

ОТЗЫВ

официального оппонента Мингалёва Игоря Викторовича

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»

Диссертационная работа посвящена исследованию поведения в волноводе Земля-ионосфера электромагнитных сигналов от гармонического по времени горизонтального наземного заземленного излучателя крайненизкочастотного диапазона (КНЧ, 3–30 Гц) и сверхнизкочастотного диапазона (СНЧ, 30–300 Гц). Такие сигналы в процессе распространения в ионосферном волноводе глубоко проникают в земную литосферу и ионосферу, как минимум на десятки метров проникают в соленую морскую воду, а также частично проходят сквозь ионосферу и регистрировались на космических аппаратах с орбитами выше максимума F-слоя ионосферы. Благодаря этим свойствам указанные сигналы на протяжении более полувека активно исследуются и широко применяются для связи с подводными объектами в океане, а также для зондирования литосферы. Экспериментально обнаружена существенная зависимость общей картины распространения таких сигналов от состояния ионосферы. Исследованиями по этой тематике в последние десятилетия занимается значительное число научных групп в разных странах. По мере развития электронной техники, радиотехники и доступных вычислительных ресурсов возможности проведения более детальных и точных экспериментов будут возрастать, а количество таких более точных экспериментальных работ будет увеличиваться.

Специфика поведения наблюдаемых в волноводе Земля-ионосфера низкочастотных электромагнитных полей из приведенных выше частотных диапазонов, возбужденных упомянутым выше гармоническим по времени излучателем, состоит в том, что на глобальное пространственное распределение рассматриваемых полей влияет существенно неоднородное трехмерное пространственное распределение проводимости и диэлектрической проницаемости в литосфере, а также влияют существенно неоднородные трехмерные пространственные распределения характеристик ионосферной плазмы, которые во время магнитосферных возмущений (внезапных сжатий, суббурь и магнитных бурь) могут существенно изменяться со временем на масштабах порядка десятков минут.

Основные результаты работы получены в результате анализа данных ряда уникальных экспериментов, которые были выполнены в Полярном геофизическом институте при участии автора и не имеют аналогов в мире. Уникальность этих экспериментов состояла в следующем. Во-первых, использовался мощный генератор, который с высокой точностью выдавал синусоидальный ток в достаточно широком диапазоне частот из КНЧ и СЧ диапазонов. Во-вторых, в 5 или 6 различных точках проводились одновременные измерения всех трех компонент магнитного поля сигнала с использованием до шести комплектов очень точных откалиброванных вариационных датчиков магнитного поля. Также в этих точках измерялись либо две, либо все три компоненты электрического поля. В результате были получены уникально точные измерения амплитуды и фазы созданного излучателем гармонического по времени поля.

Кроме того, в работе приводится ясное и системное изложение аналитического подхода к рассматриваемой задаче и предложен ряд его усовершенствований, в том числе обоснованы и уточнены условия применимости наиболее простого импедансного подхода, когда для удобства описания измеряемого поля в атмосфере слоистая литосфера заменяется эквивалентной однослойной средой. В результате получен набор формул в виде, наиболее удобном для анализа данных измерений. Эти формулы использовались для интерпретации экспериментальных данных и было показано, что даже такой упрощенный подход объясняет основные особенности пространственного распределения амплитуд полей от плоского горизонтального гармонического по времени излучателя на границе между атмосферой и литосферой. Также следует отметить, что изложенный в работе аналитический подход будет полезен для разработки и тестирования численных моделей.

Таким образом, актуальность темы диссертации и используемых в ней методов исследований не вызывает сомнений, а полученные автором результаты вполне обоснованы и обладают как научной новизной, так и практической значимостью.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, списка рисунков, списка таблиц, а также из двух приложений А и Б.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации и приведен хороший обзор предшествующих экспериментальных исследований и теоретических подходов к анализу их данных. Кроме того, описаны цели и задачи работы, научная новизна и практическая значимость работы, а также сформулированы выносимые на защиту положения и изложено содержание работы.

Глава 1 посвящена системному и детальному изложению аналитического подхода на основе точного решения задачи с гармоническим по времени точечным

горизонтальным дипольным излучателем, расположенном в плоскости, разделяющей две однородные изотропные среды с различными проводимостями и диэлектрическими проницаемостями. Показано, что в случае слоистой литосферы для вычисления полей в верхней среде на границе раздела можно использовать наиболее удобный импедансный подход, при котором слоистая литосферы заменяется эквивалентной ей однослойной. Получены максимально упрощенные и удобные при практическом применении формулы для вычисления амплитуд полей в верхней среде на плоскости раздела, а также установлены условия их применимости и точность. Эти формулы содержат несобственные интегралы с бесконечным промежутком интегрирования и их применение требует численного интегрирования. Приведены результаты расчетов по этим формулам. На основе результатов главы 1 формулируется первое положение, выносимое на защиту.

В главе 2 излагается обобщение рассмотренного в главе 1 аналитического подхода для задачи, в которой по сравнению с задачей в главе 1 верхнее полупространство состоит из слоя непроводящей атмосферы (вакуума) и бесконечной однородной и изотропной проводящей ионосферы. Для амплитуд полей в атмосфере на плоскости раздела с литосферой получены формулы, аналогичные соответствующим формулам, из главы 1. Из этих формул вытекает зависимость амплитуд полей от высоты ионосферы и ее проводимости. Построены графики полей, рассчитанных по указанным формулам.

