

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.11>

УДК: 621.317.335.3

ВЛИЯНИЕ ЗАСОЛЕНИЯ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВ

С.А. Варнаков^{1,2}, А.С. Яценко¹, С.В. Кривальцевич^{1,2}, А.О. Никифорова¹¹Омский научный центр СО РАН (Институт радиофизики и физической электроники)
644024, Омск, пр. Карла Маркса, 15²Омский научно-исследовательский институт приборостроения,
644071, Омск, ул. Масленникова, 231

Статья поступила в редакцию 14 июня 2024 г.

Аннотация. Проведён сравнительный анализ диэлектрических спектров почв, отличающихся содержанием солей. Лабораторные измерения диэлектрической проницаемости осуществлялись для почвенных образцов, отобранных в котловине озера Эбейты и юго-западной части Омской области. Дано общее описание диэлектрических спектров и радиофизических характеристик, связанных с ними в зависимости от степени засоления. 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, sergvamakov@yandex.ru

Введение

Решение ряда прикладных задач электродинамики требует привлечения данных о диэлектрической проницаемости подстилающей поверхности; участка суши, водоёма или иного образования, с которым взаимодействуют электромагнитные волны в процессе излучения и распространения. В качестве естественных видов подстилающей поверхности могут выступать почва или грунт, пресная или солёная вода, лёд или слоистая структура, включающая лёд как её составной элемент, и др. При наличии данных о комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) природных объектов представляется возможным определить поглощательные и отражательные характеристики тех или иных участков поверхности Земли, рассчитать уровень напряженности поля земной волны на известном расстоянии от источника, оценить направленные и импедансные характеристики приземных излучателей, и т.д..

К настоящему моменту времени общая теория диэлектрической проницаемости дисперсных смесей не создана, но для отдельных веществ удалось разработать физически обоснованные, частотно-зависимые модели КДП. Так, модель Дебая позволяет рассчитать диэлектрические характеристики пресной воды в диапазоне частот от единиц килоггерц, до сотен гигагерц [1]; вывод аналитических выражений, описывающих частотную зависимость КДП, осуществлялся в модельном приближении жидкой воды как совокупности молекулярных диполей. Однако, для возможности использования модели Дебая для расчёта КДП морской воды в аналитическое выражение, описывающее модель, необходимо вводить поправочные коэффициенты. Модели КДП более сложных структур, к которым можно отнести почву или грунт естественного сложения, носят эмпирический или полуэмпирический характер. Для их создания требуются данные о спектрах диэлектрической проницаемости, полученные при различных значениях влажности, плотности и температуры.

В результате проведённых лабораторных исследований был разработан ряд диэлектрических моделей влажных почв, среди которых наибольшее распространение получила модель, называемая в зарубежных печатных

источниках как модель Добсона (Dobson's model). 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. 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 [2]. 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 [3]. Известны версии модели для почв умеренной климатической зоны и органических почв Арктики. Научным коллективом ОмГПУ проделана большая работа по совершенствованию методов измерения в широком диапазоне частот [4].

Однако, несмотря на определённые успехи в изучении диэлектрических дисперсных смесей ряд вопросов остался не до конца изученным. Так, в известных на данный момент моделях КДП влажных почв не предполагается учёт наличия солей, что свидетельствует о важности накопления эмпирических данных о диэлектрических характеристиках подобных образцов в широком частотном диапазоне. В дальнейшем эти данные могут быть использованы как при создании тематических диэлектрических карт, так и разработке перспективных универсальных полуэмпирических моделей влажных почв.

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. Схематическое изображение экспериментальной установки приведено на рисунке 1.

