



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.7>

УДК: 621.317.335.3

**ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛАЖНЫХ ПОЧВ  
ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ  
В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 3 МГц – 1 ГГц**

**А.С. Ященко, С.А. Варнаков, С.В. Кривальцевич**

**Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)  
644024, Омск, пр. Карла Маркса, 15**

Статья поступила в редакцию 22 октября 2024 г.

**Аннотация.** Приведено описание диэлектрической модели влажных почв, входными параметрами которой являются частота, объемная влажность и содержание физической глины. Модель была разработана на основании статистического анализа экспериментальных данных для пяти почвенных образцов степной и лесостепной климатических зон в пределах территории юга Западной Сибири, отличающихся гранулометрическим составом. Проведено сравнение диэлектрических данных, полученных эмпирически и рассчитанных по модели для одного типа почв. Полученные результаты найдут применение при оценке радиофизических характеристик подстилающей поверхности в диапазоне частот от 3 МГц до 1 ГГц.

**Ключевые слова:** комплексная диэлектрическая проницаемость, подстилающая поверхность.

**Финансирование:** Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

**Автор для переписки:** Ященко Александр Сергеевич, [x\\_rays1@mail.ru](mailto:x_rays1@mail.ru)

## Введение

Решение ряда прикладных задач электродинамики требует привлечения данных о диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности; участка суши или водоема, с которым взаимодействуют электромагнитные волны в процессе их излучения и распространения. В данной работе под термином «подстилающая поверхность» будет пониматься поверхностный слой почв или грунтов с толщиной сопоставимой со скин-слоем. При наличии данных о комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) подстилающей поверхности удастся определить поглощательные и отражательные характеристики тех или иных участков поверхности Земли, рассчитать уровень напряженности поля земной волны на известном расстоянии от источника, оценить направленные характеристики приземных излучателей и т.д. Стоит отметить, что для обширных участков поверхности суши характерны как периодические сезонные изменения состояния, обусловленные процессами замерзания и оттаивания, так и случайные непериодические, связанные с выпадением осадков. В связи с этим возникает необходимость мониторинга состояния почв и грунтов для оценки текущего значения КДП подстилающей поверхности. Методика измерения КДП подстилающей поверхности в полевых условиях не отличается сложностью, но требует привлечения дорогостоящего оборудования для получения данных с приемлемой точностью. Это определяет важность наличия модели, позволяющей производить оценку значений КДП почвы по ее известным нерадиофизическим характеристикам, например: влажности, температуры, гранулометрического состава и т.д.

Известные на данный момент радиофизические модели природных объектов можно условно разделить на два основных вида: физически обоснованные и корреляционные. Первый из упомянутых видов базируется на априори известных зависимостях, обусловленных физическими законами и формализованными в виде математических выражений. В силу сложности строения объектов окружающей среды возникает необходимость введения в относительно простые математические выражения, использующиеся для

описания модели, поправочных коэффициентов. При разработке корреляционных моделей математические выражения, устанавливающие взаимосвязь между интересующей радиофизической величиной и характеристиками объекта, получают в результате статистического анализа экспериментальных данных. Выбор вида аппроксимационной функции, связывающей интересующую радиофизическую величину и характеристики объекта, обусловлен исключительно значением коэффициента корреляции. Стоит отметить, что значения коэффициентов аппроксимирующей функции не несут физического смысла.

Большая часть из известных на данный момент моделей позиционируются как физически обоснованные. В результате проведенных лабораторных исследований был разработан ряд диэлектрических моделей влажных почв, среди которых наибольшее распространение получила модель Добсона [1]. В основу модели были положены данные о КДП почв, относящихся к умеренной климатической зоне Северной Америки. Международный союз электросвязи рекомендует использовать эту модель для оценки диэлектрических характеристик почв и грунтов [2]. Коллективом Института физики имени Л.В. Киренского разработана физически обоснованная диэлектрическая рефракционная модель влажных почв, справедливая в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн [3]. Известны версии модели для почв умеренной климатической зоны и органических почв Арктики. С физической точки зрения обе модели являются смесевыми. Почва рассматривается как смесь воздуха, твердой компоненты, связанной воды (удерживаемой почвенными частицами на своей поверхности) и свободной воды (свободно перемещающейся между частицами). Существенным недостатком этих моделей является отсутствие достоверных данных о радиофизических свойствах связанной воды. В модели Добсона КДП связанной воды принимается равной КДП льда, а в модели Института физики определяется из экспериментальных данных о диэлектрической проницаемости почв. Обе модели определяют КДП на определенной частоте через известное содержание физической глины в почве

