



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.15>

УДК: 621.317.335.3

## ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И СОЛЁНОСТИ НА ВИД ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ГРУНТОВ

Варнаков С.А., Яценко А.С., Кривальцевич С.В., Никифорова А.О.

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

Статья поступила в редакцию 31 августа 2023 г.

**Аннотация.** Приведены данные о диэлектрической проницаемости образцов нескольких типов почв, отличающихся гранулометрическим составом и содержанием солей. Описаны общие закономерности влияния влажности, гранулометрического состава и содержания солей на вид спектра комплексной диэлектрической проницаемости. Дана общая характеристика механизмов, определяющих диэлектрические характеристики исследуемых образцов. Полученные зависимости могут найти применение при оценке радиофизических характеристик подстилающей поверхности при решении прикладных задач радиофизики излучения и распространения радиоволн.

**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:** Варнаков Сергей Александрович,  
[sergvarnakov@yandex.ru](mailto:sergvarnakov@yandex.ru)

## Введение

На данный момент можно утверждать, что общие вопросы теории взаимодействия электромагнитных волн с однородными диэлектриками рассмотрены на уровне достаточном для решения ряда прикладных задач распространения радиоволн. При наличии данных о комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) подстилающей поверхности представляется возможным: определить поглощательные и отражательные характеристики тех или иных участков материковой части Земли, оценить направленные и импедансные характеристики приземных излучателей, восстановить значения влажности поверхностного слоя почв по данным спутниковых радиометров и т. д. В отдельных случаях значения диэлектрической проницаемости веществ, входящих в состав того или иного природного объекта, удаётся определить с помощью физически обоснованных моделей, разработанных в результате теоретического анализа конденсированных систем. Так, КДП пресной воды может быть определена по модели Дебая [1]. Однако, для расчёта КДП солёной воды в широком температурном диапазоне в теоретически обоснованную модель Дебая необходимо вводить поправочные коэффициенты, определяемые эмпирически. Поскольку заметная часть природных объектов представляет собой гетерогенные структуры (например, твёрдые растворы и сухие смеси), то есть имеют более сложное строение и состав даже по сравнению с солёной водой, теория диэлектрической проницаемости подобных образований до сих пор не создана. По этой причине модели КДП веществ и структур, являющихся составными частями природных объектов, носят полуэмпирический характер. В основу таких моделей положены данные о КДП совокупности образцов репрезентативных для интересующего семейства объектов.

В результате проведённых ранее отечественными и зарубежными научными коллективами лабораторных исследований был разработан ряд моделей влажных почв, среди которых наибольшее распространение получила модель Добсона. В основу модели были положены данные о КДП почв,

относящихся к умеренной климатической зоне Северной Америки. Эта модель позволяет производить оценку КДП почв по известным значениям влажности, температуры, а также гранулометрическому составу. В доработанном виде [2] данная модель до сих пор используется при обработке спутниковых радиометрических данных. Несмотря на то, что эмпирические данные, используемые при создании модели Добсона были получены на частотах, относящихся к СВЧ диапазону, Международный союз электросвязи рекомендует использовать эту модель для оценки диэлектрических характеристик почв и грунтов в гораздо более широкой полосе частот: от коротких волн до терагерцовых [3]. Кроме того, создан ряд моделей, позволяющих определить значение КДП влажных почв при определённых условиях. Так, коллективом института физики им. Л. В. Киренского разработана физически обоснованная диэлектрическая рефракционная модель влажных почв, справедливая в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн [4]. Известны версии модели для почв умеренной климатической зоны и органических почв Арктики. Научным коллективом Омского государственного педагогического университета проделана большая работа по совершенствованию методов измерения диэлектрической проницаемости в диапазоне частот от единиц килогерц до нескольких гигагерц [5]. Известные на момент публикации [5] методы измерения КДП позволяли определять диэлектрические характеристики материалов в существенно более узком диапазоне частот. Для получения диэлектрического спектра в диапазоне частот от единиц килогерц до нескольких гигагерц приходилось комбинировать разные методы измерения: конденсаторный на частотах не выше диапазона декаметровых волн, и волноводный на частотах не ниже ультракоротковолнового диапазона. При этом, для получения спектра КДП, не имеющего разрывов на «стыковочных» частотах (то есть на частотах, на которых каждый из используемых методов имеет приемлемую точность измерения), необходимо добиваться как можно более близкого (в идеале идентичного) состояния образцов. В этом случае отличия в значениях КДП, определёнными разными методами на «стыковочных» частотах, не превысит