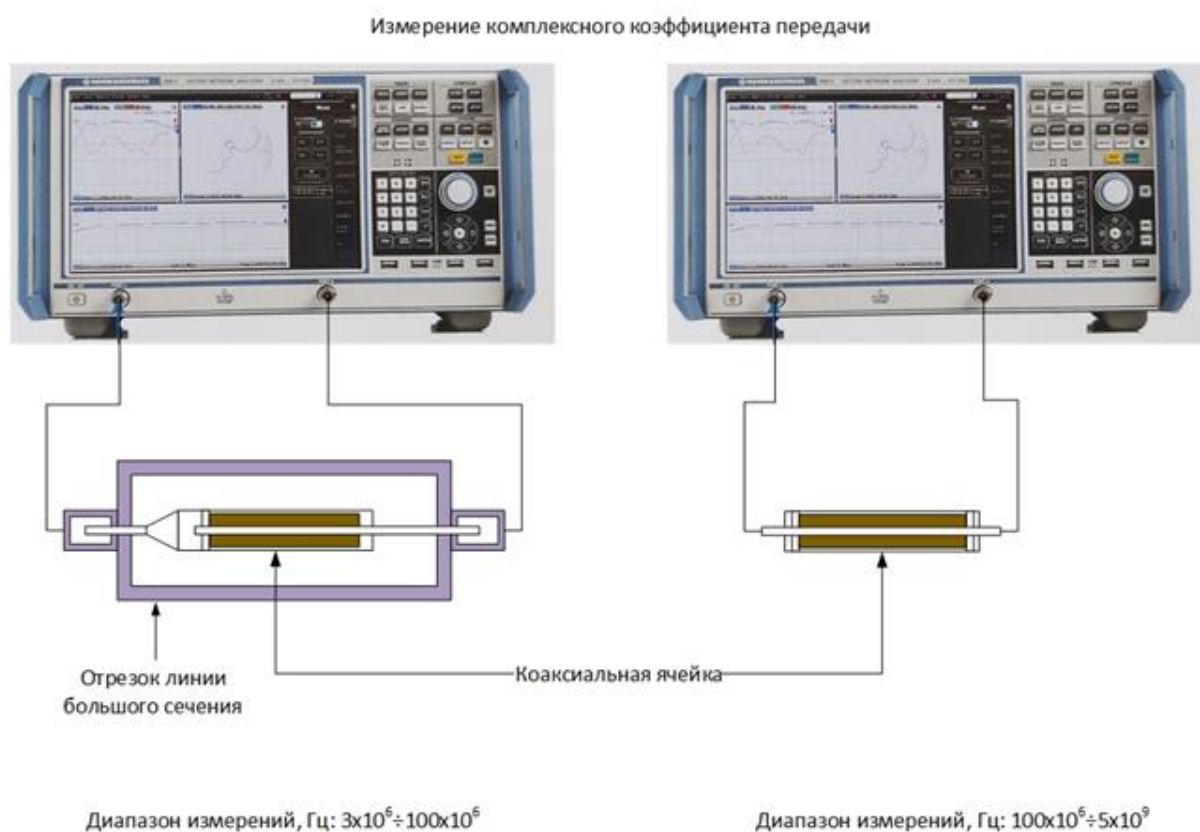


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки для определения частотной зависимости КДП образца.

В данной работе мы проводили измерения диэлектрической проницаемости почвенных образцов в диапазоне частот 5 МГц-4 ГГц. Согласно данным, приведённым 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 определённой влажностью относительная погрешность не превышает 2,5%.

Нами были получены диэлектрические спектры четырёх образцов: два из них были отобраны в северо-восточной части Омского района Омской области, в пределах горизонтов 0-10 см и 40-50 см; отбор оставшихся произведён на двух террасах в котловине озера Эбейты в пределах горизонта 0-10 см. В дальнейшем образцы будут упоминаться согласно нумерации приведённой в таблице 1.

