

## О Т З Ы В

официального оппонента – Бисярина Михаила Александровича – на диссертацию Терещенко Павла Евгеньевича «**Особенности возбуждения и распространения электромагнитного поля в диапазоне частот менее 300 Гц от заземлённого или заводнённого горизонтального излучателя**», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 «Радиофизика»

Диссертационная работа П.Е.Терещенко посвящена исследованию процессов возбуждения, распространения и применения электромагнитных волн крайне низких (КНЧ, 3-30 Гц) и сверхнизких (СНЧ, 30-300 Гц) частот в околоземном пространстве. Волны этих диапазонов распространяются на большие расстояния и способны проникать в толщу Земли как на суше, так и в океан. Они нашли широкое научное применение в геофизических исследованиях и геологоразведке, а несомненное практическое достоинство заключается в возможности управления глубоководными объектами. Главной сложностью в исследовании и практическом применении таких радиоволн является необходимость построения протяжённых антенн (несколько десятков километров) и поддержание в них мощных токов (сотни ампер). Тем не менее, развитие электронной техники позволило создать генерирующие и приёмные комплексы для исследования особенностей их распространения и взаимодействия с окружающей средой.

Глубокое проникновение в литосферу и ионосферу создаёт возможности использования в задачах дистанционного зондирования, однако недостаток информации о строении и характеристиках литосферы затрудняет решение задач о возбуждении и распространении волн сверхнизкочастотных диапазонов. Применявшийся метод телеграфного уравнения не позволяет учесть проводимость литосферы на больших глубинах, а также структуру высокоширотной ионосферы. Этим обусловлена **актуальность** выбранной темы и проведённой работы. Автором проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование, раскрывающее детали распространения КНЧ-СНЧ волн на большие расстояния, влияния земной коры, нижней и верхней ионосферы как в точке излучения, так и на трассе распространения.

Это представляет несомненный интерес для геофизических исследований, геологоразведки, задач связи и управления.

На подготовительном этапе автором в достаточном объёме произведён обзор литературы, касающейся темы исследований, обоснована актуальность темы, научная новизна, приведены сведения о публикациях, сформулированы цели работы и решаемые для этого задачи, дан обзор основных положений работы. Всё это составляет содержание **Введения**. Основной оригинальный материал логично распределён по четырём главам.

В **Первой главе** в законченном виде рассмотрена задача распространения радиоволн, излучаемых заземлённым (заводнённым) источником, находящемся на границе раздела двух сред. Произведён переход от уравнений Максвелла к интегральной форме электрического вектора потенциала, что является более сложным по сравнению с широко известной задачей о поле вертикального диполя. На основе этих представлений получены аналитические выражения, применимые в широком диапазоне расстояний от источника, включая зону вблизи него. Выполнено обобщение для слоистой подстилающей среды.

Во **Второй главе** рассмотрено возбуждение горизонтальным заземлённым вибратором плоского волновода Земля-ионосфера. С помощью численного моделирования исследованы временные вариации магнитного поля, позволяющие судить о степени возмущённости ионосферы и пригодности ионосферных моделей для описания КНЧ-СНЧ полей активного источника.

Обобщая содержание первых двух глав, следует отметить, что в них содержится аналитический метод расчёта потенциалов и полей ниже границы раздела для заземлённого (заводнённого) источника. В рамках метода обоснована применимость импедансного подхода для слоистой модели литосферы при обобщении квазистационарного приближения для КНЧ-СНЧ полей. Этим полностью обосновывается **первое** выносимое на защиту **положение**.

В **Третьей главе** описаны четыре оригинальные экспериментальные исследования распространения волн КНЧ-СНЧ диапазонов, возбуждаемых горизонтальной заземлённой антенной. В первом показана важность учета проводимости Земли не только на трассе распространения, но и непосредственно под антенной. Во втором впервые исследовано влияние



солнечного затмения и показано, что изменения структуры нижней ионосферы во время солнечного затмения можно качественно свести к уменьшению эффективной высоты отражения СНЧ волн. Третье и четвертое связаны с влиянием геологической структуры Земли на распространение КНЧ-СНЧ волн и возможностью использовать обнаруженные эффекты в задачах геологоразведки. По результатам этой главы экспериментально продемонстрирована зависимость поля источника КНЧ-СНЧ диапазона от проводимости ионосферы и литосферы, установлена зависимость величины СНЧ поля в волновой зоне от проводимости ионосферы в ходе солнечного затмения, показана эффективность применения контролируемого источника для выявления крупномасштабных неоднородных геологических структур. Это является достаточным обоснованием **второго, третьего и четвёртого положений**, выносимых на защиту.

В **Четвёртой главе** рассматриваются особенности возбуждения волн КНЧ и более низкого диапазонов в волноводе Земля-ионосфера. В первом подразделе рассмотрено возбуждение таких волн в ближней зоне, в том числе выполнен ряд оригинальных исследований поляризационных характеристик поля, подтверждены теоретические расчеты заметного влияния ионосферы в ближней зоне на поле при низкой проводимости Земли. Второй подраздел связан с влиянием ионосферы на поле в волновой зоне в дневное и ночное время. Получены статистически достоверные результаты измерений КНЧ-СНЧ поля в различных геофизических условиях, отражающие воздействие на поле внешней ионосферы. Проанализированы совместные измерения резонансных естественных шумов и активного КНЧ сигнала с целью локализации источника естественных резонансных шумов. Показано, что высокая чувствительность КНЧ-волн к изменениям во внешней ионосфере открывает возможность использования этого диапазона в исследованиях околоземного пространства. Экспериментально установлена и теоретически интерпретирована немонотонность зависимости КНЧ поля от частоты, что обосновывает **пятое** выносимое на защиту **положение**.

