

Экз. № 1

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника  
Военно-космической академии  
имени А.Ф. Можайского  
по учебной и научной работе  
доктор технических наук профессор

Ю. Кулешов

2024 г.

М.П.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Терещенко Павла Евгеньевича «Особенности возбуждения и распространения электромагнитного поля в диапазоне частот менее 300 Гц от заземленного или заводненного горизонтального излучателя», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 Радиофизика.

Тема диссертации Терещенко П.Е. является актуальной, а проведенные диссертационные исследования показали перспективы применения сверхнизкочастотных (СНЧ) и крайненизкочастотных (КНЧ) электромагнитных волн для зондирования окружающего пространства, в частности, для исследования нижней и внешней ионосферы, глубинной структуры литосферы, в том числе, для выявления источников излучения низкочастотного электромагнитного поля.

Кроме этого, результаты работы полезны при моделировании задач связи, локации, навигации и управления подводными или заглубленными объектами народнохозяйственного и специального назначения. Одной из основных характеристик рассмотренного диапазона электромагнитных волн является возможность их глубокого проникновения в литосферу и ионосферу. Это создает

преимущество при их использовании в задачах дистанционного зондирования окружающей среды, но, с другой стороны, в силу малой изученности параметров внешней ионосферы и глубинных слоев литосферы затрудняет решение задачи о возбуждении и распространении КНЧ-СНЧ электромагнитного поля.

Поэтому в настоящее время представляется весьма актуальным решение проблемы развития теории прямых задач, а также проведение натуральных экспериментов для подтверждения сформировавшихся теоретических представлений по возбуждению и распространению электромагнитного поля КНЧ-СНЧ диапазона.

Следует отметить, что имеются две характерные области в пространстве, связанные с возбуждением и распространением низкочастотных волн. Это область вблизи передатчика, где формируется электромагнитное поле и влияние ионосферы в которой не является определяющим, и волновая зона на расстоянии от излучателя более двух высот эквивалентного волновода, где более ярко проявляется структура ионосферы. Соответственно, автором рассмотрено два подкласса как теоретических, так и экспериментальных задач, связанных с возбуждением и распространением КНЧ-СНЧ полей: вблизи передающего устройства и в волновой зоне.

Для увеличения дальности распространения электромагнитных волн антенны стационарных КНЧ-СНЧ излучателей располагают в областях с крайне низкой проводимостью литосферы, где величина скин-слоя в КНЧ диапазоне может быть сопоставима с высотой ионосферы. Поэтому на расстояниях, меньших или сравнимых с высотой волновода, неприменимы импедансные граничные условия, и для описания поля излучения потребовалось решить строгую электродинамическую задачу. На небольших расстояниях, значительно меньших радиуса Земли, можно пренебречь сферичностью волновода и рассматривать задачу в плоском приближении.

**Цель** диссертации - теоретические и экспериментальные исследования процессов возбуждения и распространения электромагнитных полей КНЧ-СНЧ



диапазона, генерируемых горизонтальным источником в волноводе Земля - ионосфера, включая натурные измерения характеристик полей и построение теории, объясняющей результаты проведенных экспериментов по генерации и приему колебаний в диапазоне 0.2–300 Гц.

Для достижения поставленной цели автором были исследованы особенности возбуждения КНЧ–СНЧ электромагнитных волн на расстояниях от источника, не превышающих или сопоставимых с высотой эквивалентного волновода, проанализировано поведение КНЧ–СНЧ поля в волновой зоне.

**Необходимо отметить следующие выносимые на защиту положения:**

1. Аналитический метод расчета потенциалов и полей в области ниже границы раздела для заземленного (заземленного) источника, находящегося на границе раздела двух сред, включая обобщение квазистационарного приближения для КНЧ–СНЧ полей и обоснование применимости импедансного подхода в описании электромагнитного поля для слоистой модели литосферы.
2. На основе проведенных экспериментальных исследований показано влияние проводимости ионосферы и литосферы на поле активного контролируемого источника излучения в КНЧ–СНЧ диапазоне и дано его теоретическое обоснование.
3. Выявлено влияние солнечного затмения на амплитуду СНЧ поля в волновой зоне, обусловленное изменением проводимости ионосферы.
4. Продемонстрировано влияние крупномасштабных неоднородных образований в литосфере, включая тектонические разломы, на поведение КНЧ–СНЧ поля, показавшее эффективность применения контролируемого низкочастотного источника для выявления сложных геологических структур.
5. В волновой зоне при дневных и ночных условиях экспериментально исследован немонотонный характер изменения характеристик поля в зависимости от частоты диапазона КНЧ и дана его теоретическая интерпретация.