Для оценки степени засоления образцов в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Центр агрохимической службы «Омский» был проведён анализ катионно-анонного состава водной вытяжки согласно ГОСТ 26424-85. Результаты испытаний приведены в таблице №1. Довольно неожиданным фактом являлось отсутствие засоленного состояния у образца 3 и повышенного содержания солей у образца №2. Возможным объяснением этого факта может служить близость грунтовых вод к поверхностному слою «подстилаящая поверхность-атмосфера» в точке отбора образца 2. Грунтовые воды юга Западной Сибири и Северного Казахстана отличаются повышенной солёностью. Зачастую наблюдается ситуация, когда капиллярная кайма (капиллярно-подпёртая влага, гидравлически связанная с уровнем грунтовых вод) достигает границы радела «подстилаящая поверхность-атмосфера», что приводит к миграции солей из толщи почвы ближе к её поверхности и последующему засолению. Образец 3, в отличие от образца 4, был отобран в котловине озера Эбейты в области с малой водоудерживающей способностью подстилаящей поверхности. Наличие уклона котловины позволяло влаге не задерживаться в прилежащем к поверхности слое и вымывать соли из его толщи. Окрестности места отбора образца 4 располагалась в области с отсутствием ярко выраженного

бокового стока, вследствие чего миграция грунтовых вод в вертикальной плоскости имела механизм схожий с описанным для образца 2.

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 $0,5 \text{ см}^3/\text{см}^3$) 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.

Таблица 1. Результаты анализа катионно-анонного состава водной вытяжки.

1	2	3	Определяемые показатели (характеристики), единицы измерения.								
			4	Карбона	Бикарбо	7	Калий	Магний	10	11	
				нат-ион	Хлорид-ион,		ммоль/	ммоль/			
		Плотный остаток, %		ммоль/100г/ %,		100г/ %,		ммоль/100г/ %,		ммоль/100г/ %,	
1	Почва №1	0-0,10	0,237	-	0,42	0,16	1,72	1,12	0,70	2,96	
				-	0,026	0,006	0,034	0,013	0,016	0,142	
Не засолена											
2	Почва №2	0,4-0,5	0,133	-	0,42	0,32	0,74	0,53	0,70	1,23	
				-	0,026	0,011	0,015	0,006	0,016	0,059	
Засолена в хлоридно-сульфатному натриево-кальциевому типу в слабой степени											
3	Почва №3 (Эбейты)	0-0,10	0,073	-	0,14	0,04	0,554	0,34	0,20	0,90	
				-	0,009	0,001	0,011	0,004	0,005	0,043	
Не засолена											
4	Почва №4 (Эбейты)	0-0,10	0,603	-	0,86	1,92	1,13	1,91	6,00	6,26	
				-	0,052	0,067	0,023	0,023	0,138	0,300	
Засолена по хлоридно-сульфатному магниевно-натриевому типу в очень сильной степени (солончак)											

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.

2. Результаты и обсуждение

В результате полученных измерений были получены данные о КДП почв, и проведён расчёт толщины скин-слоя подстилающей поверхности. На рис. 2-4 приведены данные, соответствующие объёмной влажности образцов $10 \pm 1,5\%$ и $35 \pm 1,5\%$; указанные значения близки к значениям влажности устойчивого завядания и предельной полевой влагоёмкости суглинка соответственно.

В качестве общей тенденции, характерной для всех исследуемых образцов, является рост значений мнимой части КДП с уменьшением частоты в диапазоне метровых и декаметровых волн и увеличением влажности. При этом, установить общую закономерность влияния засоления на величину КДП почв не представляется возможным.

При влажности близкой к 10 % влияние засоления на вид диэлектрических спектров не проявляется в заметной степени. Значения величин как действительной, так и мнимой части КДП образцов 2 и 4 близки друг к другу во всём диапазоне частот (см. рисунок 2а, 3а). При этом их КДП не принимает экстремальных значений по сравнению с образцами 1 и 3. Наибольшие значения КДП при равных частотах имеет образец 3, а наименьшее образец 1.