(частиц с размерами меньше 0,01 мм в отечественной классификации и менее 0,02 мм в зарубежной), объемной влажности и плотности сухой почвы. Коэффициенты при математических выражениях, описывающие модели Добсона и Института физики соответственно, определялись в ходе статистического анализа экспериментальных данных, что свидетельствует о частичной принадлежности указанных моделей к корреляционному виду.

При создании диэлектрической модели влажных почв, применимой для решения прикладных задач электродинамики распространения радиоволн в региональном масштабе, имеет смысл использовать исключительно статистический подход. Это позволит отказаться от обоснования значений коэффициентов в функции, описывающей взаимосвязь КДП смеси с характеристиками ее компонент. Целью работы являлось обобщение и анализ полученных ранее экспериментальных данных о КДП образцов почв, отобранных в пределах юга Западной Сибири, для создания корреляционной диэлектрической модели валидной в пределах региона.

## **1. Методика проведения эксперимента**

Измерения КДП образцов почв осуществлялись с помощью методики, разработанной сотрудниками Лаборатории диэлькометрии и петрофизики ОмГПУ [4] на базе совместной Лаборатории Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН и Омского НИИ приборостроения. В процессе измерений образец находился в одной ячейке, представляющей собой отрезок коаксиальной линии. В диапазоне частот 3 МГц – 100 МГц ячейка включается в разрыв центрального проводника отрезка линии большего сечения, а частотах выше 100 МГц как отрезок коаксиальной линии. Значения КДП восстанавливались из значений S-параметров матрицы рассеяния (комплексного коэффициента передачи и отражения). Данный способ измерения КДП в одной ячейке обеспечивает низкую погрешностью во всем частотном диапазоне, на котором проводились измерения. Схематическое изображение экспериментальной установки приведено на рисунке 1.