Несомненная ценность проведённой работы заключается в том, что в ней в едином комплексе объединены результаты теоретических и экспериментальных исследований, построена законченная теория, показано, что можно использовать плоско-слоистую модель волноводного канала Земля-ионосфера для оценки КНЧ-СНЧ поля в ближней и дальней зоне.

Проведённые уникальные эксперименты показали, что плоско-слоистая модель имеет не только методическое значение. Достоверно отмечен факт проникновения КНЧ поля в верхнюю ионосферу, что может объяснить источник Альфвеновских резонансов в естественных шумах.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается соответствием изложенных теоретических положений и экспериментальных работ. Результаты не противоречат ранее полученным другими авторами.

**Новизна в постановке задач** диссертации заключается в том, что впервые поставлены целью и практически реализованы поляризационные измерения КНЧ сигналов, показавшие свою эффективность при исследовании неоднородной структуры литосферы. Сформулирована теоретически задача о влиянии ионосферы на КНЧ поле на малых (по сравнению с эквивалентной высотой ионосферы) удалениях от источника, и проведены соответствующие экспериментальные работы.

**Новизна результатов** присутствует в каждой из четырёх глав диссертации. Особо стоит отметить, что аналитическое решение задачи о распространении волн КНЧ-СНЧ диапазонов от элементарного горизонтального излучателя, помещённого на границе раздела двух сред, обобщено на случай слоистой подстилающей среды. Определены границы применимости квазистационарного приближения и импедансного подхода для описания волнового поля в неоднородной литосфере. Кроме того, проведённые оригинальные эксперименты позволили оценить возможности и эффективность использования активных источников КНЧ-СНЧ полей для исследования разломных геологических структур.

В качестве **критических замечаний** следует отметить следующее.

1. Сама постановка задачи подразумевает разместить источник поля на границе раздела, но с математической точки зрения это требует корректного обоснования. Плотности стороннего тока в верхней и нижней среде фактически задаются посредством дельта-функций  $\delta(z-\varepsilon)$  и  $\delta(z+\varepsilon)$ , и при сшивании решений осуществляется предельный переход при  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Эта процедура в диссертации не обсуждается.

2. В разделе 3.1 в целях сопоставления с результатами работы [32] следовало бы адаптировать формулы из этой работы к гармонической зависимости вида  $\exp(-i\omega t)$ , как и во всей диссертации.



3. При интерпретации экспериментальных данных необходима дополнительная аргументация относительно изменения проводимости ионосферы по данным о распределении электронной концентрации.

4. При формулировке задачи о поле от протяжённой антенны требуется точно определить параметры, входящие в формулу (1.50), с указанием их размерностей.

5. В Главе 1 после формулы (1.4) дано некорректное выражение для волнового числа в среде.

6. В нумерованной формуле на стр.28 присутствует опечатка: по существу требуется равенство нулю мнимых частей обоих параметров  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

7. На рисунках присутствуют надписи на английском языке. Имеются случаи использования английского наименования размерности проводимости. Встречаются опечатки и стилистические погрешности.

Указанные недостатки не носят принципиального характера, не влияют на корректность сделанных выводов и не снижают высокую оценку диссертационной работы.

По материалам проведённых исследований опубликовано 19 статей в журналах, включённых в список ВАК или в международные базы Scopus и Web of Science. Результаты докладывались на представительных научных конференциях, опубликовано 17 тезисов докладов. Кроме того, имеется ещё 5 публикаций в прочих изданиях. Результаты диссертации использовались при выполнении планов научно-исследовательских работ Санкт-Петербургского филиала Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН), в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 годы, а также грантов РФФИ и РФФИ.

Содержание диссертации отвечает Паспорту научной специальности 1.3.4 «Радиофизика»: в части разработки и исследования электродинамических и антенных систем КНЧ-СНЧ диапазонов – п.3; в части разработки принципов диагностики окружающей среды – п.5; в части разработки методов и систем связи – п.7.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и позволяет достоверно судить о качестве работы в целом.

Диссертационная работа «Особенности возбуждения и распространения электромагнитного поля в диапазоне частот менее 300 Гц от заземлённого или заводнённого горизонтального излучателя» представляет собой законченное исследование, обладающее научной новизной и имеющее теоретическую и практическую ценность. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям ( «Положение о порядке присуждения учёных степеней», пп. 9–14 ), а её автор – **Терещенко Павел Евгеньевич** – заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 «Радиофизика».

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук

М.А.Бисярин

Бисярин Михаил Александрович, доктор физико-математических наук.  
Диссертация защищена по специальности 01.04.03 «Радиофизика».  
Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет,  
кафедра радиофизики.

Ведущий научный сотрудник

Адрес: 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб, 7-9

Тел. : +7-905-2630392

Email: m.bisyarin@spbu.ru

