

УДК 537.86.029

***АНАЛИЗ УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ОТРАЖЕНИЯ ПЛОСКОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ  
РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ВЛАЖНОЙ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛИ КОМПЛЕКСНОЙ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ***

***Панин Д.Н.***

*к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой Теоретических основ радиотехники и  
связи,*

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и  
информатики,*

*Самара, Россия*

***Ломзаков А.А.***

*магистрант,*

*Поволжский государственный университет телекоммуникаций и  
информатики,*

*Самара, Россия*

**Аннотация**

В данной статье представлен расчет угловых характеристик модулей коэффициентов отражения плоской электромагнитной волны линейной поляризации от поверхности различных типов влажной почвы, включая илистую глину, илистый суглинок, суглинок и песчаный суглинок. Исследование направлено на анализ зависимости отражательных свойств от угла падения волны. Результаты показали, что при изменении угла падения наименьший уровень отражения наблюдается для илистой глины, в то время как остальные виды почв демонстрируют схожие значения коэффициентов отражения. Полученные данные имеют практическое значение для задач дистанционного

зондирования поверхности Земли, позволяя более точно определять содержание влаги в корнеобитаемом слое почвы. Данная работа способствует углублению понимания взаимодействия электромагнитных волн с различными типами почв и может быть полезна для специалистов в области геофизики и экологии.

**Ключевые слова:** коэффициент отражения, электромагнитная волна, линейная поляризация, влажность почвы, дистанционное зондирование, угловые характеристики, диэлектрическая проницаемость.

***ANALYSIS OF THE ANGULAR CHARACTERISTICS OF THE REFLECTION  
COEFFICIENTS OF A PLANE ELECTROMAGNETIC WAVE FROM  
VARIOUS TYPES OF MOIST SOIL USING A FOUR-COMPONENT MODEL  
OF COMPLEX DIELECTRIC PERMITTIVITY***

***Panin D.N.***

*PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Radio Engineering and Communication, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.*

***Lomzakov A.A.***

*Undergraduate, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia.*

**Abstract**

This article presents the calculation of the angular characteristics of the modules of the reflection coefficients of a plane electromagnetic wave of linear polarization from the surface of various types of moist soil, including silty clay, silty loam, loam and sandy loam. The study is aimed at analyzing the dependence of the reflective properties on the angle of incidence of the wave. The results showed that when the angle of incidence

changes, the lowest level of reflection is observed for silty clay, while other types of soils show similar values of reflection coefficients. The data obtained are of practical importance for the tasks of remote sensing of the Earth's surface, allowing for more accurate determination of the moisture content in the root layer of the soil. This work contributes to a deeper understanding of the interaction of electromagnetic waves with various types of soils and may be useful for specialists in the field of geophysics and ecology.

**Keywords:** reflection coefficient, electromagnetic wave, linear polarization, soil moisture, remote sensing, angular characteristics, dielectric constant.

В последние десятилетия наблюдается растущий интерес к изучению взаимодействия электромагнитных волн с различными природными средами, включая влажную почву. Это связано с развитием технологий дистанционного зондирования, которые находят широкое применение в сельском хозяйстве, экологии, геологии и других областях [1-4]. Понимание того, как электромагнитные волны отражаются от поверхности и проникают в почву, может предоставить ценную информацию о её физических и химических свойствах [5]. Влажная почва представляет собой сложную многокомпонентную систему, состоящую из твердых частиц (минералов и органических веществ), воды и воздуха. Содержание влаги в почве является одним из ключевых факторов, влияющих на её электродинамические свойства. Вода имеет высокую диэлектрическую проницаемость по сравнению с твердыми частицами почвы, что приводит к значительным изменениям в коэффициентах отражения и поглощения электромагнитных волн. Эти изменения могут быть использованы для оценки содержания влаги в почве и мониторинга её состояния.

В данной статье рассматривается электродинамическая задача взаимодействия линейно поляризованной электромагнитной волны с влажной почвой (рис. 1).

