

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
**Бадьина Александра Владимировича «ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ  
АНИЗОТРОПИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ  
ДИЭЛЕКТРИКОВ»**, представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.03 – «радиофизика»

**I. Актуальность работы.** Проблема исследования внутренней структуры всегда выдвигалась как одна из основных в различных областях науки, техники, медицины. При этом одним из основных инструментов исследования свойств природных и искусственных материалов является электромагнитное излучение в диапазоне от десятков и сотен МГц до тысяч ГГц и более. Расширение частотного диапазона в сторону более коротких длин волн дает дополнительные возможности для исследований внутренней структуры, однако уменьшение длины волны приводит к тому, что волноводные методы и методы, использующие объемный резонатор, становятся малоприменимыми для измерений электрофизических параметров материалов. С одной стороны, в диапазоне субмиллиметровых волн применение металлических волноводов и объемных резонаторов становится весьма затруднительным вследствие малых размеров и большого погонного затухания. С другой – с ростом частоты сигналов свойства радиоволн приближаются к свойствам излучения оптического диапазона, что дает возможность развертывания исследований электрофизических параметров неоднородных анизотропных материалов и сред квазиоптическими методами, такими как метод квазиоптических пучков и квазиоптического открытого резонатора. При этом возможности и особенности измерения электрофизических параметров образцов неоднородных анизотропных материалов практически не исследовались. Отметим принципиальное отличие между материалами и средами, анизотропия которых вызвана особенностями строения решетки на молекулярном уровне, и композитными анизотропными материалами, представляющими изотропную среду, включения в которую несферических частиц, отличающихся по своей диэлектрической проницаемости и проводимости, и создает анизотропию. Современный этап развития техники требует не только создания материалов с наперед заданной пространственной анизотропией (диэлектрической, магнитной проницаемости, проводимости и т.д.), но и методов, позволяющих контролировать их внутреннюю структуру и электрофизические параметры. Поэтому тема диссертации, посвященной разработке методов и исследованию электрофизических свойств естественных и искусственных многокомпонентных анизотропных композитных материалов в терагерцовом диапазоне, является актуальной.

**II. Наиболее существенные новые научные результаты.**

1. Предложена, для исследования распространения радиоволн в приближении метода малых возмущений, физико-математическая модель среды с диэлектриче-

скими потерями, которая заполнена эллипсоидальными включениями  $m$  видов, причем для каждого вида эллипсоиды однородны, изотропны и описываются своими значениями диэлектрической проницаемости, коэффициента деполяризации и диэлектрических потерь.

2. Показано, что для композитного материала с одним видом эллипсоидальных включений угловая зависимость коэффициента прохождения электромагнитной волны смещается на угол  $\pi/2$  при переходе диэлектрических проницаемостей среды и включений от  $\epsilon^{\text{ext}} < \epsilon^i$  к  $\epsilon^{\text{ext}} > \epsilon^i$ .
3. Установлено, для терагерцового диапазона (0,101-0,177 ТГц), что при упорядочивании углеродных нанотрубок в полистироле путем растяжения композитного материала существует угловая зависимость коэффициента прохождения радиоволны в поперечном относительно направления растяжения направлении.
4. Предложена и реализована методология оценки анизотропии диэлектрической проницаемости композитного материала, помещенного за СВЧ открытым резонатором с квадратным отверстием, по зависимости добротности резонатора от угла поворота плоскопараллельного образца композитного материала относительно продольной оси возбужденного узкой щелью резонатора.

### III. Обоснованность и достоверность.

Сформулированные в диссертации положения, являются обоснованными и достоверными. Обоснованность теоретического подхода следует из математического формализма, базирующегося на уравнениях Максвелла, и использовании корректных приближений в процессе построения физико-математических моделей. Подтверждением достоверности результатов натуральных экспериментов служат результаты сравнения модельных и тестовых расчетов с данными натуральных наблюдений, а также в качественном согласии: а) по коэффициенту прохождения радиоволны для случая композитных материалов на основе многостенных углеродных нанотрубок; б) результатов, полученных методом открытого резонатора, с результатами, полученными волноводным СВЧ-рефлектометром и волноводно-резонаторным методом.

