

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.14>

УДК: 321.396.67

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ПРИЗЕМНЫЕ ПЛАСТИНЧАТЫЕ АНТЕННЫ ЗНАЧЕНИЙ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Ю.А. Костычов, К.А. Майненгер, С.В. Кривальцевич

**Институт радиофизики и физической электроники Омского научного центра СО РАН,
644024, Омск, проспект Карла Маркса, 15**

Статья поступила в редакцию 17 июля 2026 г.

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости действующих значений комплексной диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности на приземные пластинчатые излучатели в декаметровом диапазоне длин волн от ее свойств. Проведено сравнение полученных зависимостей с известным аналитическим выражением. В лабораторных условиях экспериментально получены регрессионные формулы действующих значений действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и проводимости подстилающей поверхности на пластинчатые излучатели в виде секторов с углом при вершине от 60 до 140 градусов. Проведена апробация регрессионной модели в натурных условиях на почве, имеющей слоистую структуру, в диапазоне частот от 5 до 45 МГц.

Ключевые слова: антенно-фидерные устройства, стелющая антенна, приземная антенна, действующие значения, эффективные значения, комплексная диэлектрическая проницаемость.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Омской области в рамках гранта РФФ № 26-12-20019

Автор для переписки: Костычев Юрий Александрович fatnblan@mail.ru

Введение

Пластинчатые приземные излучатели декаметрового диапазона волн и более высокочастотные применяют не только для радиосвязи [1], но и для исследования земли [2,3,4] (в составе георадаров). Обычно пластинчатые приземные антенны представляют собой симметричные дипольные антенны в виде двух секторов с общими вершинами (где организована точка питания, см. рис. 1а), размещенных на границе раздела сред «воздух – подстилающая поверхность». На характеристики таких антенн (характеристический импеданс, постоянная распространения вдоль излучателя, КПД и пр.) комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ подстилающей поверхности оказывает влияние не прямо, а через свое действующее значение КДП ε_{eff} . Аналитическое выражение зависимости между КДП подстилающей поверхности и его действующим значением позволяет решать не только прямую задачу определения характеристик приземной антенны по известным свойствам почвы, но и обратную: получать сведения о КДП подстилающей поверхности по измеренным действующим значениям КДП.

Авторы цикла работ [5-8] подробно исследовали зависимости характеристического импеданса симметричной приземной антенны УКВ-радар в виде двух секторов и других ее характеристик от свойств подстилающей поверхности, угла при вершине секторов и их высоты подвеса над поверхностью земли. Авторы упомянутых источников [3,4] также применяют приземную антенну в качестве георадара и исследования их ограничены диапазоном и типом поверхности (это ограничение обусловлено глубиной проникновения в почву электромагнитной волны высокой частоты). Таким образом, известные

исследования ([3-8]) выполнены или на высоких частотах (в дециметровом диапазоне), или на песчаных незасоленных почвах.

Для подстилающих поверхностей со значимыми потерями (влажностью, засоленностью), такие типы почв [9] широко распространены, исследования зависимостей характеристик приземных пластинчатых антенн от диэлектрических свойств почвы в декаметровом диапазоне отсутствуют. Известные работы [10,11] используют приближение, для которого действующее значение КДП полагают средним арифметическим между КДП верхнего полупространства (воздуха с $\varepsilon_1' = 1$) и КДП подстилающей поверхности. Недостатки этого приближения и слабая корреляция с результатами натурного эксперимента, отмеченные в [12], не позволяют использовать его для реальных почв. Заполнение этого пробела путем установления зависимости действующих на приземную антенну значений КДП подстилающей поверхности от ее КДП окажется полезным как в разработке приземных антенн различных назначений, так и для нужд георазведки.

Целью данной статьи стало проведение экспериментальных исследований зависимости действующих значений КДП подстилающей поверхности на приземные пластинчатые излучатели от ее свойств в декаметровом диапазоне длин волн и сравнение полученных результатов с известными аналитическими выражениями.

1. Методы измерений

Для реализации поставленной цели были выбраны пластинчатые симметричные антенны (см. рис 1а) с излучателями в виде секторов с углом при вершине в 2α (для трех значений угла α : 30° , 50° и 70°) и углом между осями секторов в 2β ($\beta = 90^\circ$). Характеристический импеданс в свободном пространстве таких излучателей может быть аналитически определен [13] по формуле (1).

$$W = Z_0 \frac{K}{K'}, \quad (1)$$

где Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$, μ_0 – магнитная постоянная, ϵ_0 – электрическая постоянная, K и K' – абсолютные значения полного эллиптического интеграла первого рода и дополнительной его функции. А именно:

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2\sin^2\theta}}; \quad k = \frac{\operatorname{tg}[(\beta+\alpha)/2]}{\operatorname{tg}[(\beta-\alpha)/2]}; \quad k' = \sqrt{1-k^2}; \quad K'(k) = K(k').$$

По известному характеристическому импедансу определяли погонные емкости излучателей (для трех вариантов угла α) и были получены статические значения их емкости в свободном пространстве C_0 по формуле (2).

$$C_0 = \frac{l}{cW}, \quad (2)$$

где l – физическая длина излучателя антенны, c – скорость света в свободном пространстве.