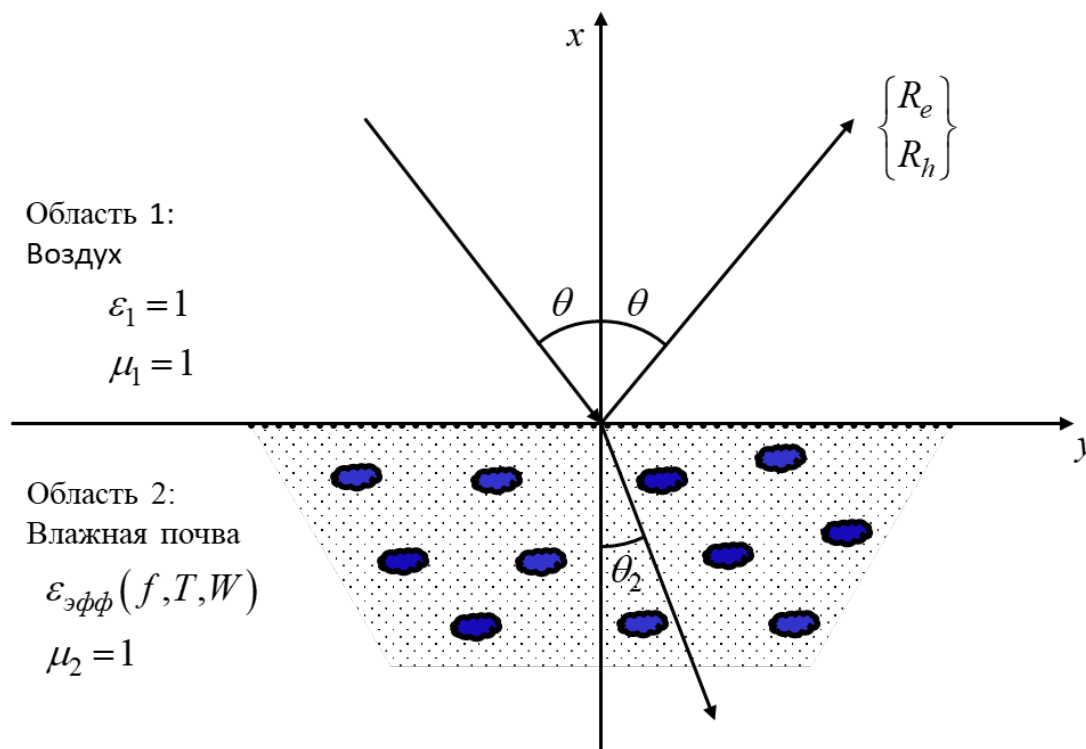


Рис. 1 – Геометрия задачи (рис. автора)

Как показано на рисунке, когда электромагнитная волна падает на поверхность влажной почвы под углом  $\theta$ , часть волны проникает в почву, а другая часть отражается обратно [6]. Комплексные коэффициенты отражения для случая горизонтальной  $R_e$  и вертикальной  $R_h$  поляризации определяются с использованием известных формул Френеля, которые учитывают эффективную комплексную диэлектрическую проницаемость влажной почвы  $\varepsilon_{эфф}$  [7].

$$R_e = \frac{\cos \theta - \sqrt{\varepsilon_{эфф}(f, T, W) - \sin^2(\theta)}}{\cos \theta + \sqrt{\varepsilon_{эфф}(f, T, W) - \sin^2(\theta)}}, \quad (1)$$

$$R_h = \frac{\varepsilon_{эфф}(f, T, W) \cos \theta - \sqrt{\varepsilon_{эфф}(f, T, W) - \sin^2(\theta)}}{\varepsilon_{эфф}(f, T, W) \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_{эфф}(f, T, W) - \sin^2(\theta)}}. \quad (2)$$

В общем случае выражение для комплексной диэлектрической проницаемости влажной почвы  $\varepsilon_{эфф}$  зависит от множества параметров, таких как влажность  $W$ , температура  $T$ , состав почвы и частота внешнего зондирующего излучения  $f$  и подробно описано в [8]. Эти факторы значительно влияют на отражательные свойства почвы и, следовательно, могут использоваться в приложениях дистанционного зондирования. Цель данного исследования — рассчитать модули коэффициентов отражения электромагнитной волны линейной поляризации от различных видов почвы в зависимости от угла падения при фиксированных значениях влажности, температуры и частоты зондирующего излучения.

