЛИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Известно влияние содержания глины на диэлектрическую проницаемость почв в широкой полосе частот [Bobrov et al., 2010, 2024], однако попыток оценки содержания глины с помощью диэлектрических измерений не предпринималось. Наличие глины приводит к возрастанию интенсивности процессов диэлектрической релаксации, приводящее к увеличению действительной и мнимой частей КДП на частотах ниже 10-100 МГц. Кроме того, наличие глины увеличивает удельную поверхность, вызывая возрастание максимального количества связанной воды Wt . В результате КДП на частотах 2-10 ГГц уменьшается, так как КДП связанной воды меньше, чем свободной.

Определение содержания глины через максимальное количество связанной воды.

В работе [Бобров и др., 2008] приведено регрессионное уравнение для Wt (в г/г), коэффициенты которого были найдены при обработке данных семи разных почв:

$$Wt = Ah^\alpha + Bg^\beta + Cs^\gamma, \quad (2)$$

где h , g и s – содержание гумуса, физической глины и песка (частиц крупнее 0,05 мм) в весовых процентах от общей сухой массы, соответственно; A , B , C , α , β и γ , – подбираемые коэффициенты (табл. 4).

Таблица 4. Коэффициенты регрессионного уравнения (2)

A	B	C	α	β	γ
1,0910 ⁻³	3,18·10 ⁻⁴	0,0157	3,806	2,738	1,477

Значения Wt были найдены при моделировании высокочастотной части (1-3 ГГц) спектров, приведенных на рис. 5-9. Средние значения Wt , а также используемые при расчете данные о содержании гумуса и песка приведены в табл. 5. Эти данные мы использовали, так как, в отличие от содержания глины, содержание гумуса измеряется более надежным методом Тюринга, а песка – методом сит. Расчетные значения содержания глины, полученные с применением уравнения (2) также приведены в табл. 5 и на рис. 10а. Из-за невысокой точности применяемых nanoVNA погрешность измерения Wt составляет 20%, однако это приводит к погрешности измерения содержания глины менее 5%, так как изменение содержания глины сильно влияет на Wt .

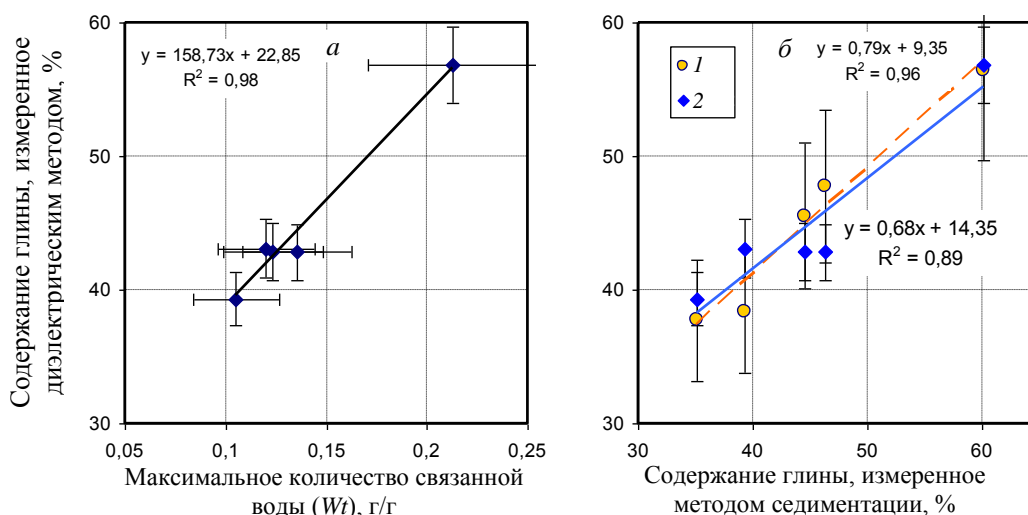


Рис. 10. Содержание глины, измеренное через Wt (а), и сопоставление результатов диэлектрических измерений с измерениями методом седиментации (б). 1 – измерения через КДП на частоте 1 МГц; 2 – измерения через Wt

Bobrov P.P., Mironov V.L., Kondratyeva O.V. and Repin A.V. The effect of clay and organic matter content on the dielectric permittivity of soils and grounds at the frequency range from 10 MHz to 1 GHz // *Proceed. of the 2010 IEEE Intern. Geosci. Remote Sens. Symp.* July 25, 2010. P. 4433-4435

