

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Лукина Юрия Ивановича
«Диэлектрическая спектроскопия воды в минеральных
почвогрунтах при положительных и отрицательных температурах»
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.04.01 —
«Приборы и методы экспериментальной физики»

Актуальность темы диссертационной работы. Вода вызывает большой интерес у научного сообщества. Целью исследования в диссертации является разработка метода измерения комплексной диэлектрической проницаемости воды в минеральных почвогрунтах и проведение таких измерений в широком интервале частоты, температуры и влажности. Полученные результаты представляют научный интерес с точки физики и радиофизики, а также важны с прикладной точки зрения при интерпретации результатов зондирования земной поверхности в радиодиапазоне с авиационных и космических носителей.

Объектом исследования является вода в условиях молекулярного взаимодействия с поверхностью твёрдых частиц в бентонитовой глине. **Предметом** исследования являются методы радиофизических измерений диэлектрических свойств различных типов почвенной воды в талом и мёрзлом почвогрунте.

Методологической основой работы является гипотеза о возможности применения обобщённой рефракционной диэлектрической модели смеси различных компонентов к описанию комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) влажных почвогрунтов в заданном диапазоне температур и радиочастот.

Наиболее значимые результаты диссертации

В первой главе приводится обзор работ по исследованию диэлектрических свойств влажных почвогрунтов, величина КДП которых зависит от влажности, температуры, частоты, гранулометрического и минералогического состава. В основном, диэлектрические свойства почвогрунтов определяются влажностью. Приведены различные методики измерения КДП, указаны проблемы, возникающие при этом. Отмечается, что во влажных почвогрунтах присутствует связанная и несвязанная вода, причем данные по влиянию температуры на КДП связанной воды у разных авторов противоречивы и требуют дальнейшего исследования. Для измерения частотного спектра КДП почвогрунтов в широком диапазоне радиочастот наиболее удобен коаксиальный волноводный метод.

Во второй главе дано описание лабораторной установки и метода измерения температурных зависимостей спектров КДП почвогрунтов. Установка включает в себя широкополосный векторный анализатор цепей Keysight N5232 и температурную камеру. В экспериментах используется измерительный контейнер в виде отрезка жёсткого коаксиального одномодового волновода. Исследуемый образец служит диэлектрическим заполнением волновода. Выполняется калибровка аппаратуры, проводятся измерения элементов S матрицы рассеяния образца для различных значений частоты, температуры и влажности. Выполнение калибровки предполагает также измерение элементов S для пустых контейнеров.

Управление температурной камерой осуществляется с помощью персонального компьютера, для которого разработано оригинальное программное обеспечение. Автор называет все эти процедуры диэлектрическим методом измерения КДП.

В качестве модельного образца почвогрунта выбрана бентонитовая глина, в ней практически отсутствуют органические составляющие и относительно большое количество воды может находиться в связанном состоянии. Описана методика приготовления образцов почвогрунта. Расчет КДП производится путем численного решения обратной задачи. В диапазоне 15 МГц – 1 ГГц использованы элементы матрицы рассеяния S_{12} и S_{21} . В высокочастотной области от 0.5 до 15 ГГц используются значения всех элементов матрицы рассеяния S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} . Выполнена оценка точности предложенных методов измерения и расчета КДП путём тестовых измерений веществ с известными значениями КДП. На частотах 0.5 до 15 ГГц средняя относительная погрешность измерения вещественной части КДП не превышает 4% для сухого и 8% для влажного образца почвогрунта. Средняя абсолютная погрешность измерения мнимой части КДП сухого почвогрунта не превышает 0.03. Относительная погрешность измерения мнимой части КДП влажного почвогрунта не превышает в среднем 6 %.

Выполнено большое количество измерений, потребовавшее серьезных временных затрат, в частности, из-за необходимости применять инерционную изотермическую температурную камеру и большое число образцов с разной влажностью. Кроме собственно измерений, выполнен большой объем анализов и интерпретации результатов, что составило основное содержание диссертации.