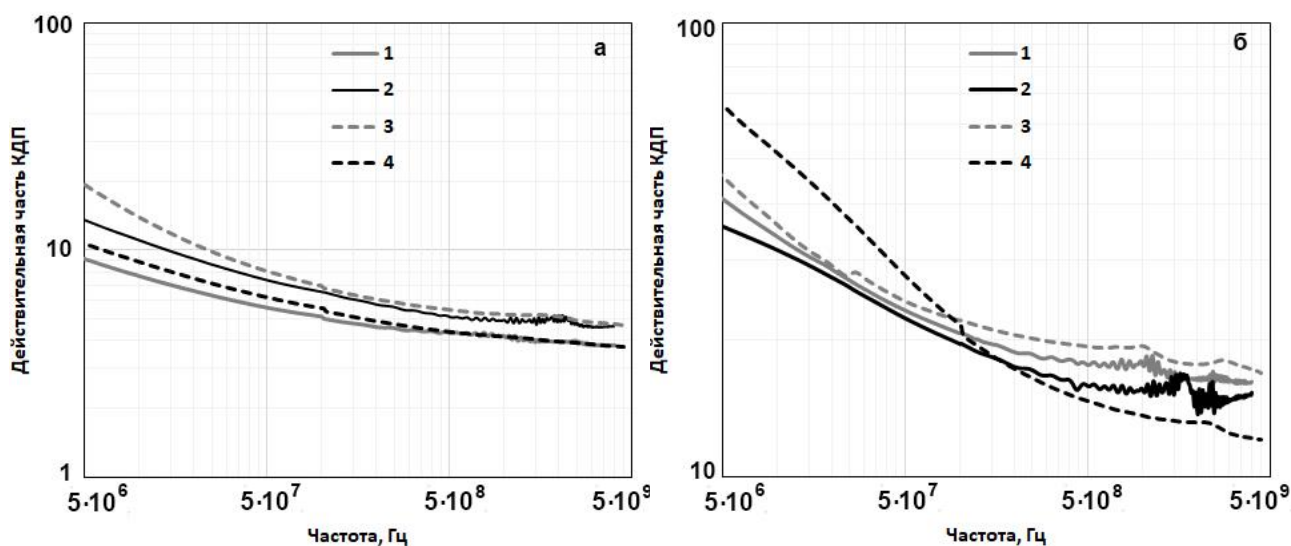


Рис. 2. Спектры действительной части КДП образцов почв для значений объёмной влажности 10% (а) и 35% (б).

При влажности близкой к 35 % образец 4 отличается большим значением действительной части КДП в диапазоне гектометровых волн, и имеет минимальное значение среди исследуемых образцов в диапазоне метровых и сантиметровых волн (см. рисунок 2б). Среди приведённых данных можно выделить спектр мнимой части КДП образца 2, как имеющий меньшие значения по сравнению со всеми остальными (см. рисунок 3б). Поскольку значения проводимости и мнимой части КДП линейно связаны друг с другом, вид частотных зависимостей проводимости и мнимой части КДП аналогичны друг другу (см. рисунок 4).