Расчет угловых зависимостей модулей коэффициентов отражения был выполнен на основе четырехкомпонентной модели влажной почвы [9], рекомендованной в документации МСЭ-R P.527-4 [10]. В рамках данного исследования были рассчитаны угловые характеристики модулей коэффициентов отражения для волн горизонтальной и вертикальной поляризации, отражающихся от различных типов влажной почвы, включая илестую глину, илестый суглинок, суглинок и песчаный суглинок.

Все расчеты были выполнены при следующих исходных условиях: влажность почвы составила 10%, частота электромагнитной волны — 50 МГц, а температура почвы — 23 градуса по Цельсию. На рис. 2 представлены угловые зависимости модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны горизонтальной поляризации для различных типов почвы: илестая глина (сплошная линия), илестый суглинок (пунктирная линия), суглинок (точечная линия) и песчаный суглинок (штрихпунктирная линия). На основе представленных данных можно сделать следующий вывод: илестая глина вносит наименьший уровень отражения электромагнитной волны по сравнению с другими типами почвы, что может свидетельствовать о её более высокой способности поглощать электромагнитные волны. Это свойство может быть

полезно при проведении исследований в области геофизики и экологии, а также при разработке технологий, связанных с использованием электромагнитного излучения для анализа состояния почвы. В то же время, для остальных типов почвы уровень отражения остается стабильным при изменении угла падения.

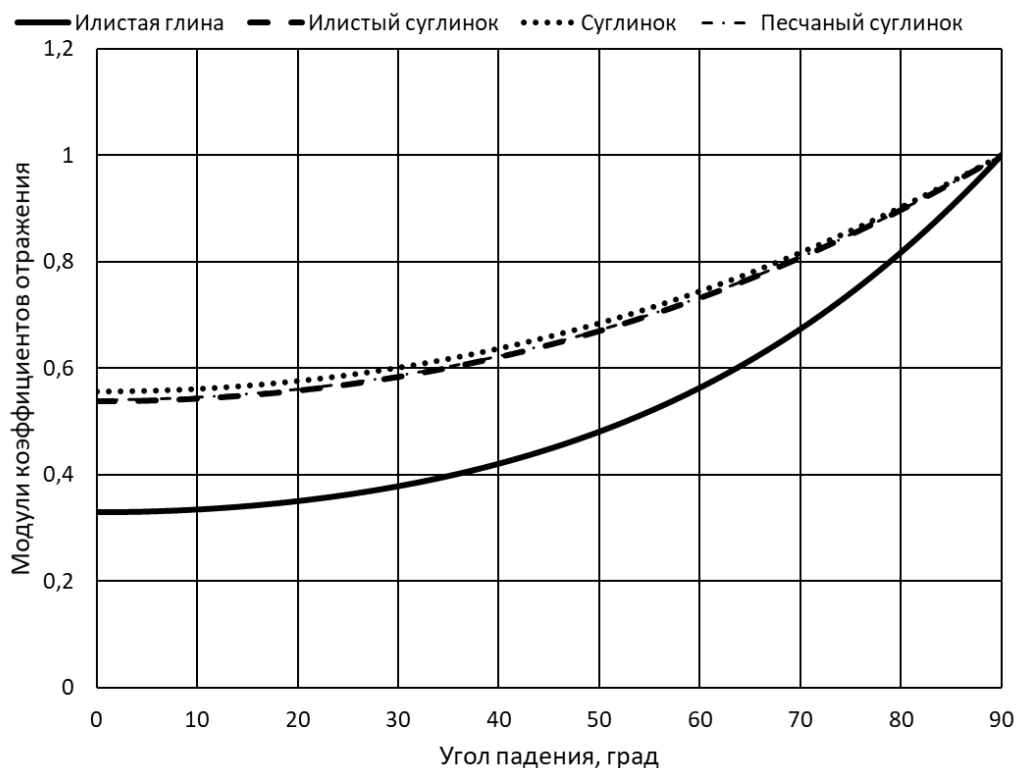


Рис. 2 – Угловые зависимости модулей коэффициентов отражения волны горизонтальной поляризации для различных видов почв (рис. автора)