погрешности измерений. Однако обеспечить равенство таких параметров как плотность и значение объёмной влажности, в процессе утрамбовки одного и того же почвенного образца в разные измерительные боксы (например, в плоский конденсатор и в отрезок коаксиальной линии) невозможно. Отличительной особенностью метода, описанного в [5], является возможность реализации разных режимов измерений (конденсаторного и волноводного) при нахождении образца в одном и том же измерительном боксе. Данные, полученные в результате лабораторных измерений КДП с помощью метода [5], позволили разработать релаксационную диэлектрическую модель влажных песчаных почв [6] справедливую в диапазоне частот от единиц килогерц до нескольких гигагерц. Однако, несмотря на определённые успехи в изучении диэлектрических дисперсных смесей, разработать универсальную модель КДП влажных почв, позволяющую рассчитать значения КДП влажных почв по известному гранулометрическому составу и содержанию жидкой воды в диапазоне от сверхнизких до крайне высоких частот, до сих пор не удалось. Этот факт свидетельствует о важности накопления эмпирических данных о КДП почв, существенно отличающихся гранулометрическим составом, в диапазоне частот от единиц килогерц до нескольких гигагерц. В дальнейшем эти данные могут быть использованы как при создании карт диэлектрической проницаемости и проводимости поверхности Земли, так и разработке перспективных универсальных полуэмпирических моделей влажных почв.

## **1. Описание методики проведения эксперимента**

Измерения КДП образцов почв осуществлялись с помощью методики, разработанной сотрудниками Лаборатории диэлькометрии и петрофизики ОмГПУ [5] на базе совместной Лаборатории Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН и Омского НИИ приборостроения. Эта методика позволяет проводить измерения КДП от сверхнизких до крайне высоких частот при нахождении образца в неизменном состоянии в одном и том же измерительном боксе. В процессе измерений образец находится в одной

ячейке, представляющей собой отрезок коаксиальной линии. Схематическое изображение экспериментальной установки приведено на рисунке 1.

