

На правах рукописи



Терещенко Павел Евгеньевич

**Особенности возбуждения и распространения
электромагнитного поля в диапазоне частот менее 300 Гц от
заземленного или заводненного горизонтального излучателя**

Специальность 1.3.4 —
«Радиофизика»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург — 2023

Работа выполнена в Санкт-Петербургском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН).

Официальные оппоненты: **Мингалев Игорь Викторович**,
доктор физико-математических наук,
Полярный геофизический институт,
и.о. директора

Тинин Михаил Валентинович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Научно-исследовательский институт прикладной
физики, Иркутский государственный университет,
главный научный сотрудник

Бисярин Михаил Александрович,
доктор физико-математических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет,
физический факультет,
Профессор кафедры радиофизики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования “Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского” Министерства обороны Российской Федерации

Защита диссертации состоится 27 февраля 2024 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 24.1.197.01, созданном при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291).

С диссертацией можно ознакомиться на сайте ru.iszf.irk.ru и в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



Ю. В. Ясюкевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Исследуемый в работе диапазон сверхнизкочастотных (СНЧ) и крайненизкочастотных (КНЧ) электромагнитных волн (30–300 Гц, 3–30 Гц, в соответствии с международным регламентом радиосвязи [1]) интересен тем, что радиоволны этого диапазона распространяются на большие расстояния, глубоко проникают в Земную кору, а также достигают верхней ионосферы, поэтому представляют интерес для геофизических исследований, геологоразведки и могут использоваться в управлении заглубленными в воду или землю объектами, находящимися на значительном расстоянии от передатчика.

Главной сложностью в исследовании и практическом применении волн указанного диапазона является необходимость использования протяженных антенн (несколько десятков километров) и создание в них мощных токов (сотни ампер). В настоящее время развитие электронной техники позволяет создавать сравнительно доступные как генерирующие, так и приемные комплексы, что сделало возможным провести исследования, касающиеся особенностей распространения и взаимодействия с литосферой и ионосферой СНЧ-КНЧ волн, изложенные в данной работе.

Актуальность темы исследования

Одними из первых практически примененных исследований крайненизкочастотных и сверхнизкочастотных сигналов были испытания ВМС США в конце 1950-х годов. Исходя из предположения, что чрезвычайно низкочастотные радиоволны могут глубоко проникать в океаны и обеспечивать связь с глубоководными атомными подводными лодками без их приближения к поверхности, было рассмотрено несколько различных концепций подобной системы управления. В результате был реализован проект “Сангвин” – система связи с двумя передатчиками и антенной системой над землей [2].

Первоначальная теоретическая и экспериментальная работа по проекту “Сангвин” была проведена между 1958 и 1963 годами в лаборатории Дэвида Сарноффа RCA в Принстоне, штат Нью-Джерси. Для оценки полезности системы в конце 1960-х годов в течение почти десяти лет испытательный центр Висконсина использовался для отправки сообщений в диапазоне 40-50 Гц и 70-80 Гц подводным лодкам в Атлантическом, Тихом океанах и под ледяной шапкой Арктики [3]. Кроме того исследовалось воздействие установки на окружающую среду [4]. В настоящее время по экономическим и политическим причинам комплекс законсервирован с 2004 года.

В СССР существовала своя программа СНЧ связи с подводными объектами. В 1972 было принято решение о создании на Кольском полуострове СНЧ комплекса “Зевс”. Проведенные научно-исследовательские работы позволили выбрать область для размещения антенн в месте, где Земная кора обладает крайне низкой проводимостью в 10^{-5} См/м до глубин в 10-15 км, что обеспечивает высокий магнитный момент источника [5]. В 1985 году завершилось строительство и государственные испытания объекта [6].

Комплекс состоит из двух генераторов, нагруженных на две горизонтальные параллельные антенны вблизи от западных заземленных концов. Антенны имеют длину около 60 км и расположены с востока на запад (EW). Передатчик работает в диапазоне от 20 до 200 Гц и обеспечивает ток в антеннах от 200 до 300 А [7]. В настоящее время находится в эксплуатации ВМФ.

Также интерес к разработке комплексов передачи в диапазоне КНЧ-СНЧ проявляют Китай и Индия, однако, эти проекты засекречены и достоверной информации о их реализации не удалось обнаружить.

Помимо постройки стационарных КНЧ-СНЧ комплексов управления подводными и подземными объектами с монохроматическим низкочастотным сигналом, начиная с середины 60-х годов в США [8; 9], а позднее в Канаде [10], Южной Африке [11] и СССР [12] проводились эксперименты по импульсной генерации КНЧ полей для исследования строения литосферы с помощью промышленных ЛЭП.