В третьей главе отмечается, что бентонитовая глина содержит большую глинистую фракцию, обладающей значительной удельной поверхностью, поэтому существенная доля воды будет прочно удерживаться в связанном состоянии. Автор считает, что в почвенной воде можно выделить три типа воды с различными диэлектрическими свойствами: прочносвязанная, рыхлосвязанная и несвязанная вода. Для каждого типа воды зависимость КДП от частоты, температуры и влажности аппроксимируется модифицированной формулой Дебая, в которую входят эффективные параметры: низкочастотный ϵ_0 и высокочастотный предел ϵ_∞ диэлектрической проницаемости, время релаксации молекул τ , проводимость среды σ и диэлектрическая проницаемость вакуума. Для описания температурной зависимости пределов диэлектрической проницаемости каждого типа воды в бентонитовой глине используется эмпирическая формула, полученная на основе формулы Клаузиуса–Массотти, в которую входит эмпирический температурный коэффициент. Для описания температурной зависимости времени релаксации используется формула Эйринга, в которую входят: постоянная Планка, постоянная Больцмана, универсальная газовая постоянная, изменения энталпии и энтропии активации релаксационного процесса. Для описания температурной зависимости эффективной проводимости воды в бентонитовой глине используется линейное приближение. Параметры ϵ_0 , ϵ_∞ , τ и σ автор определяет из опыта путём анализа данных температурной зависимости частотных спектров КДП, обсуждаются и другие подходы. Полученная совокупность параметров определяет температурную, частотную и влажностную зависимость КДП бентонитовой глины, а также

позволяет вычислять значения компонентов КДП для каждого типа воды назаданной частоте электромагнитного поля и температуре.

Исследование температурной зависимости связанной воды в интервале от -45 до 20 $^{\circ}\text{C}$ также проводились с помощью протонного ядерного магнитного резонанса (ЯМР), использован ЯМР-релаксометр AVANCE 300 на частоту 300.14 МГц. Сигнал спада свободной индукции подвергался преобразованию Фурье, измерялась ширина полученного спектра на половине высоты. Для каждой температуры были найдены зависимости полуширины спектра от влажности, описываемые кусочно-линейной функцией. Для нахождения термодинамических параметров использован дифференциальный сканирующий калориметр (ДСК) DSC 204 F1 Phoenix. Измерения проводились при температурах от -40 до 20 $^{\circ}\text{C}$. Определялось количество тепла, выделившегося при фазовых переходах в образцах почвогрунта различных влажностей, было найдено количество незамерзающей воды, как часть воды, не испытывающая фазовый переход.

На основе измеренных данных КДП образцов влажной бентонитовой глины построена спектроскопическая диэлектрическая модель бентонитовой глины в заданном диапазоне частот и температур. Справедливость модели подтверждена сравнением с результатами экспериментов, в том числе с применением ЯМР. Показано, что в диапазоне частот от 1 до 15 ГГц спектры КДП разных типов воды в бентонитовой глине могут быть описаны однорелаксационной моделью Дебая.

Отмечается, что для диэлектрических моделей реальных почв в прикладных целях можно не рассматривать отдельные типы связанной воды. В качестве примера такая упрощённая модель была построена для суглинистой почвы.