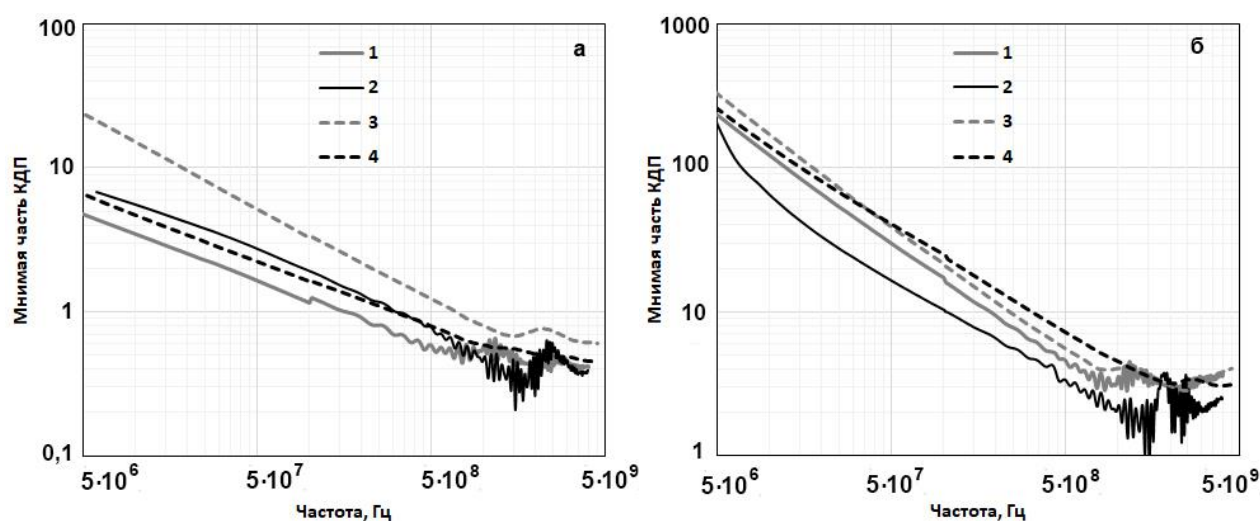


Рис. 3. Спектры мнимой части КДП образцов почв для значений объёмной влажности 10% (а) и 35% (б).

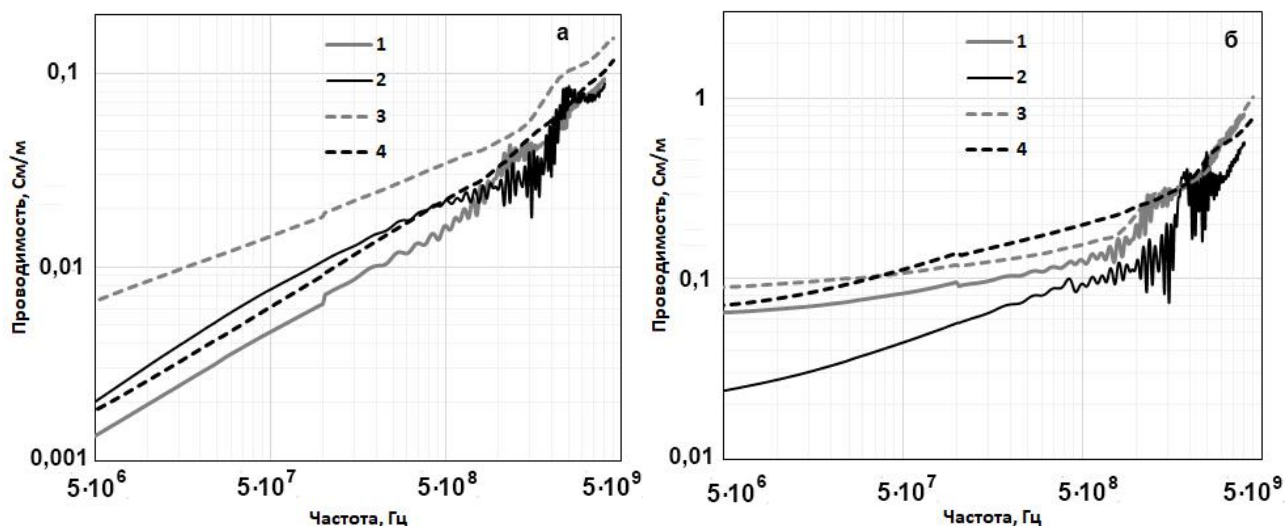


Рис. 4. Спектры проводимости образцов почв для значений объёмной влажности 10% (а) и 35% (б).

Априорная гипотеза о увеличении проводимости и уменьшении толщины скин-слоя для засоленных почв по сравнению с незасоленными так же не находит эмпирического подтверждения. Как можно видеть из данных, приведённых на рисунке 5а, при малых влажностях наименьшую толщину скин-слоя имеет образец 3, не отличающийся повышенным содержанием солей. При высоких влажностях образец 2, имеющий повышенное содержание солей в своём составе, отличается максимальной толщиной скин-слоя, а сильно засоленный образец 4 имеет наименьшее значение толщины скин-слоя на частотах выше 100 МГц.