В исследованиях на территории США [8] с помощью линий электропередач длиной от 100 до 200 км с током 200 – 300 А генерировались электромагнитные поля в диапазоне 0.02 – 5 Гц, что позволило обнаружить аномалии проводимости на глубинах до 70 км. Позднее сходные методы на более короткой линии в 37 км были использованы в Канаде, приведя к построению трехслойной модели литосферы до глубины в 25 км. Подобные исследования велись вплоть до конца 1970-х годов, различаясь только длиной используемых линий, которые достигали 600 км [13].

Однако результаты вышеуказанных зондирований характеризуются значительным разбросом данных, в том числе из-за несовершенства приемной аппаратуры, обладающей невысокой чувствительностью. Поэтому дальнейшее развитие подобных исследований связано с увеличением силы тока. Так в Южной Африке в течении 1973-1975 годов была проведена серия генераций с током до 3000 А [14], а в СССР [12] были проведены исследования на линии “Волгоград-Донбасс” с токами до 1400 А.

С 1976 годов по 1990 год на Кольском полуострове в рамках эксперимента “Хибины” велось зондирование литосферы при помощи уникального оборудования – заводненного импульсного магнито-гидродинамического (МГД) генератора [15]. Заводнение МГД генератора на два залива по разные стороны полуострова Рыбачий позволило использовать акваторию заливов и Баренцева моря в качестве естественного морского контура. В результате в нем создавался ток до 22 кА, но 90% энергии импульса приходилось на частоты меньше 0.25 Гц [12]. По результатам этих экспериментов была построена карта проводимости Кольского полуострова, выявлены основные блоки, с отличающейся на порядки проводимостью, обнаружены токопроводящие каналы, в дальнейшем интерпретированные как разломы в Земной коре.

Несмотря на успехи импульсного зондирования, работать с монохромным сигналом лучше, так как проще контролировать распределение тока как

пространственное, так и частотное. Поэтому в середине 90-х, когда в рамках конверсии стало возможным использовать упомянутый выше комплекс “Зевс” для геофизических целей, был проведен ряд исследовательских работ с использованием КНЧ-СНЧ полей, в том числе с участием автора.

В частности, было выявлено влияние лунных приливов на проводимость литосферы [16], проведено частотное электромагнитное зондирование Земной коры [7; 17], экспериментально показано влияние ионосферы на КНЧ поле вблизи источника [18; 19], обнаружено увеличение вертикальной компоненты магнитного поля на разломах в литосфере [A37; A1], проведено электромагнитное зондирование Кольского залива [A2]. Рассмотрено влияние солнечного затмения на распространение СНЧ поля [A3].

Результат развития приемной и передающей аппаратуры, а также опыт конверсионного использования источника “Зевс” [20], привели к тому, что в двухтысячных годах стало возможно использовать достаточно компактные генераторы синусоидального тока, нагруженные на ЛЭП, электромагнитное поле от которых более чем на порядок превышает естественный электромагнитный шум на расстояниях до 1000 км. В результате были проведены эксперименты FENICS-2007 и FENICS-2009 по глубинному электромагнитному зондированию литосферы Фенноскандинавского щита с использованием двух взаимноортогональных ЛЭП Л-401 и Л-154 [21]. Полученный в них опыт был использован автором для исследований литосферы и ионосферы в ходе экспериментов FENICS-2014 и FENICS-2019, что и нашло отражение в данной работе.

Характерной особенностью рассматриваемого диапазона электромагнитных волн является их глубокое проникновение в литосферу и ионосферу. Это создает преимущество в их использовании в задачах дистанционного зондирования окружающей среды, но, с другой стороны, в настоящее время в силу малой изученности параметров внешней ионосферы и глубинных слоев литосферы затрудняет решение задачи о возбуждении и распространении КНЧ-СНЧ поля.

Поэтому в настоящее время перед исследователями стоит как задача развития теории прямых задач, так и проведение натуральных экспериментов для подтверждения теоретических представлений. Следует отметить, что имеются две характерные области в пространстве, связанные с возбуждением и распространением низкочастотных волн. Это область вблизи передатчика, где формируется 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, целесообразно рассмотреть 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 электромагнитного поля 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 требуется решать строгую электродинамическую задачу. На небольших расстояниях, значительно меньших радиуса Земли, можно пренебречь сферичностью волновода и рассматривать задачу в плоском приближении.

Вычисление электромагнитного поля, возбуждаемого источником на границе раздела между двумя полупространствами с разной проводимостью, в удобном для использования виде было предложено В. А. Фоком [22]. В дальнейшем эта работа получила развитие и послужила обоснованием импедансного подхода в задачах электроразведки [23—26]. Для обобщения на неоднородные среды обычно используется метод возмущений [27]. При этом считается, что влиянием ионосферы на расстояниях меньших или сравнимых с высотой эквивалентного волновода можно пренебречь.