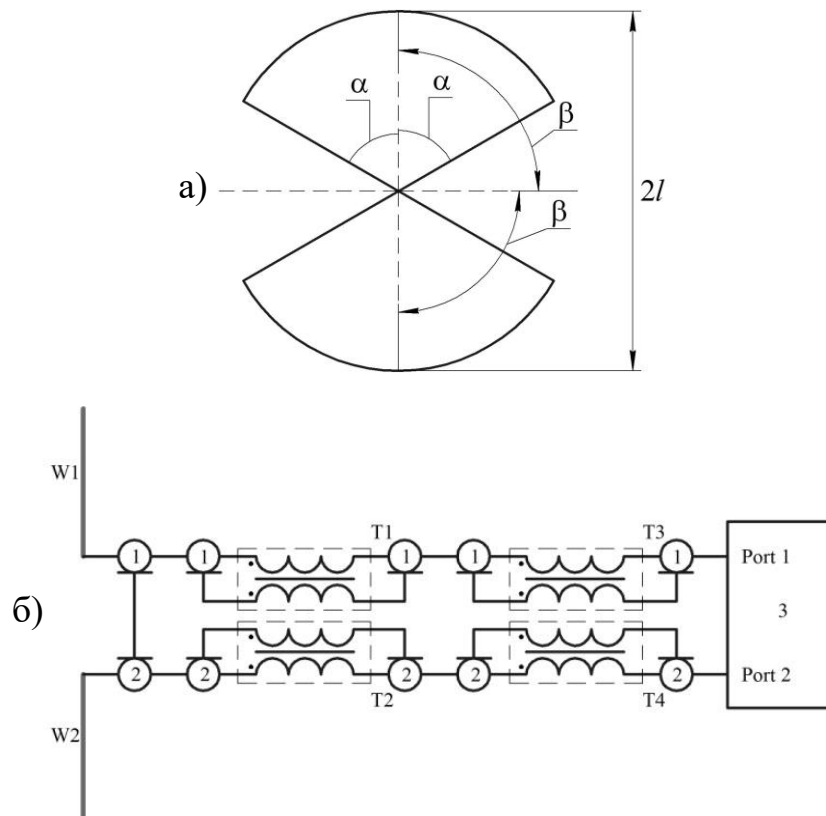


Рис. 1. Вид сверху (а) исследуемой приземной пластинчатой антенны и принципиальная схема подключения ее излучателей $W1$ и $W2$ к векторному анализатору цепей 3 посредством коаксиальных кабелей 1 и 2 (б).

Спектры действительной части действующего значения КДП ϵ_{eff} определяли для каждой частоты измерения как отношение емкости антенны C , размещенной на подстилающей поверхности, к емкости в свободном пространстве C_0 по формуле (3). Емкость антенны была получена согласно методу диэлектрической емкостной спектроскопии, изложенному в [14], по измеренной входной комплексной проводимости антенны $Y = G + iB$ с помощью составленной ее эквивалентной схемы (см рис. 2). Действующие значения проводимости σ_{eff} определяли по формуле (4) через активную проводимость g эквивалентной схемы антенны. Также в эквивалентной схеме учтена индуктивность излучателя L и контактная емкость в точке питания C_k . Проводимость излучения не была учтена отдельно (и не приведена на эквивалентной схеме), ее влияние на общую проводимость антенны полагалось много меньшим, нежели влияние проводимости потерь в подстилающей поверхности:

$$\epsilon_{\text{eff}} = C / C_0, \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{eff}} = \epsilon_0 (g / C_0). \quad (4)$$

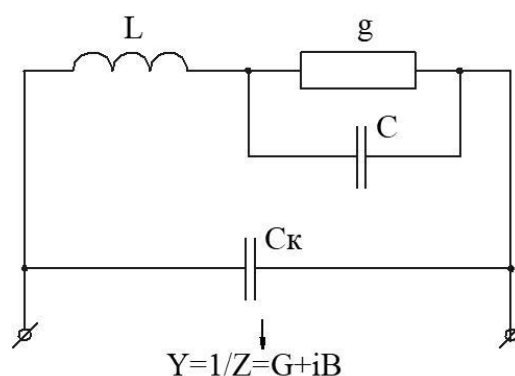


Рис. 2. Эквивалентная схема исследуемой приземной пластинчатой антенны.

Значения Y определяли как величину обратную импедансу Z (входному комплексному сопротивлению антенны), который в свою очередь измеряли векторным анализатором цепей, согласно методике описанной в [12]. Для этого были использованы компактные векторные анализаторы LibreVNA и SV4401A (внесенный в государственный реестр средств измерений Российской Федерации

за номером 89087-23), характеристики которых приведены в [15]. Два прибора было использовано для повышения достоверности измерений и усреднения полученных данных.

Принципиальная схема установки для измерения комплексной проводимости антенны приведена на рис. 1б, на котором отмечены: 1, 2 – коаксиальные кабели марки RG-58 C/U (волнового сопротивления 50 Ом длиной 3 метра) с соединителями типа SMA-вилка, двухпортовый векторный анализатор цепей – 3, T1..T4 – ферритовые фильтры (дроссели), выполненные намоткой по 4 витка кабеля (1 и 2 соответственно для T1, T3 и T2, T4) на ферритовый сердечник из четырех тороидальных колец размерами $33 \times 20 \times 12$ мм с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 60$. Ферритовые фильтры были использованы для снижения фидерного эффекта и взаимного влияния фидерных линий друг на друга. Излучатели присоединяли к центральным жилам кабелей механически (с помощью зажимных клемм, кабель 1 к излучателю W1, кабель 2 к излучателю W2), оплетки кабелей 1 и 2 имели гальванический контакт у точки питания антенны (см. рис. 5а).