## Измерение комплексного коэффициента передачи

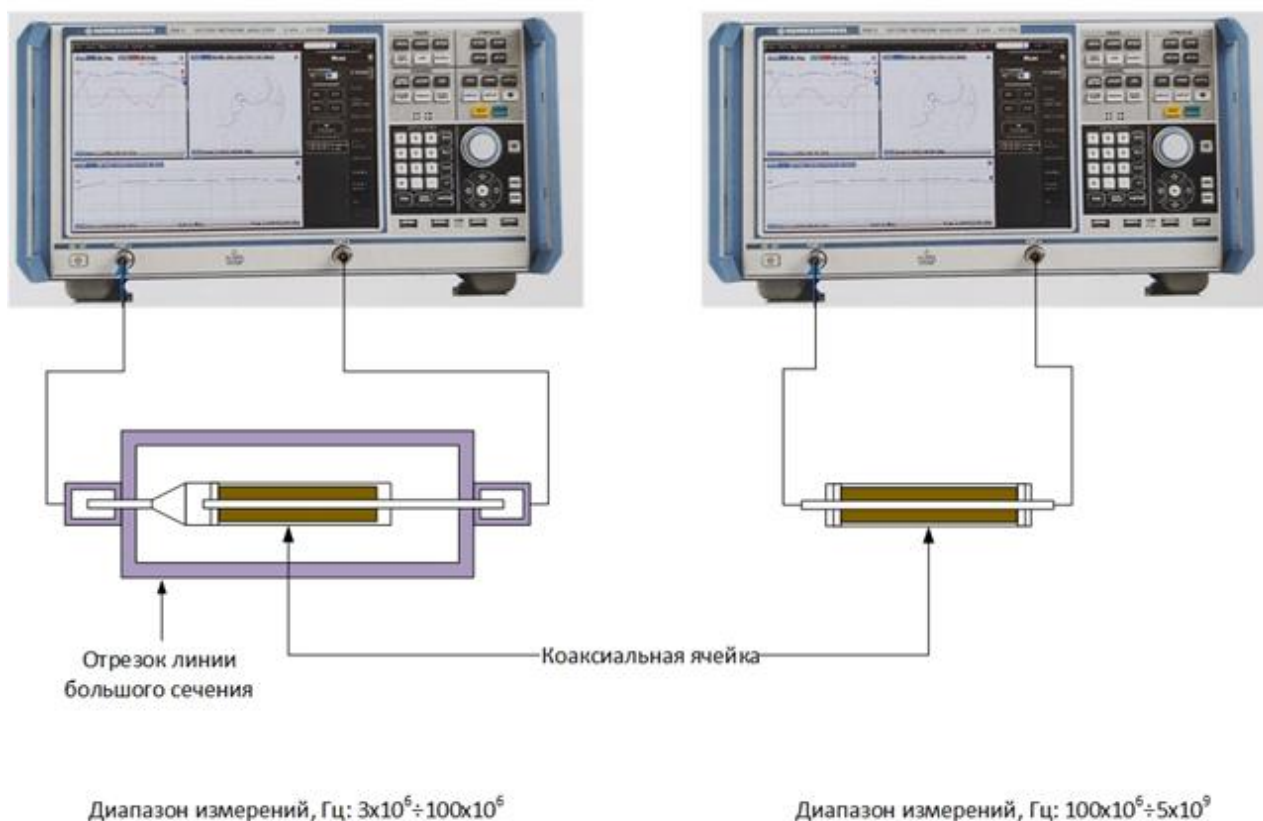


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки для определения частотной зависимости КДП образца.

Согласно данным, приведенным в [4], погрешность измерений действительной и мнимой частей КДП с использованием векторного анализатора цепей определяется влажностью образца, его гидрофизическими характеристиками и длиной коаксиальной линии, в которой он находится. Наибольшее значение относительной погрешности не превышает 6% как для действительной, так и для мнимой частей КДП, что наблюдается при измерении КДП очень влажного образца в относительно длинной ячейке. При правильном выборе длины ячейки для образца с определенной влажностью относительная погрешность не превышает 2,5%.

В процессе создания модели проводился анализ данных о диэлектрической проницаемости пяти образцов почв, отобранных в пределах территории центральной и южной части Омской области. Согласно результатам лабораторных исследований, проведенных в Центре агрохимической службы «Омский», образцы отличались по гранулометрическому составу и имели низкое

содержание солей (см. таблицу 1). Принадлежность почв к тому или иному типу осуществлялась согласно классификации предложенной Качинским Н.А. [5] для случая степного почвообразования.

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов.

№ образца	Содержание физической глины, %	Тип почвы	Содержание солей, %	Состояние
1	34,1	Суглинок средний	0,237	Не засоленная
2	26,1	Суглинок легкий	0,076	Не засоленная
3	5<	Песок рыхлый	≈0	Не засоленная
4	31,8	Суглинок средний	0,075	Не засоленная
5	29,6	Суглинок легкий/средний	0,107	Не засоленная

С образцами почв выполнялись необходимые подготовительные процедуры. Крупные включения (части растений, гравий и др.) из образца почвы удаляли. После образец смачивался до очень высокой влажности (более  $0,5 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ) деионизированной водой. Это исключало возможность изменения солевого состава образца почвы. Изменение влажности образца происходило в процессе естественного испарения. Объемная влажность пробы определялась термостатно-весовым методом. Данный метод предполагает определение объемной влажности образца по значениям массы почвы во влажном и сухом состоянии. Сухим считался образец, находившийся в сушильном шкафу не менее 5 часов при температуре  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ . Значение влажности определялось как отношение массы испарившейся воды к массе известного объема образца.

Перед измерением образец почвы при текущей влажности вносили внутрь коаксиальной ячейки и выдерживали в ней в течение суток. В дальнейшем выполнялись измерения параметров матрицы рассеяния (S-параметры) коаксиальной ячейки с образцом. Определение значений КДП осуществлялось в процессе минимизации функции невязки между значениями S-параметров определенными экспериментально и рассчитанными теоретически.

## 2. Результаты и обсуждение

Отличия в гранулометрическом составе образцов почв проявилось в общем виде диэлектрических спектров (см. рисунок 2).