В четвёртой главе разрабатывается многорелаксационная рефракционная диэлектрическая модель смеси для бентонитовой глины в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц, учитывающая как ориентационную поляризацию молекул воды в бентонитовой глине, так и влияние низкочастотных поляризаций. Для учета низкочастотных релаксаций диполей воды в бентонитовой глине используется многорелаксационная модель Дебая. Поскольку в бентонитовой глине содержатся растворяемые в воде минералы, которые являются источниками свободных ионов, диэлектрическая модель почвогрунта дополнена параметром, характеризующим ионную проводимость бентонитовой глины σ_s на постоянном токе в виде слагаемого к ϵ'' . Это слагаемое зависит от частоты электромагнитного поля и от влажности образца. Утверждается, что поэтому на низких частотах не представляется возможным получить экспериментальные спектры КДП в рамках многорелаксационной обобщённой рефракционной диэлектрической модели, а в данном случае спектроскопические параметры каждого типа почвенной воды получены с помощью аппроксимации спектров компонентов КДП образца влажной бентонитовой глины. Для описания КДП типов воды в бентонитовой глине в рассматриваемом диапазоне частот было выбрано три релаксации для прочносвязанной воды, одна релаксация для рыхлосвязанной воды, две релаксации для несвязанной воды и одна релаксация для льда.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Автор достаточно корректно использует известные математические методы. Обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы подтверждается проведением экспериментов с помощью современного высокоточного оборудования и выполнением анализа погрешностей измерений. Автором изучены и критически рассмотрены известные достижения и теоретические положения других исследователей по тематике диссертации.

К результатам, обладающим научной новизной относятся методы лабораторных измерений частотного спектра КДП влажных почвогрунтов в интервале 15 МГц – 15 ГГц при положительных и отрицательных температурах. Измерены спектры КДП образцов влажной бентонитовой глины в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц, в диапазоне влажностей от сухого состояния образца до значения максимальной капиллярносорбционной влагоёмкости при температуре от 25 до – 30 °С. Описаны способы оценки спектров КДП различных типов воды в минеральных почвогрунтах на основе концепции обобщённой рефракционной диэлектрической модели смеси (ОРДМС).

Разработаны методы идентификации и определения относительного количества различных типов воды в бентонитовой глине с использованием ЯМР и ДСК. Значения максимального содержания связанной воды, полученные отдельно с помощью измерений диэлектрическим методом и ЯМР, совпадают в пределах погрешности как для талых, так и для мерзлых грунтов во всем исследованном диапазоне температур.

Определено минимальное количество релаксаций в различных типах воды в бентонитовой глине, которое необходимо учесть при создании моделей спектров КДП каждого типа воды в диапазоне частот от 15 МГц до 15 ГГц.

Научная значимость. Полученные экспериментальные и теоретические закономерности могут быть использованы в дальнейших научных исследованиях.

Практическая значимость работы состоит в том, что она позволяет уточнять данные активной и пассивной радиолокации районов Сибири и Крайнего Севера, в том числе при мониторинге районов таяния вечной мерзлоты.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 3 приложений. Полный объём диссертации составляет 200 страниц, включая 52 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 176 наименований. Материал диссертации изложен на достаточно высоком уровне с использованием ясных формулировок.

Диссертация представляет собой серьезную, аргументированную и завершенную научную работу, выполненную на актуальную тему и содержащую важные научные и практические результаты. Автор демонстрирует глубокое знание предмета, методов исследования и обработки результатов.

Основные результаты по теме диссертации изложены в 21 печатных изданиях, 9 из которых в журналах, рекомендованных ВАК, 8 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 8 в тезисах докладов. Все публикации выполнены в соавторстве. Зарегистрированы 2 программы для ЭВМ. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Замечания. Диссертация не лишена недочетов:

1. Не понятно, как на рис. 2.09 и 2.10 показаны табличные значения ϵ' и ϵ'' .
2. Содержатся неточные формулировки, например, на с. 88, 106 и др. говорится о *прочносвязанной* воде и об *общем количестве связанной воды* (МОВ). На рис. 3.6 диссертации приведен график МОВ, найденный с помощью ЯМР. На с.108 такая вода названа *связанной*.
3. На с. 152 можно прочитать, что при использовании параметра проводимости в формуле КДП бентонитовой глины, становится *невозможным* на низких частотах получить *экспериментальные спектры* КДП воды. Однако на рис. 4.1 символами показаны *измеренные спектры* КДП воды в бентонитовой глине.