По методике [12] были выполнены двухпортовые измерения собственных импедансов Z_{11} , Z_{22} каждого излучателя антенны и взаимный импеданс Z_{12} , определенный через комплексный коэффициент передачи S_{12} . Полный импеданс антенны Z был определен по формуле (5):

$$Z = Z_{11} + Z_{22} - 2Z_{12} = Z_{11} + Z_{22} - 2S_{12}Z_{22}. \quad (5)$$

Комплексную проводимость антенны определяли как $Y = 1/Z = G + iB$ (G и B – активная и реактивная проводимости). Частотное положение первого последовательного резонанса ω_p определяли по первой частоте обращения в ноль реактивной проводимости $B = \text{Im}(Y)$. С помощью метода [11] по формулам (6)-(8) находили значения элементов эквивалентной схемы антенны g и C :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta = & \sqrt[3]{-\frac{\frac{G}{B}\left(1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\omega_p^2}{3\omega^2}\right)^3 + \left(\frac{\frac{G}{B}\left(1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)}{2}\right)^2}} + \\ & + \sqrt[3]{-\frac{\frac{G}{B}\left(1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)}{2} - \sqrt{\left(\frac{\omega_p^2}{3\omega^2}\right)^3 + \left(\frac{\frac{G}{B}\left(1-\frac{\omega_p^2}{\omega^2}\right)}{2}\right)^2}}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$g = G \frac{\left(\operatorname{tg} \delta\right)^2 + \left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2} - 1 - \left(\operatorname{tg} \delta\right)^2\right)^2}{\left(\frac{\omega_p^2}{\omega^2} - \left(\operatorname{tg} \delta\right)^2\right)^2}, \quad (7)$$

$$C = \frac{g}{\omega \operatorname{tg} \delta}, \quad (8)$$

где $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon_{\text{eff}}'' / \varepsilon_{\text{eff}}'$ – действующее значение тангенса диэлектрических потерь, ω – циклическая частота измерения.

Частотный диапазон измерений данным методом ограничен сверху окрестностью вблизи частоты первого последовательного резонанса. Нижняя граница проведения измерений ограничена растущей с увеличением длины волны проведения измерений приборной погрешностью.

Таким образом были получены спектры действующих значений КДП для набора подстилающих поверхностей: выбраны водные растворы NaCl различной солености, как подстилающие поверхности с высокими значениями проводимости, и сухой песок, как поверхность с малой проводимостью. На базе снятых спектров ε_{eff} были построены регрессионные уравнения, описывающие зависимость действующих значений проводимости и действительной части КДП от КДП подстилающей поверхности.

КДП подстилающей поверхности была измерена аналогичным методом емкостной диэлектрической спектроскопии посредством емкостной ячейки на базе симметричной полосковой линии, описанной в [16]. Значения КДП для водных растворов NaCl, а также их соленость, соответствующую необходимой проводимости, контролировали и выбирали с помощью модели Дебая, приведенной в [17].

2. Результаты экспериментов

В лабораторных условиях были определены контактная емкость C_k и емкость антенны с излучателями в свободном пространстве C_0 . Длина излучателя составляла 200 мм, выполнен он был из алюминиевой фольги толщиной 9 мкм, ламинированной полипропиленом толщиной до 40 мкм. По эквивалентной схеме рис. 2 легко показать, что общая измеряемая в низкочастотном приближении ($\omega \ll \omega_p$) емкость антенны C_Σ представляет собой сумму искомых емкостей C_0 и C_k эквивалентной схемы, а отношение емкостей определено отношением частот первых последовательных и параллельных резонансов. Полученные значения емкостей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Измеренные значения емкостей C_k и C_0 (округлены вверх).

Угол α , °	C_0 теоретическое по (2), пФ	C_Σ , пФ	C_0 , пФ	C_k , пФ
70	5,5	5,0	4,7	0,3
50	3,8	3,6	3,3	0,3
30	2,8	2,5	2,2	0,3

Затем для построения регрессионной модели действующих значений КДП были измерены их спектры при размещении антенны на водных растворах солей с удельными проводимостями (20, 40, 80 и 160 мСм/м). Солевые растворы заливали в пластиковую емкость размером 800 × 400 × 400 мм (дно емкости было металлизировано и заземлено). Выбор значений удельных проводимостей обусловлен сверху удвоенными значениями (для повышения достоверности регрессионной формулы) проводимости почв, встречающимися в естественных условиях [9]. Нижнее значение проводимости солевого раствора определялись проводимостью водопроводной воды, используемой при измерениях.

Полученные спектры $\varepsilon_{\text{eff}}'$ при размещении антенны на водном растворе NaCl с удельной проводимостью 20 мСм/м для углов α в 30° , 50° и 70° приведены на рис. 3.

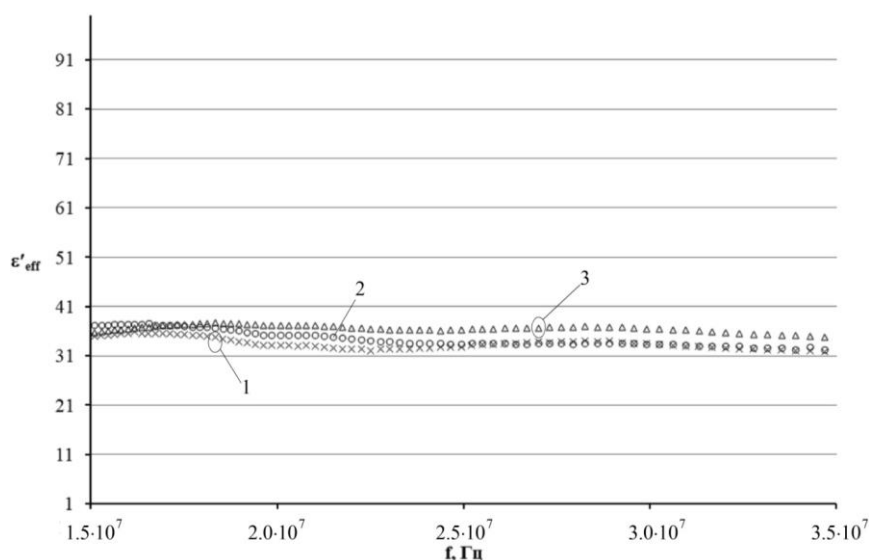


Рис. 3. Спектры $\varepsilon_{\text{eff}}'$ при размещении антенны на водном растворе NaCl с удельной проводимостью 20 мСм/м для углов α : 1 – 50° , 2 – 70° и 3 – 30° .