Bobrov P.P., Kroshka E.S., Muzalevskiy K. V. The Effect of Dielectric Relaxation Processes on the Complex Dielectric Permittivity of Soils at Frequencies from 10 kHz to 8 GHz – Part II: Broadband Analysis. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2024, T. 62, pp. 1–11, 2000411. DOI: 10.1109/TGRS.2023.3340693

Бобров П.П., Миронов В.Л., Ивченко О.А., Красноухова В.Н. Спектроскопическая модель диэлектрической проницаемости почв, использующая стандартизованные агрофизические показатели // *Исследование Земли из космоса*. 2008. № 1. С. 15-23

Определение содержания глины через КДП на частоте 1 МГц

Регрессионное уравнение для нахождения содержания глины (CG) в процентах от массы было получено путем сопоставления с данными седиментационного анализа:

$$CG = 1.65 \cdot \varepsilon' + 3.12 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon'' + 12.4. \quad (3)$$

Результаты измерения действительной и мнимой частей КДП и результаты расчета содержания глины приведены в табл. 5 и на рис. 10б. Принимая погрешность измерения действительной части КДП в 5%, а мнимой части в 10%, получаем погрешность измерения содержания глины по уравнению (3) в 12%. Эти результаты немного отличаются от полученных через Wt , при этом средние значения удовлетворительно согласуются с данными седиментационного анализа (рис. 11).

Таблица 5. Результаты расчета содержания глины

№ поля	Содержание гумуса, %	Метод седиментации		Wt , г/г	Глина, %. Расчет по Wt	КДП на частоте 1 МГц		Глина, %. Расчет по КДП	Средние значения, %
		Глина, %	Песок, %			ε'	ε''		
1	5,5	35,2	30,3	0,105	39,3	59,2	424,1	37,7	38,5
2	5,1	39,3	26,3	0,120	43,1	66,7	937,3	38,4	40,8
3	4,2	44,5	33	0,123	42,8	62,0	557,8	45,5	44,2
4	4,4	46,3	42	0,136	42,8	63,3	1243	47,7	45,3
5	4,7	60,1	12	0,213	56,9	74,6	895,8	56,5	56,7

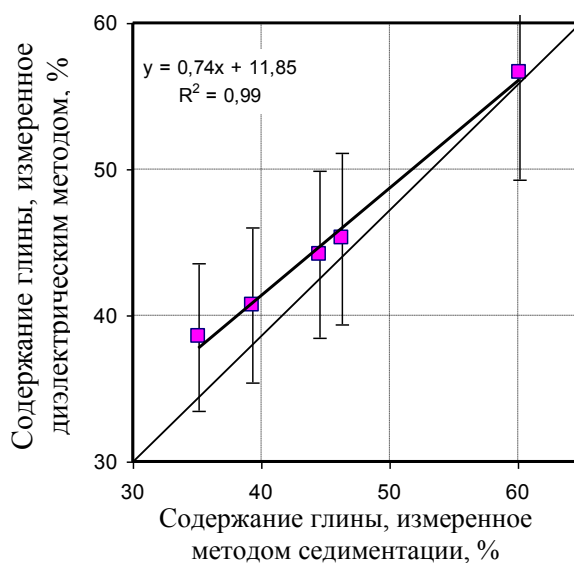


Рис. 11. Сопоставление средних значений, полученных диэлектрическим методом, с измеренными методом седиментации

Несмотря на не очень высокую точность используемых компактных VNA, результаты измерения содержания глины можно считать удовлетворительными. Для обработки данных использовались низкочастотный и высокочастотный края диэлектрического спектра, где волатильность измеряемых значений КДП была незначительной.

СРАВНЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ КОНТАКТНЫМ И ДИСТАНЦИОННЫМ МЕТОДАМИ

Результаты определения влажности в слоях 0-1 и 1-2 см и восстановленных по данным дистанционных микроволновых радиометрических измерений на частоте 1,4 ГГц для пикселя, в пределах которого находится соответствующее поле, приведены в табл. 6. Пробы почв для определения влажности отбирались в пяти точках поля на расстоянии 30-50 м друг от друга. В таблице приведены средние данные. Использовались дистанционные данные, представленные в формате SMAP Level 3 с пространственным разрешением в 9 км. Восстановленные при условии малых пространственных вариаций типа подстилающей поверхности в пределах пикселя ГИС продукта «The global SMOS Level 3 daily soil moisture and brightness temperature maps» значения влажности в большинстве случаев превышают измеренные и удовлетворительно совпадают друг с другом только для поля 3 и частично для поля 5.