### IV. Ценность работы.

1. **Теоретическая.** Заключается в следующем.

Сформулированная физико-математическая модель взаимодействия электромагнитного излучения СВЧ-, КВЧ- диапазонов с многокомпонентными композитными материалами с потерями может быть использована при исследовании численными методами электрофизических свойств таких материалов.

Экспериментальные данные по частотным и угловым свойствам коэффициента прохождения радиоволны через композитный материал могут быть использованы при изучении анизотропии его внутренней структуры.

Экспериментальные исследования анизотропии диэлектрической проницаемости различных материалов в терагерцовой области частот расширяют возможности квазиоптической поляриметрии.

## 2. Практическая. Заключается в следующем.

Данные по оценке направлений анизотропии горных пород в радиоволновом диапазоне могут лечь в основу создания новых средств экспресс-диагностики кернов горных пород.

Выявленная зависимость радиоволновой анизотропии от содержания в древесине влаги может быть использована при разработке нового поколения радиоволновых влагомеров.

Композитные материалы из многостенных углеродных нанотрубок и полистирола могут быть использованы при разработке новых СВЧ- и КВЧ- поляризаторов, обеспечивающих изменение коэффициента прохождения радиоволны.

В целом, ценность работы заключается в том, что её результаты представляют собой важный вклад в развитие фундаментальной научной проблемы *«взаимодействие электромагнитного излучения с многокомпонентными природными и искусственными средами»* и имеют как фундаментальное, так и прикладное значение.

## V. Полнота опубликования результатов работы, ее апробация.

Материалы диссертации опубликованы в 11 работах, из них 4 статьи опубликовано в журналах, входящих в Перечень Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки РФ (в том числе 4 статьи в журналах, включенных в библиографические базы Web of Science и Scopus). Полученные в работе результаты прошли апробацию на научных конференциях и симпозиумах, часть из которых всероссийского и международного уровней.

## VI. Критические замечания по работе.

1. Третье защищаемое положение имеет не вполне удачную формулировку – из самого текста положения непонятно, к чему относится параметр  $a$  (*... возбуждаемого узкой щелью при условии  $a \ll \lambda$  ...*).
2. В работе отсутствует анализ применимости реализованного подхода при увеличении (с 0, 25%) массовой концентрации эллипсоидальных включений.
3. Имеется ряд замечаний по оформлению диссертации и цитируемой литературы. В их числе, например, на стр. 11 – «... могут быть ...»; на стр. 32 – «... [70 Егоров диссер] ...»; на стр. 46 – «... [Суслев, Павлова] ...»; на стр. 47 – подпись к рис. 2.7 и «Как видно из рисунка 2.8, представленного на рисунке ...» и ряд других.

В целом высказанные замечания не отражаются на общей положительной оценке работы.



**VII. Заключение по работе.** Представленные в диссертационной работе теоретические результаты, данные натурных и модельных экспериментов следует квалифицировать как решение важной научной задачи, являющейся составной частью фундаментальной научной проблемы «взаимодействие электромагнитного излучения с многокомпонентными природными и искусственными средами».

**Резюме.** Диссертационная работа Бадьина А.В. «Электродинамическая анизотропия многокомпонентных неоднородных диэлектриков» соответствует паспорту специальности 01.04.03 – «радиофизика» (пункты 2, 3 паспорта специальности), удовлетворяет требованиям, изложенным в Положении о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «радиофизика».

**Автореферат** диссертационной работы верно отражает её содержание.

**Официальный оппонент,**

ведущий научный сотрудник лаборатории физики климатических систем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
доктор физ.-мат. наук, профессор



Нагорский Петр Михайлович

634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, ИМКЭС СО РАН  
E-mail: [npm\\_sta@mail.ru](mailto:npm_sta@mail.ru)  
Тел.: 8-(3822)-49-15-65

Подпись в.н.с. ИМКЭС СО РАН П.М. Нагорского  
заверяю

Ученый секретарь ИМКЭС СО РАН,

канд. техн. наук  О.В. Яблокова  
08 декабря 2014 г.