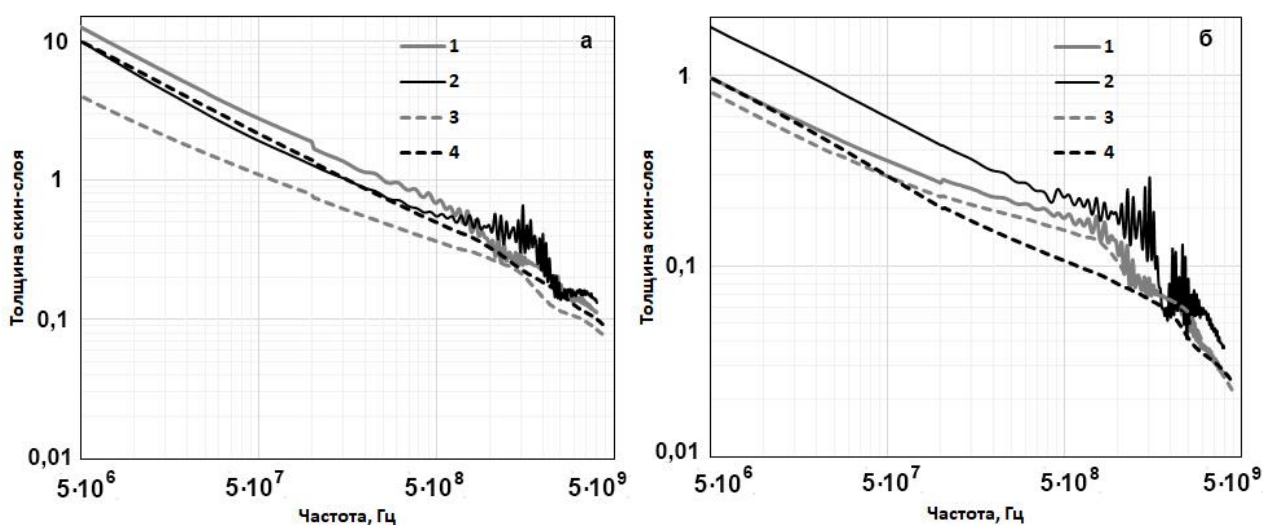


Рис. 5. Частотная зависимость толщины скин-слоя образцов почв для значений объёмной влажности 10% (а) и 35% (б).

В целом можно отметить, что диэлектрические характеристики исследуемых образцов заметно отличаются друг от друга. Полученные результаты свидетельствуют о нелинейном влиянии засоления на значения КДП и параметров с ней связанных. Для получения обобщённых выводов о влиянии засоления на диэлектрические характеристики почв необходимо проведения комплексного анализа экспериментальных данных, полученных для большего диапазона значений влажности. Этот факт в очередной раз свидетельствует о необходимости накопления данных о КДП почв, отличающихся гранулометрическим составом и содержанием солей, что требует проведение дополнительных исследований.

Заключение

Результаты исследования свидетельствуют о заметном влиянии солей на вид диэлектрических спектров почв и грунтов. Формулировка обобщённых выводов о влиянии засоления на значения диэлектрической проницаемости станет возможной после анализа данных, полученных для большего диапазона значений влажности. Однако уже сейчас, полученные зависимости могут найти применение при оценке радиофизических характеристик подстилающей поверхности, а также при решении прикладных задач радиофизики излучения и распространения радиоволн.

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

Литература

1. Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2013sadosky.pdf> (date of access: 06.06.2024).
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 (дата доступа: 06.06.2024).

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. Remote Sens. 2015. Vol. 53, No. 5. P. 2366–2372.

Для цитирования:

Варнаков С.А., Яценко А.С., Кривальцевич С.В., Никифорова А.О. Влияние засоления на диэлектрические характеристики почв. // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.11>