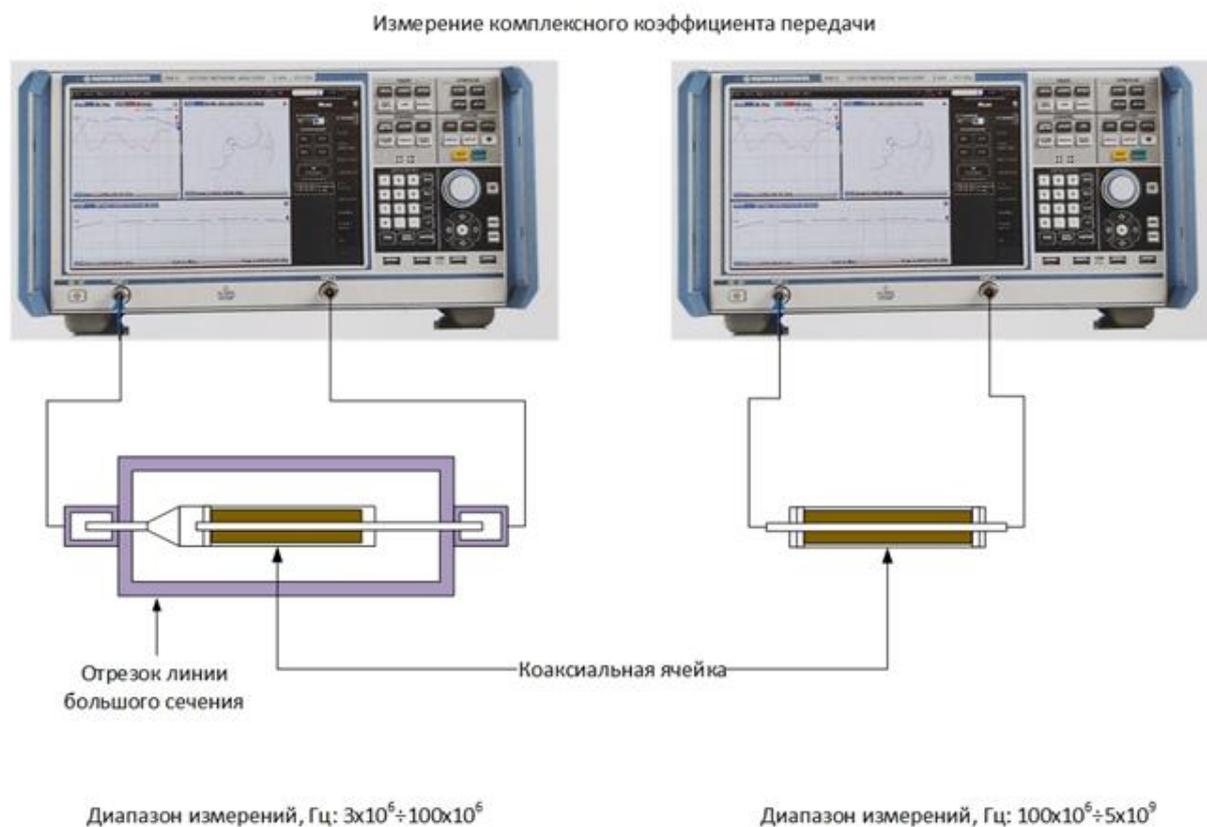


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки для определения частотной зависимости КДП образца

В данной работе анализировались данные измерений диэлектрической проницаемости почвенных образцов в диапазоне частот 5 МГц – 4 ГГц. Согласно данным, приведённым в [5], 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 определённой влажностью относительная погрешность не превышает 2,5%.

Нами были получены диэлектрические спектры четырёх образцов, отобранных в южной части Омской области: суглинистой почвы, отобранной в

пределах горизонтов 0–10 см (образец №1) и 40–50 см (образец №2); засоленного суглинка (образец №3) и песчаной почвы (образец №4). Отбор образцов осуществлялся: суглинистой почвы – в северо-восточной части Омского района Омской области, засоленного суглинка – в котловине озера Эбейты, песчаной почвы – в пойме р. Иртыш. Согласно данным, приведённым в [7], образцы соответствовали: суглинистая почва – выщелоченному чернозёму, засоленный суглинок – солончаку луговому.

Перед измерением с образцом почвы 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 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>) 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.

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 определёнными экспериментально и рассчитанными теоретически для коаксиальной линии. Минимизация осуществлялась в процессе подбора таких значений КДП, при которых значения теоретически рассчитанных S-параметров для коаксиальной линии, включающей образец и две фиксирующие фторопластовые шайбы, не отличалось от измеренных экспериментально в пределах погрешности.

## **2. Результаты и обсуждение**

В результате проведённых измерений были полученные данные о КДП почв и проведён расчёт некоторых радиофизических характеристик подстилающей поверхности. На рисунках 2–4 приведены данные о КДП и

радиофизических характеристиках, соответствующих объёмной влажности образцов  $30 \pm 1,5\%$ . Указанное значение близко к предельной полевой влагоёмкости суглинка – максимальному удельному объёму влаги, которое может быть удержано в почве капиллярно-сорбционными силами после стекания жидкой воды под действием сил гравитации.