Что касается волновой зоны, то Р. Р. Bannister разработал в рамках импедансного подхода теорию распространения радиоволн в волноводе Земля-ионосфера в диапазоне СНЧ, которая затем была обобщена J. P. Casey в работе [28]. В середине 90-х годов были начаты теоретические работы в КНЧ диапазоне. В. В. Кирилловым проведено обобщение теории телеграфного уравнения [29] на КНЧ диапазон [30—32].

При помощи метода телеграфного уравнения были исследованы частные модельные задачи, учитывающие сферичность Земли, гиротропию и неоднородность ионосферы [33], но не получено решение, одновременно учитывающее все указанные свойства среды [34]. Кроме того в методе имеются ограничения на минимальное расстояние от источника, не учитываются реальная проводимость литосферы на больших глубинах, а также структура проводимости ионосферы, особенно в высоких широтах.

Цель и задачи работы

Целью данной работы является теоретические и экспериментальные исследования возбуждения и распространения электромагнитных полей КНЧ–СНЧ диапазона, генерируемых горизонтальным источником в волноводе Земля-ионосфера, включающие натурные измерения полей и построение теории, объясняющей результаты проведенных экспериментов по генерации и приему полей в диапазоне 0.2–300 Гц.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследовать особенности возбуждения КНЧ–СНЧ электромагнитных волн на расстояниях от источника, не превышающих или сопоставимых с высотой эквивалентного волновода. Для этого было необходимо:
 - 1) решить задачу распространения радиоволн, излучаемых линейной заземленной (заводненной) антенной, находящейся на границе двух сред. Получить аналитические выражения, применимые в широком диапазоне расстояний от источника, включая зону вблизи источника;

- 2) обобщить это решение на случай слоистой подстилающей среды в присутствии однородной ионосферы;
 - 3) теоретически и экспериментально исследовать влияние ионосферы на возбуждение низкочастотного электромагнитного поля горизонтальной заземленной (заводненной) антенной;
 - 4) провести сравнение экспериментальных данных с теоретически ожидаемыми для объяснения изменения фазы сверхнизкочастотного магнитного поля на разломной тектонике, влияния ионосферы и структуры литосферы на амплитуду низкочастотного магнитного поля, а также на поляризационные характеристики низкочастотного магнитного поля при блочной горизонтально неоднородной литосфере.
 - 5) оценить эффективность использования активных источников низкочастотных сигналов для исследования сложных, включающих разломы, геологических структур (на примере района Кольского залива).
2. Исследовать поведение КНЧ–СНЧ поля в волновой зоне. В том числе:
- 1) проанализировать особенности изменения сверхнизкочастотного поля в областях с низкой проводимостью литосферы;
 - 2) оценить влияние ионосферы на магнитное поле контролируемого источника;
 - 3) исследовать влияние солнечного затмения на распространение СНЧ волн;
 - 4) показать влияние внешней ионосферы на распространение КНЧ поля. Сопоставить результаты измерений естественного электромагнитного шума и активного КНЧ сигнала.

Методы исследования

При решении поставленных задач в работе были использованы классические в области математической физики и электродинамики методы математического анализа для описания распространения электромагнитных волн в плоскостроистой среде. При компьютерном моделировании для интегральных представлений компонент электромагнитного поля был применен известный метод Лонгмана [35], разработанный для вычисления интегралов с быстроосциллирующей подынтегральной функцией. При обработке результатов радиофизических измерений использовались методы спектрального анализа на основе метода Уэлча [36].

Научная новизна

1. В рамках квазистационарного приближения впервые получено аналитическое решение для потенциалов и полей, возбужденных горизонтальной заземленной (заводненной) 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 плоскослоистой среды определены границы применимости квази-стационарного приближения, а также импедансного подхода описания проводимости литосферы.
3. Впервые теоретически и экспериментально оценено влияние ионосферы на КНЧ поле на расстояниях, не превышающих или сопоставимых с высотой эквивалентного ионосферного волновода.
4. Впервые в практику исследований с активным крайним низкочастотным сигналом введены поляризационные измерения, показавшие их эффективность для неоднородной структуры литосферы.
5. Был выполнен ряд оригинальных экспериментальных исследований по влиянию ионосферы и литосферы на электромагнитное поле СНЧ-КНЧ диапазона как в ближней, так и в волновой зонах.

Теоретическая и практическая значимость

Предложенные в работе методики расчета поля заземленного (заводненного) диполя могут быть использованы для моделирования задач связи и управления подводными или подземными объектами. Кроме того, как показано в экспериментах, низкочастотные электромагнитные поля могут быть использованы как для изучения строения литосферы, так и ионосферы (нижней и внешней), локализации источников подземных (подводных) электромагнитных полей, а также для выявления источников Альвеновских резонансов в естественном электромагнитном шуме.