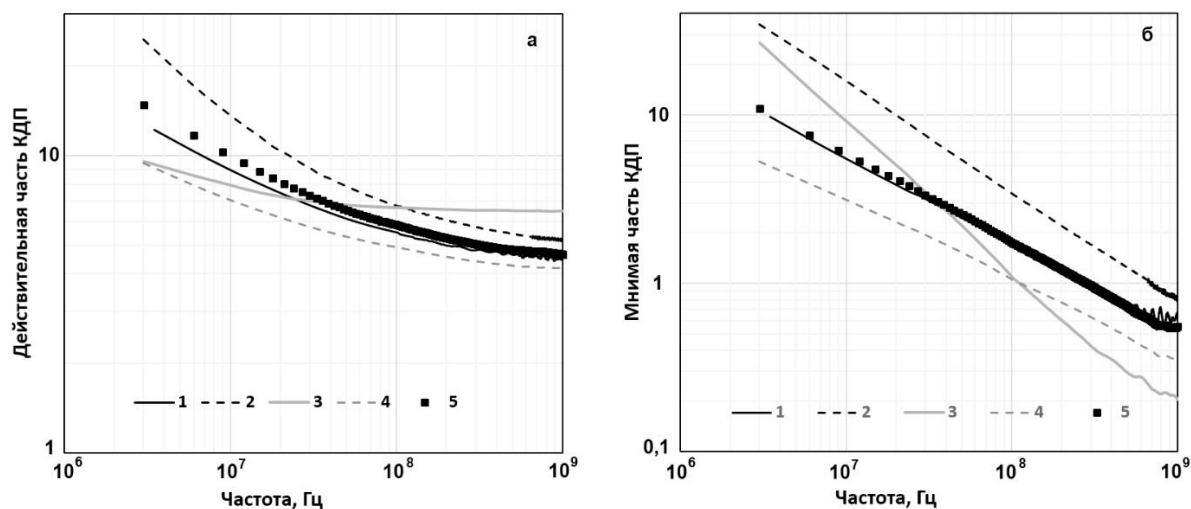


Рис. 2. Диэлектрические спектры действительной (а) и мнимой (б) части КДП образцов, характеристики которых приведены в таблице 1. Объемная влажность 10%.

Как общую тенденцию можно отметить уменьшение действительной части КДП с увеличением количества физической глины на частотах больших 100 МГц. Более подробное описание вида диэлектрических спектров, а также механизмов, определяющих частотную зависимость КДП, без статистического анализа полученных данных, приведено в работах, опубликованных ранее [6, 7]. В данной публикации мы делаем акцент на результатах статистической обработки данных.

Исходные данные о диэлектрической проницаемости, используемые при создании модели, были представлены в виде матриц значений действительной и мнимой части КДП, строки которой соответствовали определенной частоте измерений, а столбцы – объемной влажности образца. Графическая интерпретация такого блока данных приведена на рисунке 3. На первом этапе для каждой строки матрицы определялся аппроксимационный полином второго порядка. Этот полином устанавливает взаимосвязь между диэлектрической проницаемостью и влажностью. Затем, аппроксимировались частотные зависимости коэффициентов при полиноме. На заключительном этапе устанавливалась

взаимосвязь между коэффициентами, определяющими вид функциями аппроксимации, найденными на предыдущем этапе, и содержанием физической глины.