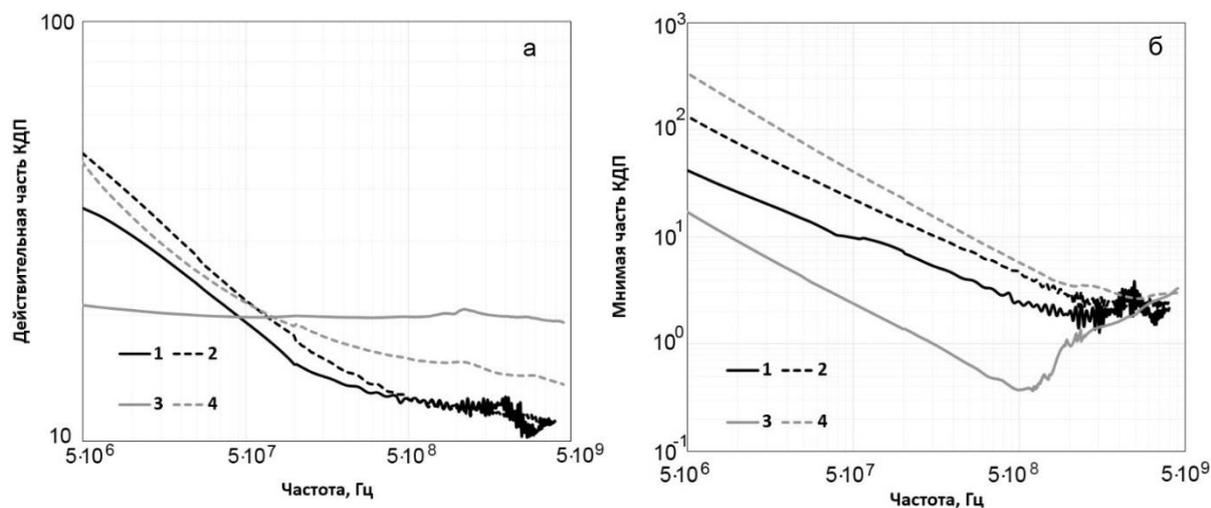


Рис. 2. Спектры действительной (а) и мнимой (б) части КДП образцов суглинистой почвы верхнего (1) и нижнего (2) горизонтов, песчаной почвы (3) и засоленной почвы (4)

Как можно видеть из приведённых данных, вид диэлектрических спектров в значительной степени определяется как особенностями гранулометрического состава, так и наличием солей. В данной работе рассматриваются образцы с существенно отличающимся содержанием физической глины (частиц с характерными размерами меньшими, чем 0,01 мм). В образцах №1, 2 и 4 содержание физической глины выше, чем у №3. В случае, если доминирующей по размеру компонентой почвенного скелета является физическая глина, наблюдается монотонный рост действительной части КДП при уменьшении частоты в пределах диапазона измерений (см. рисунок 2а). Данный эффект обусловлен низкочастотным релаксационным процессом Максвелла-Вагнера, протекающим в почвах под действием внешнего переменного электромагнитного поля. Стоит отметить, что влияние этого процесса на значения действительной части КДП должно проявляться и для почв с высоким содержанием физического песка, но на частотах существенно меньших, чем

5 МГц. По этой причине, значения действительной части КДП образца №3, полученные в результате проведённого исследования, мало изменялись с частотой. На частотах в сотни мегагерц и единицы гигагерц значения действительной части КДП образцов №3 и №4 больше, чем у образцов №1 и №2. Для образца №3 это объясняется меньшей удельной поверхностью почвенных частиц, а, следовательно, меньшим количеством связанной воды, чем в суглинках. В этом состоянии вода удерживается на поверхности минеральных частиц почвы, что сказывается на её гидро- и радиофизических характеристиках. Так, значения действительной части КДП связанной воды меньше, чем у свободной воды при прочих равных условиях. Большие значения действительной части КДП образца №4, по сравнению с №1 и №2, объясняются изменением подвижности молекул воды, при наличии в ней растворённых солей.

В качестве общей тенденции, характерной для всех исследуемых образцов, является рост значений мнимой части КДП с уменьшением частоты в диапазоне метровых и дециметровых волн (см. рисунок 2б). При этом значения мнимой части КДП образцов №1, №2 и №4 мало изменяются в диапазоне частот 1–4 ГГц, а для образца №3 наблюдается локальный минимум на частоте близкой к 500 МГц. Такой вид диэлектрических спектров обусловлен особенностью частотной зависимости механизмов, определяющих диэлектрические характеристики почв. На частотах существенно ниже 1 ГГц основными факторами, определяющими значения КДП почв, является поляризация межфазных границ «почвенная частица-вода» и «вода-воздух», а также «низкочастотные» релаксационные процессы. По мере роста частоты, влияние указанных механизмов уменьшается, но возрастает вклад ориентационной поляризации молекул свободной воды, приводящей к возрастанию мнимой части КДП. В итоге, на частотах близких к единицам гигагерц вклад каждого из указанных механизмов перестаёт носить доминирующий характер (низкочастотные механизмы уже сказываются в малой степени, а высокочастотные ещё действуют в полной мере), что проявляется в появлении минимума на графике спектра мнимой части КДП. Исходя из полученных данных, можно предположить, что интенсивность этого минимума

и частота, на которой он наблюдается, в большей степени определяется гранулометрическим составом почв.