В главе 3 описываются результаты пяти различных экспериментальных исследований распространения и пространственного распределения полей от горизонтальной заземленной антенны с током, гармонически колеблющемся по времени для ряда частот из СНЧ-диапазона.

В разделе 3.1 излагаются результаты эксперимента, в котором антенна проходила вдоль долготы и рассматривался набор частот из диапазона 30-100 Гц. При этом, в отличие от большинства предшествующих работ, прием сигнала выполнялся в точках, лежащих поперек оси диполя на меридиональной трассе протяженностью до 1000 км. Показана важность проводимости земной литосферы.

В разделе 3.2 описываются результаты измерений поля на частоте 82 Гц во время солнечного затмения на четырех частично или полностью затененных радиотрассах с точками приема в Баренцбурге (длина трассы примерно 1200 км), в Ловозеро (длина трассы примерно 100 км), в Лехте (длина трассы примерно 350 км), в Петрозаводске (длина трассы примерно 770 км). Обнаружена вариация амплитуды поля, близкая по времени к проходящему затмению

В разделе 3.3 излагаются результаты измерения фазы магнитного поля от указанного выше гармонического по времени излучателя в СНЧ-диапазоне в области тектонического разлома с повышенной проводимостью. Обнаружено резкое

изменение фазы примерно на 180° между точками в окрестности указанного разлома и установлена возможность локализации разломов с повышенной проводимостью с помощью измерений фазы рассматриваемого сигнала.

В разделе 3.4 описываются результаты двух различных экспериментов по зондированию Кольского залива, которые выявили существенную неточность известной геоэлектрической модели литосферы в области Кольского залива и позволили построить уточненную модель, которая хорошо соответствовала измеренным полям в 6 точках на дне Кольского залива.

На основе результатов глав 2 и 3 формулируются второе, третье и четвертое положения, выносимые на защиту.

В главе 4 описываются особенности возбуждения волн крайненизкочастотного и более низкого частотных диапазонов в волноводе Земля-ионосфера. В первом подразделе рассмотрен вопрос о возбуждении электромагнитного поля диапазона КНЧ и более низких частот в ближней зоне в волноводе Земля–ионосфера. На основе теоретических и экспериментальных работ показано, что даже в ближней зоне при определенных условиях влияние ионосферы может быть заметным. Также показано влияние неоднородностей Земной коры на принимаемое поле. Во втором подразделе на основе уникальных экспериментальных данных делается вывод о просачивании КНЧ-волн во внешнюю ионосферу и возможности использования этого диапазона для исследования ионосферы.

На основе результатов главы 4 формулируется пятое положение, выносимое на защиту.

В **приложении А** описывается передающая и приемная аппаратура, которая использовалась в экспериментах. В **приложении Б** излагается связь между формулой Баннистера и двумерным телеграфным уравнением для однородного волновода

Заключение содержит формулировку основных результатов диссертационной работы.

В качестве замечаний следует отметить неудачное оформление некоторых рисунков, где цифры и подписи на осях и цветовых панелях очень мелкие. Также в работе имеется небольшое количество очевидных опечаток, которые, не искажают правильное понимание текста диссертации.

Впрочем, высказанные замечания не изменяют в целом высокую оценку диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Основные результаты диссертации достаточно развернуто представлены в статьях (всего 19 статей), которые опубликованы в отечественных и зарубежных научных журналах, входящих в список ВАК или в международные базы Scopus и Web of

Science. Эти результаты докладывались и обсуждались на представительном числе отечественных научных конференций в 2010–2023 гг.

Диссертация П.Е. Терещенко «**Особенности возбуждения и распространения электромагнитного поля в диапазоне частот менее 300 Гц от заземленного или заводненного горизонтального излучателя**» является профессиональным научным исследованием, содержит важные научные результаты по актуальной тематике, и свидетельствует о его высокой научной квалификации. Диссертация написана грамотно и логично, в хорошем научном стиле. С учётом актуальности разработанной темы научной работы, новизны и практической значимости полученных научных результатов, достоверности и обоснованности сделанных выводов можно констатировать, что диссертация П.Е. Терещенко представляет собой научное исследование фундаментального характера и удовлетворяет всем требованиям, которые ВАК предъявляет к докторским диссертациям, а ее автор, Терещенко Павел Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических по специальности 1.3.4 – «Радиофизика».

Официальный оппонент Мингалев Игорь Викторович,
доктор физико-математических наук,
исполняющий обязанности директора
Полярного геофизического института
Отзыв составлен 9 февраля 2024 г.



Мингалев И.В.

Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, а также их дальнейшую обработку.



Мингалев И.В.

Подпись И.В. Мингалева заверю,
Ученый секретарь
Полярного геофизического института



Попова Т.А.

9 февраля 2024 г.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация: 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Почтовый адрес: 184209, Мурманская область, г. Апатиты,
ул. Академгородок, д. 26а, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Полярный геофизический институт»,
телефон: +7 (815 55) 76 530, E-mail: mingalev_i@pgia.ru