**Научная новизна диссертации** заключается в следующем:

1. В рамках квазистационарного приближения впервые получено

аналитическое решение для потенциалов и полей, возбужденных горизонтальной заземленной (заподненной) антенной ниже границы раздела сред, возможности применения которого шире рассмотренных в работе задач, в частности, для локализации подземных (подводных) источников низкочастотного электромагнитного излучения.

2. Для плоскостойкой среды определены границы применимости квазистационарного приближения, а также импедансного подхода описания проводимости литосферы.

3. Впервые теоретически и экспериментально оценено влияние ионосферы на поле диапазона КНЧ на расстояниях, не превышающих или сопоставимых с высотой эквивалентного ионосферного волновода.

4. Впервые в практику исследований с активным крайненизкочастотным сигналом введены поляризационные измерения, показавшие их эффективность для изучения неоднородной структуры литосферы.

5. Выполнен ряд оригинальных экспериментальных исследований по влиянию ионосферы и литосферы на электромагнитное поле СНЧ-КНЧ диапазона как в ближней, так и в волновой зонах.

При решении научной проблемы в работе были использованы классические в области математической физики и электродинамики методы математического анализа для описания распространения электромагнитных волн в плоскостойкой среде. При компьютерном моделировании для интегральных представлений компонент электромагнитного поля был применен известный метод Лонгмана, разработанный для вычисления интегралов с быстроосциллирующей подынтегральной функцией. При обработке результатов радиофизических измерений использован аппарат спектрального анализа на основе метода Уэлча.

**Теоретическая значимость результатов диссертации** заключается в том, что предложенные в работе методики расчета электромагнитного поля



излучения заземленного (завожденного) диполя могут быть использованы для развития научно-методического аппарата изучения строения как литосферы, так и ионосферы (нижней и внешней), локализации источников подземных (подводных) электромагнитных полей, а также для выявления источников Альвеновских резонансов в естественном электромагнитном шуме.

**Практическая значимость** результатов диссертации определяется тем, что достижения диссертационных исследований могут быть при соответствующей доработке применены для результативного решения задач связи, локации, навигации и управления подводными или подземными объектами народнохозяйственного и специального назначения.

Научные положения, выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации, в достаточной степени обоснованы и аргументированы. Достоверность полученных результатов определяется и подтверждается:

– корректным использованием современного математического аппарата и обоснованным выбором показателей и критериев;

– обоснованным принятием допущений и ограничений при формировании исходных данных и постановке частных задач исследований.

Исследования по теме диссертации проводились автором в ходе выполнения планов научно-исследовательской работы СПбФ ИЗМИРАН, НИР в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы» (контракт 02.515.12.5002 «Разработка технологии дистанционного зондирования с использованием мощных стационарных источников экстремально низкочастотного электромагнитного поля, контракт 16.515.10.5012 «Разработка метода электромагнитного картирования в высоких широтах с использованием мощного контролируемого источника экстремально низкочастотного диапазона», контракт 16.518.11.7100 «Мониторинг высокоширотной ионосферы, включая средние широты, и решение задачи диагностики внешней ионосферы с использованием совместных данных

радиотомографической установки ПГИ КНЦ РАН и измерителей магнитного поля диапазона 0,1–20Гц»), грантов РФФИ (13-05-12005 «Исследование влияния геофизических условий на структуру естественного и антропогенного КНЧ и СНЧ полей», 15-05-02437 «Исследование внешней ионосферы по совместным данным радиотомографической сети и наблюдения резонансных структур в спектре естественного электромагнитного излучения», 18-05-00528 «Квази-3D модель электропроводности температуры и реологии литосферы восточной части Балтийского щита по результатам электромагнитных зондирований с естественными и мощными контролируруемыми источниками», 19-05-00823 «Особенности поляризационных характеристик КНЧ сигналов, возбуждаемых на низкопроводящей Земле») и РФФИ 22-17-00208 «Глубинные электромагнитные зондирования литосферы с естественными и мощными контролируемыми источниками с учетом влияния свойств волновода Земля-ионосфера, статических искажений, горизонтальной неоднородности и анизотропии верхней части земной коры и геодинамические модели напряжённо-деформированного состояния земной коры восточной части Фенноскандинавского щита».

Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 41 печатном издании, 19 из которых изданы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК или в международных реферативных базах Scopus и Web of Science, 17 — в тезисах докладов.