Таблица 6. Сопоставление наземных и дистанционных данных о влажности почв

№ поля	Дата	Влажность в слое 0-1 см, м ³ /м ³	Влажность в слое 1-2 см, м ³ /м ³	Данные SMAP, м ³ /м ³
1	15.08.2024	0,113	0,173	0,237
2	12.06.2024 04.07.2024	0,227 0,165	0,246 0,138	0,295 0,211
3	18.06.2024 22.09.2024	0,260 0,134	0,271 0,155	0,262 0,162
4	12.06.2024 04.07.2024	0,180 0,148	0,211 0,164	0,321 0,245
5	02.07.2024 22.07.2024 30.09.2024	0,073 0,222 0,118	0,127 0,251 0,175	0,24 0,23 0,31

В алгоритмах SMOS и SMAP используются данные о глине в соответствии с классификацией USDA. Точный перевод из классификации Качинского в классификацию USDA невозможен. Приближенные формулы перевода приведены в [Bobrov et al., 2022]:

$$F_{<0.002} \approx F_{<0.001} + 0.23(F_{<0.01} - F_{<0.001}) \quad (4)$$

и в [Шеин, 2009]: $F_{<0.002} \approx F_{<0.001} + 0.43(F_{<0.005} - F_{<0.001}), \quad (5)$

$$F_{<0.002} \approx -1.148 + 0.43F_{<0.005} + 0.53F_{<0.001}. \quad (6)$$

где коэффициенты F определяют доли частиц размерами менее 0,002 (в классификации USDA) и менее 0,001, 0,005 и 0,01 мм (в классификации Качинского). Результаты в сопоставлении с данными ресурса (URL <https://www.earthdata.nasa.gov/data/catalog?keyword=SMAP%20Soil%20Moisture>) приведены в табл. 7. Видно, что данные этого ресурса отличаются от измеренных результатов в сторону завышения. Это может быть причиной завышения дистанционно определяемых значений влажности, показанных в табл. 6. При меньшем содержании глины на частоте 1,4 ГГц КДП выше при неизменной влажности. Алгоритм SMAP, в который заложено завышенное значение глины, воспринимает это как более высокую влажность. Близкие значения содержания глины для полей 3 и 5 соответствуют близким значениям влажности (табл. 6).

Таблица 7. Содержание глины по классификации USDA

№ поля	$F_{<0.01}$, %	$F_{<0.002}$, % (4)	$F_{<0.002}$, % (5)	$F_{<0.002}$, % (6)	$F_{<0.002}$, % средние	Данные ресурса SMAP
1	35,2	13,25	14,94	13,52	13,90	24,36
2	39,3	18,87	18,22	16,61	17,90	26,83
3	44,5	25,19	24,16	22,23	23,86	26,08
4	46,3	16,32	17,10	15,64	16,35	22,56
5	60,1	25,60	21,58	19,82	22,33	22,83

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. Vol. 60. 2005409. DOI:10.1109/TGRS.2022.3180727

Шеин Е.В. Гранулометрический состав почв: проблемы методов исследования, интерпретации результатов и классификаций // Почвоведение. 2009. № 3. С. 309-317.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения полевых измерений были разработаны и изготовлены пять экспериментальных установок. Несмотря на невысокую стоимость измерительных приборов (компактных VNA) и простоту изготовления измерительных ячеек, была достигнута удовлетворительная погрешность измерения на низкочастотном (1 МГц) и высокочастотном (1-3 ГГц) краях спектра. Это позволило оценивать содержание глины двумя способами: через КДП на частоте 1 МГц и через максимальное количество связанной воды в почве. Оба способа дали близкие результаты и удовлетворительно согласуются с результатами седиментационного анализа.

Сопоставление значений влажности, измеряемых контактным и дистанционным методами, показало, что в большинстве случаев дистанционный метод дает завышенные результаты. Возможной причиной этого является используемое в алгоритме восстановления влажности завышенное относительно реального содержание глины в исследуемых почвах.