После чего были получены спектры $\varepsilon_{\text{eff}}'$ при размещении антенны на солевых растворах с проводимостью 40, 80 160 мСм/м (на рис. 4 приведены спектры для угла $\alpha = 50^\circ$).

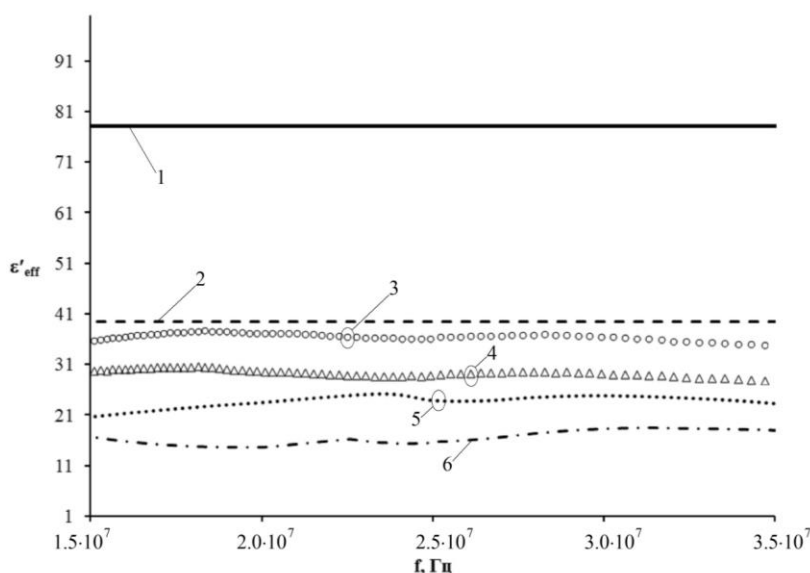


Рис. 4. Спектры действительных значений КДП: 1 – измеренные водного растворов NaCl удельной проводимостью от 20 мСм/м до 160 мСм/м, 2 – модельные значения действующего значения КДП известных подходов [10,11] для выбранных растворов, измеренные действующие значения КДП: 3 – для 20 мСм/м, 4 – для 40 мСм/м, 5 – для 80 мСм/м и 6 – для 160 мСм/м.

Учет низких значений проводимости подстилающей поверхности был выполнен с помощью речного песка (с массовой влажностью 1 % или 0,01 м³/м³, округлена вверх). Песок засыпали в ту же пластиковую емкость. Вид антенны, размещенной на песке показан на рис. 5а.

Результаты измерения спектров КДП для сухого песка, действующих значений КДП при размещении на нем антенны и модельных значений представлены на рис. 6. Сформулированная на базе проведенных лабораторных измерений регрессионная модель приведена в таблице 2. На рис. 6 приведены данные, полученные с помощью регрессионной модели.