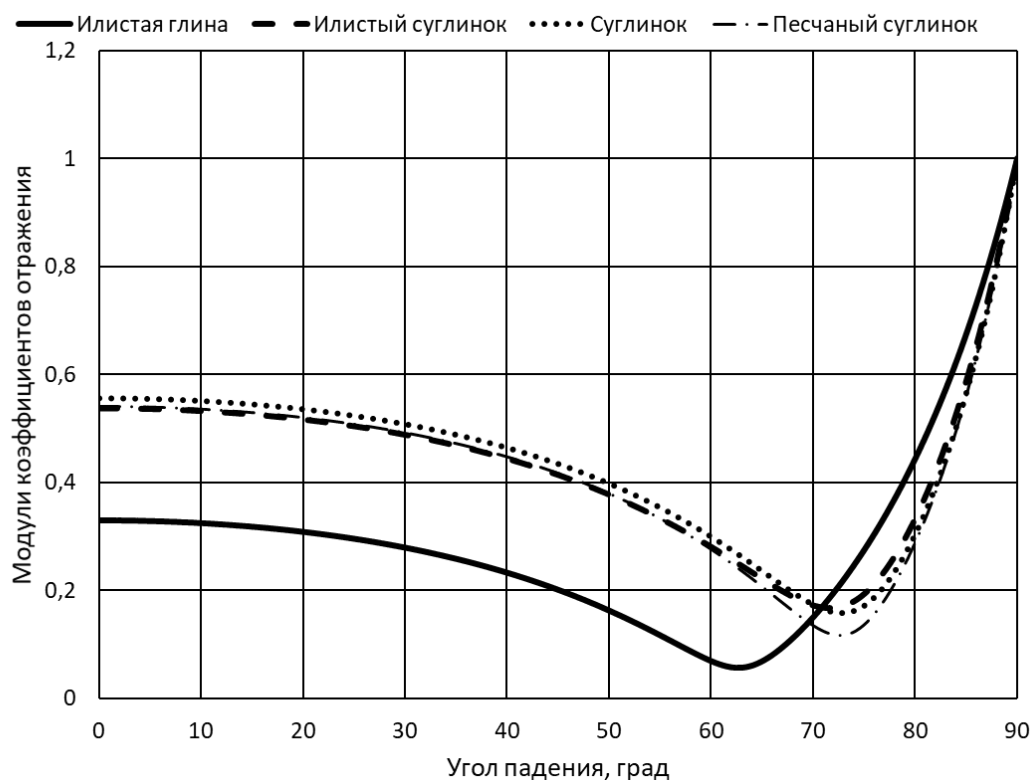


Рис. 3 – Угловые зависимости модулей коэффициентов отражения волны вертикальной поляризации для различных видов почв (рис. автора)

На рис. 3 представлены угловые зависимости модулей коэффициентов отражения электромагнитной волны вертикальной поляризации для различных типов почвы: илистая глина (сплошная линия), илистый суглинок (пунктирная линия), суглинок (точечная линия) и песчаный суглинок (штрихпунктирная линия). Здесь следует заметить тот факт, что при углах падения до 70 градусов уровень отражения, вносимый илистой глиной также, как и в случае горизонтальной поляризации низкий, однако, при больших значениях угла падения мы наблюдаем что уровень отражения выше относительно отражений, вносимых другими видами почв. Кроме того, значения угла при котором модуль коэффициент отражения достигает минимального значения (явление Брюстера) для илистой глины 64 градуса, а для остальных видов почв одинаковый и составляет 73 градуса.