Результаты исследований, полученные при выполнении диссертации, докладывались как на международных, так и на всероссийских конференциях

Научная ценность исследований автора определяется полнотой изложения основных результатов исследования и их опубликованием в ведущих рецензируемых журналах, что позволяет определить новые теоретические и экспериментально обоснованные оценки влияния ионосферы на электромагнитные волны диапазона КНЧ, а также эффективность поляризационных измерений для неоднородной структуры литосферы.

Результаты и выводы, приведенные в диссертации, могут быть



рекомендованы к использованию в следующих организациях:

- в подразделениях, занимающихся исследованием космического пространства (ионосферы) и проблемами распространения радиоволн, такими как Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ), Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского (ИДГ РАН), Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ), Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН);
- в организациях, проводящих электроразведку литосферы - Геологический институт Кольского научного центра РАН, Восточно-Европейская Геофизическая Ассоциация (ООО «Вега»);
- в Управлении связи Военно-Морского Флота для решения задач связи, навигации и управления заглубленными объектами.

Вместе с тем диссертация не лишена недостатков.

1. В диссертации отсутствует в явном виде формулировка решаемой научной проблемы и ее формализованная постановка. Наличие указанных положений безусловно усилило бы фундаментальность и системность характера выполненных исследований, их структурное внутреннее единство и целостность с позиций определения прикладной значимости полученных результатов.
2. Количественная оценка ряда представленных в диссертации результатов, полученных по данным экспериментов и в процессе компьютерного моделирования, проводится с использованием статистических характеристик. Однако не ясно, оценивал ли автор устойчивость предлагаемых процедур к возмущениям, проявляющимся в появлении аномальных измерений, возникновении погрешностей измерений систематического характера, а также в отклонении фактической системы формализации решения от принятой модели ее состояния. Отсутствует количественная характеристика достоверности, описывающая приводимые оценки.
3. В работе недостаточно четко определены границы применимости разработанного научно-методического аппарата в условиях высокой динамики и

диапазона изменения релевантных факторов предложенных моделей. Остается вопрос: какова эффективность применения полученных автором результатов для решения прикладных задач и их справедливость в условиях высокой интенсивности изменения геофизических факторов и состояния литосферы и атмосферы.

4. Результаты диссертационных исследований обрели бы значительно большую значимость при более четком описании автором системы или направлений практических рекомендаций по применению полученных теоретических достижений в решении прикладных задач как народнохозяйственного, так и двойного или специального назначения.

Отмеченные недостатки не снижают высокого научного уровня и практической значимости диссертации и не изменяют ее общей высокой положительной оценки.

Диссертация аккуратно оформлена, содержит исчерпывающее описание основных научных и прикладных результатов и обширный иллюстративный материал. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации. В нем изложены все основные результаты, выносимые на защиту, дано достаточно полное представление о научной и практической значимости работы.

**Вывод:** Диссертация представляет собой законченную научную квалификационную работу, содержащую новое решение актуальной научной проблемы, заключающейся в разработке научно-методического аппарата исследования особенностей возбуждения и распространения электромагнитного поля в диапазоне частот менее 300 Гц от заземленного или заводненного горизонтального излучателя и имеющей важное теоретическое и прикладное значение. По новизне, научному уровню и практической ценности полученных результатов диссертация соответствует критериям (п.п. 9-14) «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к

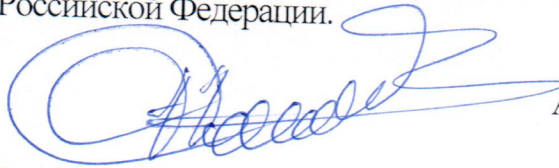


диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Автор диссертации – Терещенко Павел Евгеньевич – заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.4 Радиофизика.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры передающих, антенно-фидерных устройств и средств системы единого времени ВКА им. А.Ф. Можайского 22 января 2024 г., протокол № 02.

Отзыв подготовлен:

Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук по специальности «20.01.09 – Военные системы управления, связи и навигации», профессор, профессор кафедры Передающие, антенно-фидерные устройства и средства системы единого времени Федерального бюджетного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации.



Алёшкин Андрей Петрович

Доктор технических наук по специальности «20.02.25 – Военная радиоэлектроника», доцент, профессор кафедры Передающие, антенно-фидерные устройства и средства системы единого времени Федерального бюджетного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации.



Мысливцев Тимофей Олегович

Кандидат технических наук по специальности «20.02.25 – Военная радиоэлектроника», доцент, начальник кафедры Передающие, антенно-фидерные устройства и средства системы единого времени Федерального бюджетного военного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации



Ковалев Максим Александрович

197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13, Тел.: +7(812) 347-97-31, vka@mil.ru.

« 22 » января 2024 г.