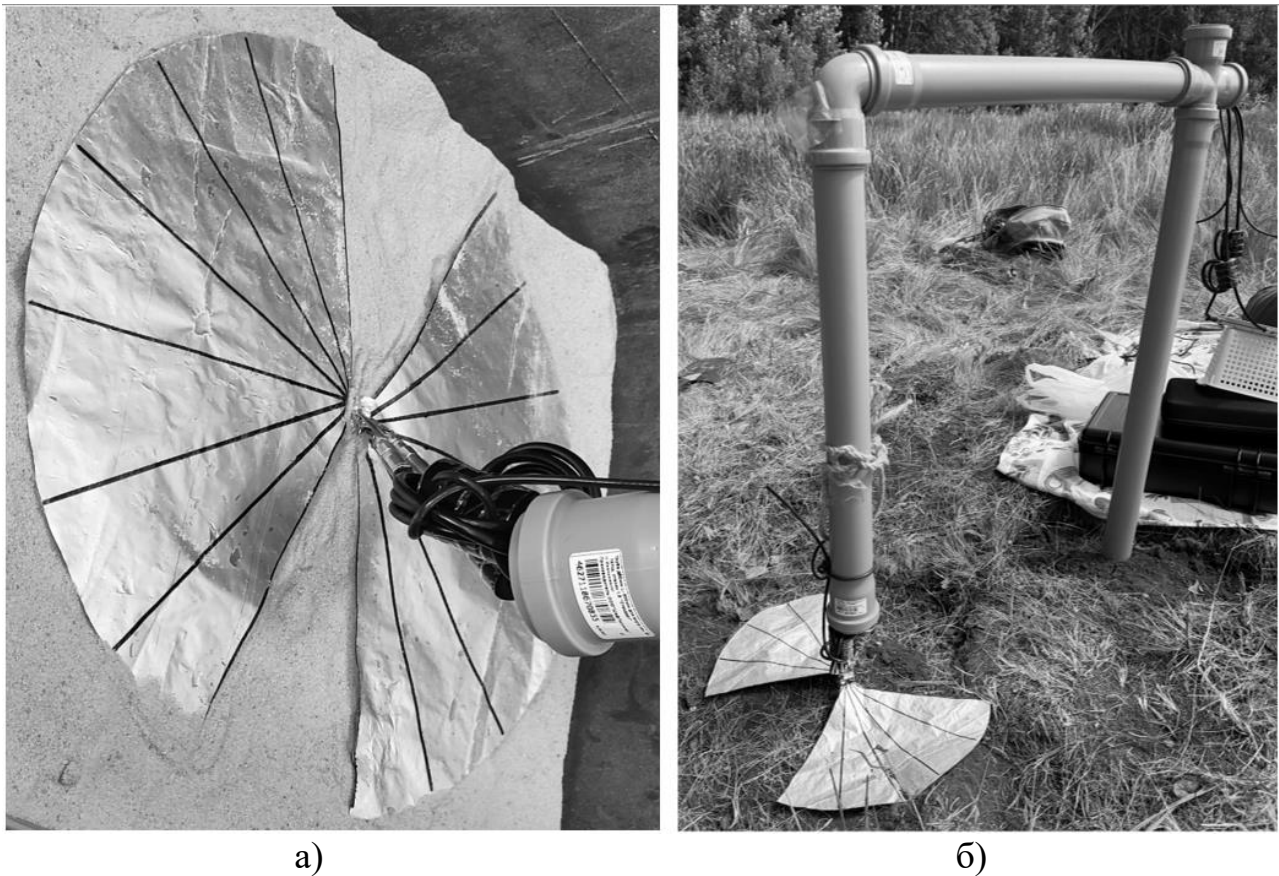


Рис. 5. Внешний вид антенны, размещенной на песке (а) и измерительной установки (б), размещенной на почве.

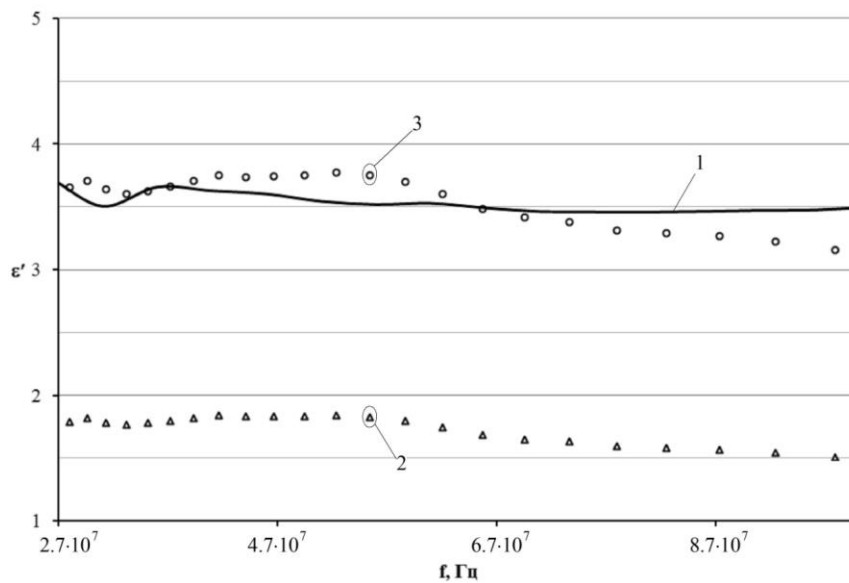


Рис. 6. Спектры КДП: 1 – измеренный речного песка, 2 – измеренный эффективных значений для антенны на речном песке, 3 – эффективные значения, полученные по формуле (10) регрессионной модели.

Таблица 2. Регрессионные модели для действующих значений КДП.

Формула регрессии	Коэффициент формулы	Коэффициент детерминации, R^2	Номер формулы
$\sigma_{\text{eff}[C_{M/M}]} = a \sqrt{\sigma_{[C_{M/M}]}}$	$a = 0,121$	0,995	(9)
$\varepsilon_{\text{eff}}' = \frac{\varepsilon'}{1 + \exp\left(b \times \sigma_{\text{eff}[C_{M/M}]}\right)}$	$b = 25$	0,996	(10)

Графическое представление полученной модели действующих значений отражено на рис. 7 (а – для удельной приводимости, б – для действительной части КДП).