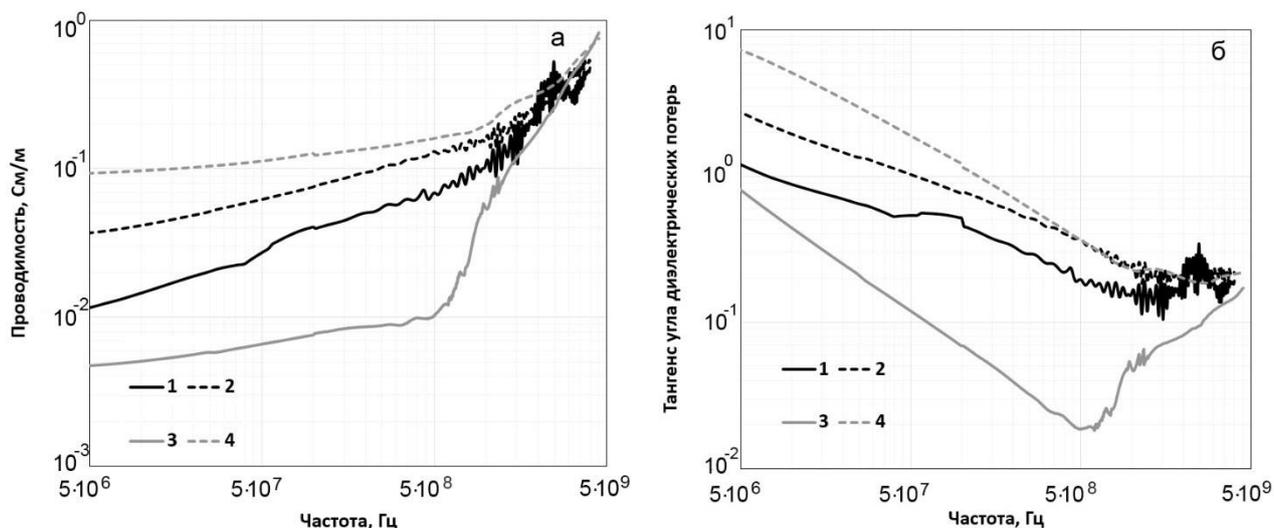


Рис. 3. Значения проводимости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б), рассчитанные по данным о КДП для образцов суглинистой почвы верхнего (1) и нижнего (2) горизонтов, песчаной почвы (3) и засоленной почвы (4)

Сравнительный анализ данных, приведённых на рисунках 2б, 3а и 3б, свидетельствует о довольно высоких потерях в образце №2, сопоставимых с потерями в образце засоленного суглинка. Это можно объяснить особенностями водного режима почв Омской области. Зачастую, глубина залегания грунтовых вод на юге Западной Сибири не превышает высоту капиллярного поднятия. При этом грунтовые воды содержат заметное количество растворённых солей. Перенос почвенной влаги в процессах испарения и инфильтрации сопровождается миграцией солей, в следствие этого для почв юга Западной Сибири зачастую характерна повышенная концентрация ионов. В зависимости от глубины залегания грунтовых вод и особенностей гранулометрического состава засоленной может оказаться либо вся толща почвы, либо её отдельные горизонты. В точке отбора образцов №1 и №2 засолению подвергся как минимум горизонт 40–50 см, что объясняет заметно более высокую проводимость и тангенс угла диэлектрических потерь образца №2 по сравнению с образцом №1. Значение тангенса угла диэлектрических потерь больше единицы, т.е. соответствующее «проводнику», наблюдалось: для образцов №2 и №3 до частот 50 МГц и 100 МГц соответственно, для образца №1 до 10 МГц. Образец №4 не

имел значений тангенса угла диэлектрических потерь больших единицы во всём диапазоне измерений, то есть его можно отнести к «диэлектрику».