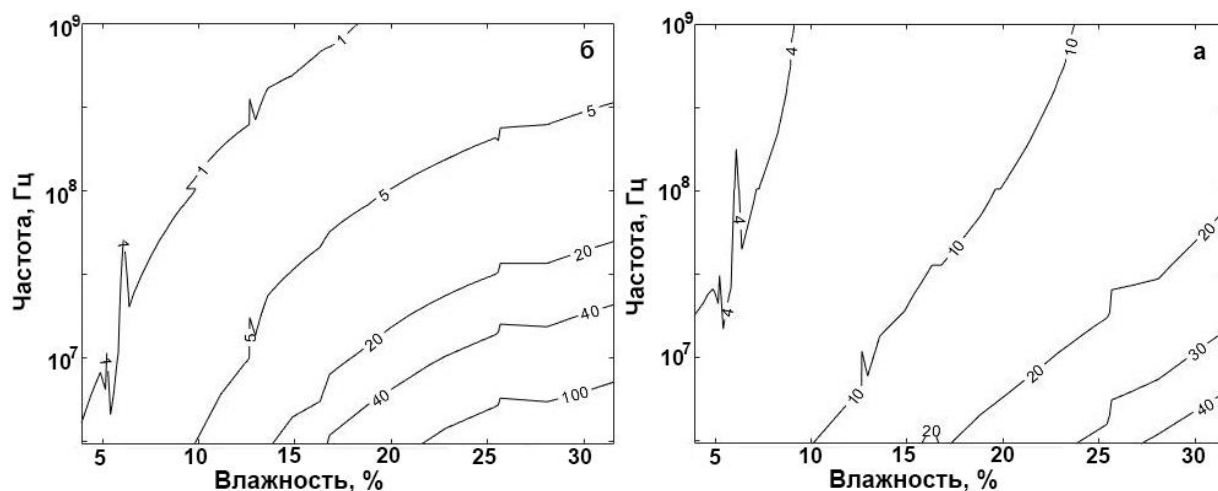


Рис. 3. Распределение значений действительной (а) и мнимой (б) частей КДП образца 4 в зависимости от частоты и влажности.

В итоге была получена функция, описывающая КДП почв как функцию трех переменных, позволяющая определить значения диэлектрической проницаемости при известных значениях объемной влажности, частоты и содержания физической глины.

$$\varepsilon' = a \cdot W^2 + b \cdot W + d \quad (1)$$

$$a = (-4 \cdot 10^{-5} \cdot C + 0,0188) \cdot f^{(-6 \cdot 10^{-4} \cdot C + 0,0596)} \quad (1.1)$$

$$b = (-7 \cdot 10^{-3} \cdot C + 1,3748) \cdot f^{(-23 \cdot 10^{-4} \cdot C - 0,3937)} \quad (1.2)$$

$$d = (-52 \cdot 10^{-4} \cdot C + 3,6177) \cdot f^{(-10^{-4} \cdot C - 0,056)} \quad (1.3)$$

$$\varepsilon'' = a \cdot W^2 + b \cdot W + d \quad (2)$$

$$a = (-0,0144 \cdot C + 1,3616) \cdot f^{(-0,001 \cdot C - 0,7998)} \quad (2.1)$$

$$b = (0,0535 \cdot C - 1,6118) \cdot f^{(-0,0128 \cdot C + 0,3886)} \quad (2.2)$$

$$d = (0,0436 \cdot C - 1,3182) \cdot f^{(-0,0096 \cdot C + 0,2898)} \quad (2.3)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $d$  – коэффициенты при аппроксимационном полиноме;  $W$  – объемная влажность, выраженная в процентах;  $f$  – частота в МГц,  $C$  – содержание физической глины в процентах. Значение констант в уравнениях (1) и (2) будут корректироваться по мере накопления данных о диэлектрической проницаемости образцов. Для оценки правдоподобия данных, полученных с



помощью модели было произведено сравнение данных о КДП полученных экспериментально и рассчитанных по формулам (1) и (2) (см. рисунок 4).