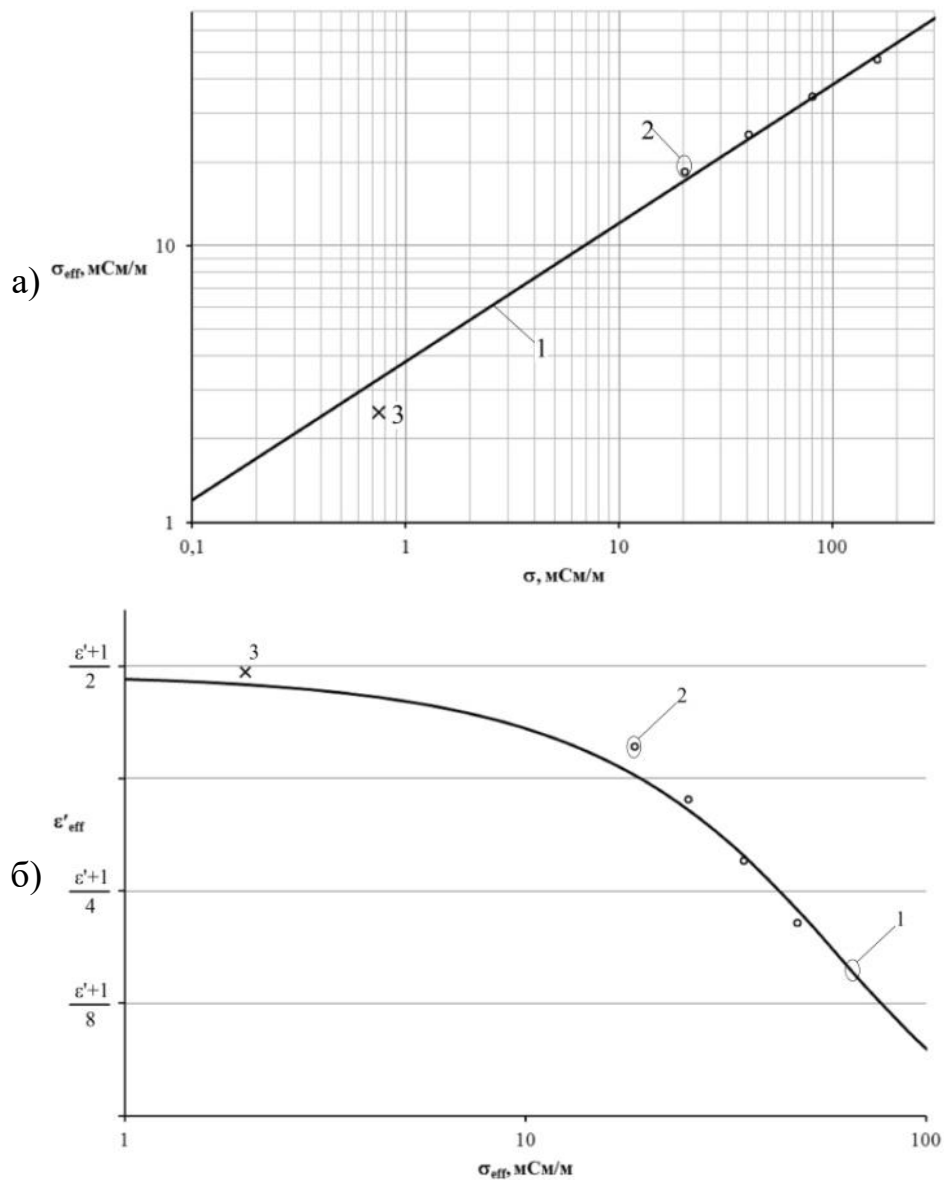


Рис. 7. Графики уравнений регрессии для действующих значений: удельной проводимости (а) и действительной части КДП (б). Нумерация графиков соответствует: 1 – формуле регрессионного уравнения, 2 – измеренным усредненным значениям для антенны, размещенной на водном растворе NaCl, 3 – измеренному значению для антенны, размещенной на речном песке.

Апробация полученной регрессионной модели была проведена на почве (типа чернозем) в точке с координатами $54^{\circ}40'21''$ с.ш. $73^{\circ}10'9''$ в.д. летом 2026 г. Для этого измерительную установку разместили на почве: механический держатель из труб (из поливинилхлорида) диаметром 50 мм обеспечивал удаление от антенны человека, производящего измерения, на расстояние около 1 метра. Также механический держатель позволял воспроизводить условия эксперимента при смене антенны.

Результаты натурных измерений действующих значений КДП аналогично лабораторным оказались близкими для различных углов при вершине излучателя, типовые значения для угла $\alpha = 50^\circ$ приведены на рис. 8. Среднее действующее значение удельной проводимости составило 6 мСм/м.

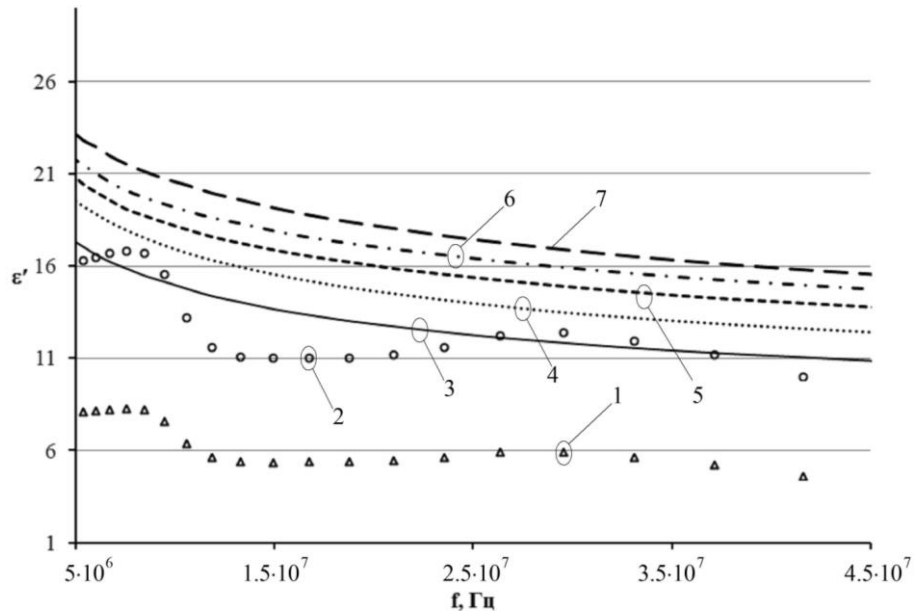


Рис. 8. Полученные при апробации на почве регрессионной модели, графики зависимости значений действительной части КДП: 1 – измеренных действующих значений, 2 – результата моделирования, номера от 3 до 7 соответствуют измеренным значениям КДП слоев почвы 0-15 см, 15-35 см, 35-55 см, 55-75 см и 75-100 см.