В заключение можно отметить, что исследование угловых зависимостей коэффициентов отражения электромагнитных волн от различных типов почвы

Дневник науки | [www.dnevniknauki.ru](http://www.dnevniknauki.ru) | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

предоставляет ценные данные для глубокого понимания их физических свойств. Полученные результаты могут быть использованы для разработки более эффективных технологий дистанционного зондирования, а также для оптимизации сельскохозяйственных практик и экологического мониторинга. Данная работа открывает новые перспективы для дальнейших исследований в области взаимодействия электромагнитных волн с почвой, что может способствовать улучшению методов анализа и управления земельными ресурсами.

### **Библиографический список:**

1. Li Z. L. et al. Soil moisture retrieval from remote sensing measurements: Current knowledge and directions for the future // *Earth-Science Reviews*. – 2021. – Т. 218. – С. 103673.
2. Sadri S. et al. A global near-real-time soil moisture index monitor for food security using integrated SMOS and SMAP // *Remote Sensing of Environment*. – 2020. – Т. 246. – С. 111864.
3. Chen N. et al. Surface soil moisture estimation at high spatial resolution by fusing synthetic aperture radar and optical remote sensing data // *Journal of Applied Remote Sensing*. – 2020. – Т. 14. – №. 2. – С. 024508-024508.
4. Wang J. et al. Saline soil moisture mapping using Sentinel-1A synthetic aperture radar data and machine learning algorithms in humid region of China's east coast // *Catena*. – 2022. – Т. 213. – С. 106189.
5. Панин, Д. Н. Интеллектуальные системы прогнозирования влажности почвы на основе анализа данных дистанционного зондирования / Д. Н. Панин, Ю. С. Мамошина // VI научный форум телекоммуникации: теория и технологии ТТТ-2023: материалы XX Международной научно-технической конференции, Казань, 22–24 ноября 2023 года. – Казань: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», 2023. – С. 14-15.



6. Панин, Д. Н. Угловые характеристики модуля коэффициента отражения электромагнитной волны линейной поляризации от влажной почвы с учётом гетерогенности и дисперсии / Д. Н. Панин, Ю. С. Мамошина, А. А. Ломзаков // Актуальные проблемы информатики, радиотехники и связи: Материалы XXXI Российской научно-технической конференции, Самара, 01–02 февраля 2024 года. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2024. – С. 19-21.
7. Панин, Д. Н. Расчёт уровней отражения электромагнитного излучения от влажной почвы с учётом шероховатости поверхности на основе гетерогенных моделей / Д. Н. Панин, К. О. Безлюдников // XXIX Российская научно-техническая конференция: Материалы XXIX Российской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов университета с приглашением ведущих ученых и специалистов родственных вузов и организаций, Самара, 22–25 марта 2022 года. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2022. – С. 16-17.
8. Панин, Д. Н. Моделирование отражения электромагнитной волны от влажной почвы с учетом дисперсии, гетерогенности и шероховатости поверхности / Д. Н. Панин, О. В. Осипов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 30-37. – DOI 10.18469/1810-3189.2024.27.2.30-37.
9. Панин, Д. Н. Сравнение численных расчётов отражений электромагнитных волн от влажной почвы на основе четырёхкомпонентной и гетерогенных моделей / Д. Н. Панин, Ю. С. Мамошина // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях: Материалы XXIV Международной научно-технической конференции и материалы XX Международной научно-технической конференции. В 2-х томах, Уфа, 23–25 ноября 2022 года. Том I. – Уфа: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», 2023. – С. 185-186.
10. Матвеев, И. В. Исследование отражения электромагнитных волн от слоя почвы на основе рекомендаций МСЭ-R P.527-4 / И. В. Матвеев, Д. Н. Панин

// XXIX Российская научно-техническая конференция: Материалы XXIX Российской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов университета с приглашением ведущих ученых и специалистов родственных вузов и организаций, Самара, 22–25 марта 2022 года. – Самара: Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2022. – С. 169.

*Оригинальность 77%*