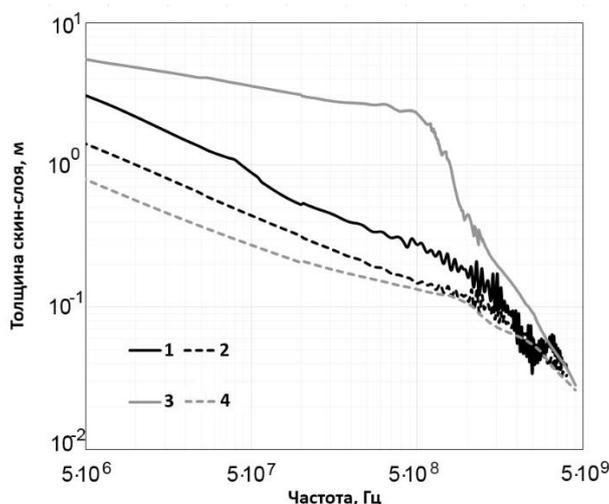


Рисунок 4. Значения толщин скин-слоя, рассчитанные по данным о КДП для образцов суглинистой почвы верхнего (1) и нижнего (2) горизонтов, песчаной почвы (3) и засоленной почвы (4)

Известно, что толщина скин-слоя уменьшается по мере роста частоты и потерь в диэлектрике. Высокие потери, количественно оцениваемые в значениях мнимой части КДП, тангенса угла диэлектрических потерь или проводимости, определяют малую толщину скин-слоя диэлектрика, выраженную в долях длины волны. Как видно из данных, приведённых на рисунке 4, образцы №2 и №3 отличаются меньшими, по сравнению с образцами №1 и №4, значениями толщины скин-слоя на одинаковых частотах. В абсолютных величинах значение толщины скин-слоя меньше 1 метра наблюдалось: для образца №1 – во всём диапазоне измерений, для образца №2 – на частотах ниже 10 МГц, для образца №3 – на частотах ниже 550 МГц и для образца №4 – на частотах ниже 50 МГц. Стоит отметить, что на графике зависимости толщины скин-слоя от частоты для образца №3 имеется точка перегиба на частоте близкой к 500 МГц. Можно предположить, что причина этого определяется особенностью частотной зависимости поляризационных процессов (описание приведено выше по тексту).

## Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что величина комплексной диэлектрической проницаемости почв является функцией содержания физического песка, глины и солевой компоненты. Это объясняется тем, что при изменении содержания физического песка и глины в почве изменяются её гидрофизические характеристик, что в свою очередь сказывается на распределении почвенной влаги на поверхности минеральных частиц и приводит к изменению подвижности молекул воды. Наличие растворённых солей не только сказывается на подвижности молекул воды, но и напрямую влияет на величину проводимости (и мнимую часть комплексной диэлектрической проницаемости, связанную с ней). Также полученные результаты свидетельствуют об отличиях в диэлектрических характеристиках, обусловленных глубиной залегания почвы. Полученные результаты могут найти применение при оценке влияния подстилающей поверхности на процессы излучения и распространения радиоволн, и в перспективе, при совершенствовании диэлектрических моделей влажных почв.

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

## Литература

1. Садовский И. Н. и др. Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий //М.: ФГБУН ИКИ РАН. – 2013.
2. Replinski 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. – Т. 33. – №. 3. – С. 803-807.
3. Recommendation I. T. U. Electrical characteristics of the surface of the earth //ITU-R P. 523-7. – 1992.

4. Mironov V. L., Bobrov P. P., Fomin S. V. Multirelaxation generalized refractive mixing dielectric model of moist soils //IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2012. – Т. 10. – №. 3. – С. 603-606.
5. Bobrov P. P., Repin A. V., Rodionova O. V. Wideband frequency domain method of soil dielectric property measurements //IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2014. – Т. 53. – №. 5. – С. 2366-2372.
6. Бобров П. П. и др. Моделирование процессов диэлектрической релаксации во влажных песчаных породах //Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60. – №. 4. – С. 135-140.
7. Почвенная карта России <https://soil-db.ru/map?lat=55.2421&lng=73.6252&feature=30565&zoom=12>

**Для цитирования:**

Варнаков С.А., Яценко А.С., Кривальцевич С.В., Никифорова А.О. Влияние гранулометрического состава и солёности на вид диэлектрических спектров грунтов // Журнал радиоэлектроника. –2023. –№. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.15>