4 Список цитируемой литературы ограничен 2015 и 2017 гг.

Выводы

Отмеченные замечания не являются принципиальными. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, содержит новые научные результаты, имеет значение для развития теории и практики современной физики и дистанционного зондирования Земли. Автор диссертационной работы продемонстрировал высокую квалификацию и опубликовал ряд новых и важных научных результатов.

Общее заключение по диссертации:

Диссертация Лукина Юрия Ивановича посвящена исследованиям в современной области физики и экологии – экспериментальному изучению диэлектрических свойств воды в окрестности точки таяния вечной мерзлоты, соответствует специальности 1.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики», имеет внутреннее единство и является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных лично автором исследований приведены новые научные результаты, что можно квалифицировать как достижение в проблеме изучения диэлектрических свойств природных сред.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, ред. от 01.10.2018) для учёной степени кандидата наук, а её автор Лукин Юрий Иванович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики».

Профессор кафедры радиотехники Сибирского федерального университета
доктор технических наук, профессор

Кашкин Валентин Борисович

Адрес: 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, СФУ

Телефон: +7 (391) 291-22-78

E-mail: rtcvbk@sfu-kras.ru



Сведения об официальном оппоненте
 по диссертации Лукина Юрия Ивановича
 «Диэлектрическая спектроскопия воды в минеральных
 почвогрунтах при положительных и отрицательных температурах»
 по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»
 на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук.

Фамилия, имя, отчество	Кашкин Валентин Борисович
Гражданство	Российская Федерация
Ученая степень (с указанием шифра специальности научных работников, по которой защищена диссертация)	доктор технических наук по специальности 05.13.16 – применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях
Ученое звание (по кафедре, специальности)	профессор по кафедре космофизики Красноярского государственного университета
	Место работы:
Почтовый индекс, адрес, веб-сайт, телефон, адрес электронной почты организации	Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, дом 79, +7 (391 2) 44-86-25, office@sfu-kras.ru, http://www.sfu-kras.ru
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»
Наименование подразделение (кафедра/лаборатория)	Институт инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета, кафедра радиотехники
Должность	профессор

Список публикаций по теме диссертации за последние 5 лет

1.	Кашкин В.Б., Владимиров В.М., Романов А.А. Сравнение методов оценки тропосферной задержки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем // Успехи современной радиоэлектроники. № 12. 2017. С. 62-66..
2.	Кашкин В.Б., Рублева Т.В., Романов А.А. Тренды общего содержания озона в 2005–2015 гг. по данным дистанционного зондирования// Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 09. С. 752–757.
3.	Кашкин В.Б., Рублева Т.В. Хлебопрос Р.Г. Стратосферный озон: вид с космической орбиты (монография). – Красноярск: СФУ, 2015. – 218 с.
4.	Kashkin, V. B., Zuev, D. V., Kurako, M. A., Romanov, A. A., Rubleva, T. V., Simonov, K. V. Satellite monitoring of atmospheric sulphur dioxide pollution in polar latitudes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. V. 193, Is. 1, 012029. 6 pp.
5.	Odintsov, R. V., Kashkin ,V. B., Rubleva, T. V., Romanov A. A. The total ozone field over the seismically active zones in the Middle East region in late 2017 / Proceedings of the SPIE. 2018. V. 10833, 1083393. 4 pp.
6.	Kashkin ,V. B., Rubleva, T. V., Romanov A. A. Modulation of the meridional ozone transfer by the Southern oscillation (ENSO) in the time of filling Antarctic ozone hole/ Proceedings of the SPIE. 2020. V. 11560, 1083393. 6 pp. doi: 10.11117/12.2575634

Официальный оппонент, д.т.н.

В.Б. Кашкин



ФГАОУ ВО СФУ
 Подпись В.Б. Кашкин
 Делопроизводитель Л.В. Кашкин
 «18» 02 2021 г.