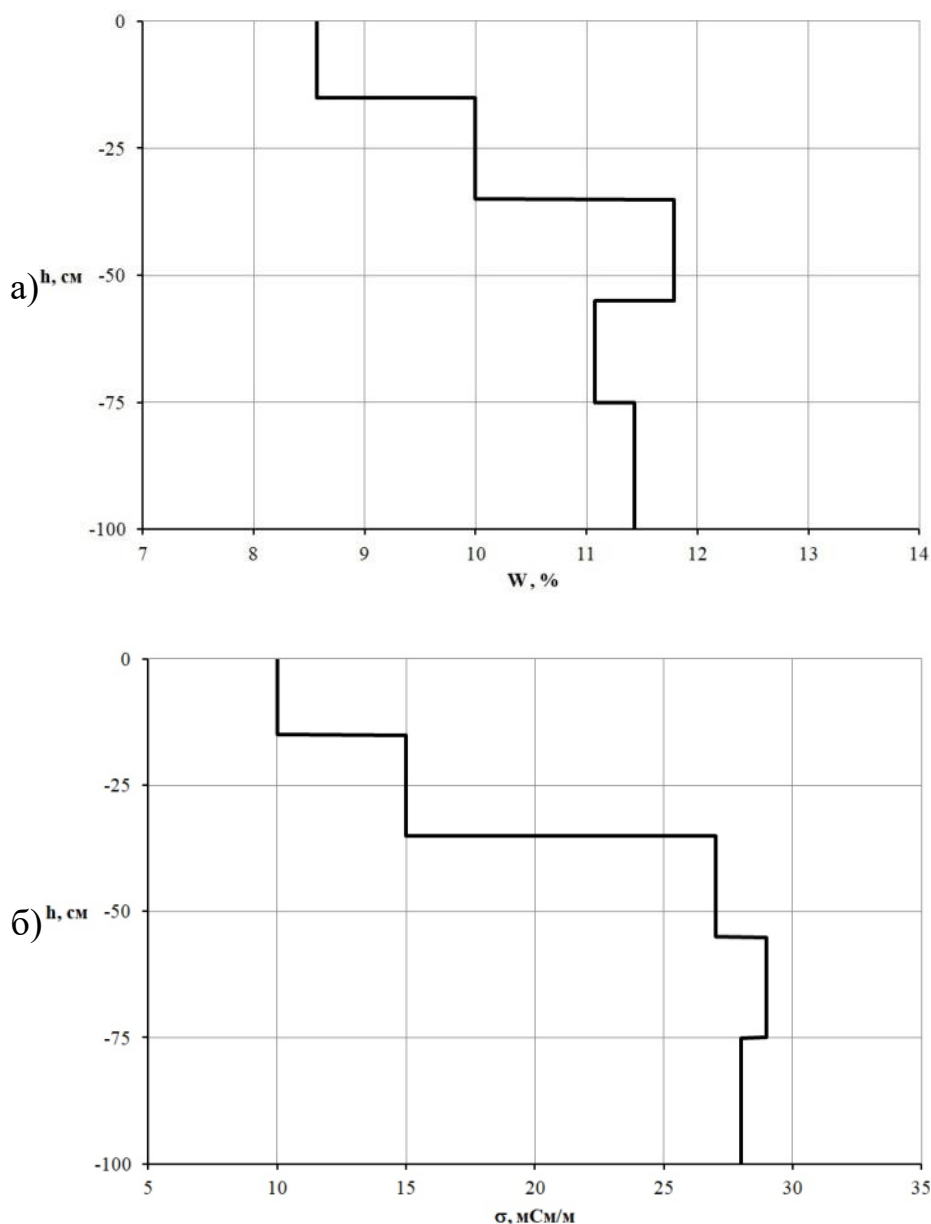


Рис. 9. Графики профилей влажности (массовой) почвы W (а) и ее удельной проводимости σ (б) по глубине h (в см).

Прямые измерения КДП почвы были проведены с помощью забора буром послойно. Глубинный профиль КДП (действительной части) почвы представлен на рис. 8 был составлен для слоев: 0-15 см, 15-35 см, 35-55 см, 55-75 см и 75-100 см (кривые с 3 по 7 соответствуют каждому слою, начиная с верхнего). Удельная проводимость почвы получена аналогично действительным значениям КДП методом диэлектрической емкостной спектроскопии в измерительной ячейке послойно, приведена на рис. 9б. Также была измерена массовая влажность почвы послойно (см. рис. 9а) термостатно-весовым методом.

3. Обсуждение результатов

Результаты лабораторных измерений емкостей эквивалентной схемы антенны в свободном пространстве соответствуют теоретически рассчитанным значениям с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,915$. Незначительные их отклонения обусловлены конечными размерами излучателей (формула (1) справедлива для бесконечно длинных секторов) и точностью их изготовления, в том числе точки питания. Значение контактной емкости постоянно от измерения к измерению, поскольку и конструкция точки питания неизменна.

Полученные спектры действующих на антенну значений КДП при ее размещении на водном растворе NaCl проводимостью 20 мСм/м при значениях половины угла при вершине сектора излучателя антенны от 30° до 70° совпадают с точностью $\pm 7\%$. Таким образом, установлено, что действующее значение КДП не зависит от угла при вершине сектора излучателя.

Измеренные действующие значения КДП снижаются с ростом удельной проводимости подстилающей поверхности при неизменном значении действительной части ее КДП. Этот результат находит качественное подтверждение в теоретической работе [18] о действующем значении КДП для длинноволновых линейных приземных излучателей (существенно отличающихся конструктивно от пластинчатых).

Сформулированная регрессионная модель в пределе малой удельной проводимости стремится к уже известным результатам [10,11] (для значений действительной части КДП подстилающей поверхности много больших единицы $\epsilon' \gg 1$ совпадает).

Для регрессионной модели при больших значениях удельной проводимости подстилающей поверхности (более 14 мСм/м) они превышают действующие ее значения (что соответствует известным представлениям). При малых значениях удельной проводимости подстилающей поверхности действующие ее значения оказались больше, что может быть объяснено проводимостью излучения антенны, вклад которой в общую проводимость

антенны при малых потерях подстилающей поверхности становится существенным.