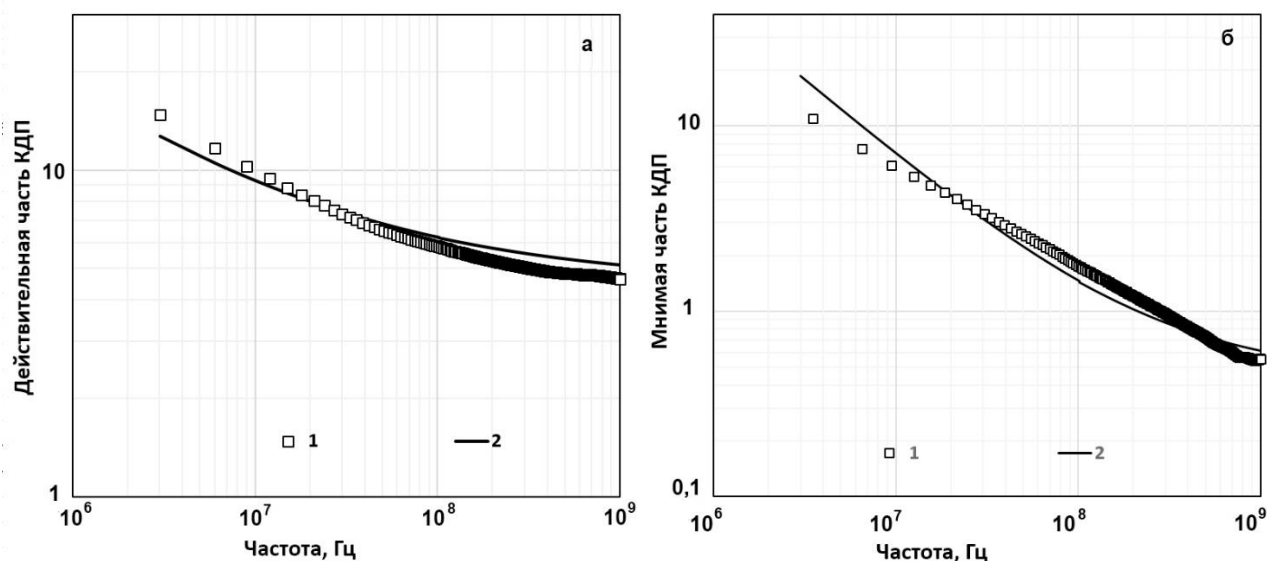


Рис. 4. Спектры действительной (а) и мнимой (б) части КДП образца 5, полученные в лабораторных условиях (1) и рассчитанные по модели (2). Объемная влажность 10%.

Как можно видеть из приведенных данных, наблюдается удовлетворительное согласование экспериментальных и модельных значений действительной и мнимой части КДП. В перспективе планируется разработать диэлектрическую модель влажных почв валидную для большего диапазона частот и не привязанную к определенному географическому региону.

## Заключение

Проведенные ранее исследования позволили накопить экспериментальный материал, который лег в основу диэлектрической модели влажных почв Омской области. Диэлектрическая модель была создана в результате статистического анализа данных и носит корреляционный характер. По мере накопления данных о диэлектрической проницаемости, полученных в лабораторных условиях, коэффициенты при найденных регрессионных уравнениях, описывающих взаимосвязь между значениями диэлектрической проницаемости, частоты, объемной влажности и содержания физической глины будут уточняться и корректироваться. В перспективе планируется разработать диэлектрическую

модель влажных почв в более широком диапазоне частот валидную для большей площади на поверхности Земли.

**Финансирование:** работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3)

### Литература

1. Peplinski N.R., Ulaby F.T., Dobson M.C. Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range //IEEE Trans Geosci. and Remote Sens. Vol. 33, No. 3. P. 803-807. 1995.
2. Electrical characteristics of the surface of the Earth. URL: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-6-202109-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.527-6-202109-I!!PDF-E.pdf) (дата доступа: 17.10.2024).
3. Mironov V.L., Bobrov P.P., Fomin S.V. Multirelaxation Generalized Refractive Mixing Dielectric Model of Moist Soils // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013. Vol. 10, No 3. P. 603–606.
4. Bobrov P.P., Repin A.V., Rodionova O.V. Wideband Frequency Domain Method of Soil Dielectric Property Measurements // IEEE Trans. Geosci. RemoteSens. 2015. Vol. 53, No. 5. P. 2366–2372.
5. Качинский Н.А. Физика почв М: Высшая школа, 1965, 318 С.
6. Варнаков С.А., Суслов К.Н., Яценко А.С., Кривальцевич С.В. Диэлектрические характеристики образцов почв Арктики и юга Западной Сибири // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 8. С. 37-44.
7. Варнаков С.А., Яценко А.С., Кривальцевич С.В., Никифорова А.О. Влияние гранулометрического состава и солености на вид диэлектрических спектров грунтов // Журнал радиоэлектроники. 2023. № 11.

#### Для цитирования:

Яценко А.С., Варнаков С.А., Кривальцевич С.В. Диэлектрическая модель влажных почв для территории юга Западной Сибири в диапазоне частот 3 МГц – 1 ГГц // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.7>