При апробации модели на слоистой почве результаты измерений глубинного профиля КДП почвы хорошо коррелируют с данными о ее влажности (с ростом влажности возрастает как ее удельная проводимость, так и значение действительной части КДП). Измеренное значение действующего значения удельной проводимости оказалось меньше результата моделирования почти в два раза (6 мСм/м против 12,1 мСм/м) даже для верхнего слоя. Столь большое отклонение от модели можно объяснить наличием воздушного слоя между антенной и почвой за счет естественных неровностей почвы. Также следует отметить отсутствие данных для регрессии в этом диапазоне удельной проводимости подстилающей поверхности (ниже 20 мСм/м и выше 1 мСм/м) и необходимость уточнения модели в этом диапазоне проводимостей.

Полученные данные по действительной части действующего значения КДП при апробации на почве, несмотря на упомянутые недостатки модели в части удельной проводимости, с относительным отклонением не более 20 % совпадают количественно и повторяют качественно частотную зависимость измеренного спектра КДП верхнего слоя почвы.

Апробация модели проведена на слоистой среде, что существенно отличает модель от реальных условий. Также не удалось получить информацию о более точной структуре верхнего слоя почвы, возможно, он также имеет слоистую структуру, и отклонения модели по удельной проводимости вызваны присутствием более сухих и имеющих меньшую проводимость верхних «суб-слоев».

Полученные действующие значения действительной части КДП с помощью регрессионной модели отличаются от известных аналитических представлений [10,11] не более чем на 10 % (относительное отклонение). При этом результаты измерения оказались несколько ближе к данным регрессионной модели (20 % относительного отклонения для модели, против 25 % для известного аналитического выражения).

Заключение

Получена регрессионная модель для действующих на приземную антенну значений КДП почвы. Проведена ее экспериментальная апробация и сравнение с известным аналитическим выражением. Результаты моделирования и аналитического определения действующих значений действительной части КДП практически совпали.

Отмечены расхождения результатов эксперимента и моделирования в части определения действующих значений удельной проводимости почвы. Повышение точности модели требует дальнейших исследований.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Омской области в рамках гранта РНФ № 26-12-20019

Литература

1. Перфилов О. Ю., Антропов Д. А. Перспективные конструкции приграничных пластинчатых антенн //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – №. 2. – С. 150-158.
2. Одсурэн Бухцоож. Анализ характеристик антенной системы георадара / Одсурэн Бухцоож // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2009. – № 1. – С. 63-69.
3. Tran A. P., André F. and Lambot S. Validation of Near-Field Ground-Penetrating Radar Modeling Using Full-Wave Inversion for Soil Moisture Estimation// in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, no. 9, pp. 5483-5497, Sept. 2014, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2289952>
4. Derald G. Smith, Harry M. Jol, Ground penetrating radar: antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments//Journal of Applied Geophysics, Volume 33, Issues 1–3, 1995, Pages 93-100, ISSN 0926-9851, [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90032-2](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90032-2)

5. Lestari A. A., Yarovoy A. G. and Ligthart L. P. Ground influence on the input impedance of transient dipole and bow-tie antennas// in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 52, no. 8, pp. 1970-1975, Aug. 2004, <https://doi.org/10.1109/TAP.2004.832371>
6. Lestari A. A., Yarovoy A. G., Ligthart L. P. Input impedance of transient wire antennas over an imperfect conducting ground //Proc. 2001 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory. – 2001.
7. Lestari A. A., Yarovoy A. G., Ligthart L. P. Characterization of transient bow-tie antennas for ground-penetrating radar // Proceedings Volume 4758, Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar; (2002) <https://doi.org/10.1117/12.462193>
8. Lestari A. A., Wahyu Y., Yarovoy A. G. and Ligthart L. P. Dielectric Permittivity Measurement Based on Input Impedance Variations// 2007 Asia-Pacific Microwave Conference, Bangkok, Thailand, 2007, pp. 1-4, <https://doi.org/10.1109/APMC.2007.4555092>
9. RECOMMENDATION ITU-R P.832-2 WORLD ATLAS OF GROUND CONDUCTIVITIES.
10. Лавров Г.А., Князев А.С. Приземные и подземные антенны. М.: Сов. радио, 1965. С. 293.
11. Coleman, B. L. (1950). XXIII. Propagation of electromagnetic disturbances along a thin Wire, in a horizontally stratified medium. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 41(314), 276–288. <https://doi.org/10.1080/14786445008521797>
12. Костычев Ю.А., Яценко А.С., Кривальцевич С.В., Варнаков С.А. Экспериментальное исследование характеристик распространения электромагнитной волны вдоль проводников приземных излучателей декаметрового диапазона длин волн // Радиотехника и электроника. – 2025. – Т. 70, № 2. – С. 141-147. – <https://doi.org/10.7868/s3034590125020044>
13. Рамзей В. Частотно независимые антенны. – 1968, С.44.

14. Патент № 2859543 С1 Российская Федерация, МПК G01R 27/22. Способ емкостных измерений комплексной диэлектрической проницаемости материала : заявл. 26.05.2025 : опубл. 06.04.2026 / Ю. А. Костычов, С. В. Кривальцевич ; заявитель Омский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук.
15. Бобров П. П., Костычов 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. – <https://doi.org/10.17223/00213411/67/6/11>.
16. Bobrov P.P., Kostychov Yu.A., Krivaltsevich S.V. and 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. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03243-9>
17. Stogryn A. Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 19, no. 8, pp. 733-736, Aug. 1971, <https://doi.org/10.1109/TMTT.1971.1127617>
18. Glybovski S.B., Akimov V.P. and Zalipaev V.V. Electromagnetic wave propagation along a thin wire over an arbitrary isotropic interface // 2015 Days on Diffraction (DD), St. Petersburg, Russia, 2015, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/DD.2015.7354843>

Для цитирования:

Костычов Ю.А., Майненгер К.А., Кривальцевич С.В. Экспериментальное исследование действующих на приземные пластинчатые антенны значений комплексной диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.8.14>