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении 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 уникальной радиотомографической установки ПГИ КНЦ РАН и измерителей магнитного поля диапазона 0.1 – 20 Гц»), 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 РФФ 22-17-00208 «Глубинные электромагнитные зондирования литосферы с естественными и мощными контролируруемыми 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».

Достоверность полученных результатов обеспечивается соответствием изложенных теоретических положений и экспериментальных работ. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Личный вклад

Автор внес определяющий вклад во все направления исследовательской работы. Принимал активное участие в аналитических расчетах, постановке и проведении экспериментальных работ, в обработке данных измерений и теоретической интерпретации результатов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на:

1. II Международной Нобелевской конференции “Инновационные электромагнитные методы геофизики”. Салехард, 2010 [A20].
2. Всероссийской школе-семинаре имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваныяна по электромагнитным зондированиям Земли. Санкт-Петербург, 2011 [A21; A22].
3. 36-м Апатитском семинаре “Физика авроральных явлений”. Апатиты, 2013 [A23; A24].
4. III-й Всероссийской конференции “Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды”. Санкт-Петербург, 2014 [A25].
5. Всероссийской конференции “РРВ–24”. Иркутск, 2014 [A26].
6. 2-м Всероссийском (с международным участием) научно-практическом семинаре “Квази-3D модель электропроводности, температуры и реологии литосферы восточной части Балтийского щита по результатам электромагнитных зондирований с естественными и мощными контролируруемыми источниками”. Апатиты, 2018 [A27].
7. V-й Всероссийской научной конференции “Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды”. Санкт-Петербург, 2018 [A28].
8. 42-м Апатитском семинаре “Физика авроральных явлений”. Апатиты, 2016 [A29].
9. Всероссийской конференции “РРВ–26”. Казань, 2019 [A30; A4].
10. 43-м Апатитском семинаре “Физика авроральных явлений”. Апатиты, 2016 [A31].

11. VI-й Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Санкт-Петербург, 2020 [A32].
12. XXVII Всероссийской открытой научной конференции “Распространение радиоволн”. Калининград, 2021 [A33].
13. Всероссийской научно-технической конференции “Антенны и распространение радиоволн 2021 (АРР’21)”. Санкт-Петербург, 2021 [A34].
14. Научно-практическом семинаре “Исследование магнитного поля Земли как фактор прогресса национальной безопасности России” 12 мая 2022, Санкт-Петербург [A35].

Положения выносимые на защиту

1. Разработан аналитический метод расчета потенциалов и полей в области ниже границы раздела для заземленного (заводненного) 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 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. На основе выполненных экспериментальных и теоретических исследований 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 с частотой КНЧ поля и дана его теоретическая интерпретация.

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 41 печатном издании, 19 из которых изданы в журналах, включенных в список ВАК или в международные реферативные базы Scopus и Web of Science, 17 — в тезисах докладов.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена рассмотрению задачи распространения радиоволн, излучаемых заземленным (заводненным) источником, находящимся на границе двух сред. Выполнен переход от уравнений Максвелла к системе уравнений для электрического вектора-потенциала. Произведен переход от системы дифференциальных уравнений к интегральной форме электрического вектора-потенциала.

На основе этих представлений произведен расчет потенциала и электромагнитных полей, возбуждаемых в двухслойной среде линейной горизонтальной или находящейся на поверхности воды с заводненными электродами антенной длиной $2L$ (рис. 1). Для потенциала и полей в области ниже поверхности разде-

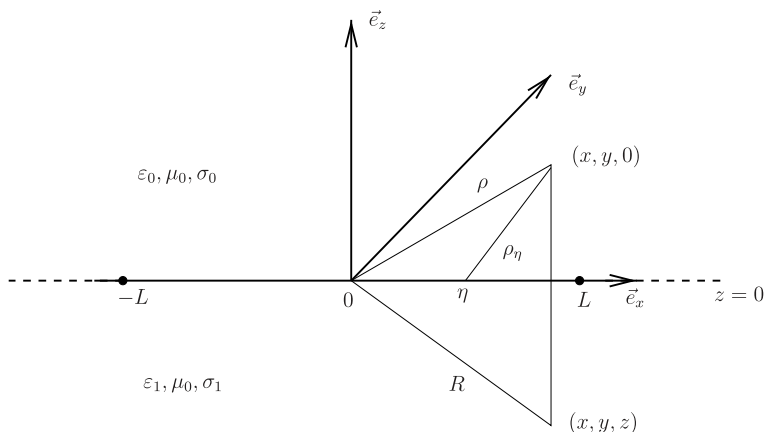


Рис. 1 — Геометрия задачи.

ла сред рассмотрено квазистационарное приближение, в котором пренебрегают Максвелловским током смещения по сравнению с током проводимости. В результате общие формулы представлены через хорошо изученные специальные функции (модифицированные функции Бесселя). Рассмотрение предельных областей (границы раздела сред и удаленных на несколько скин-слоев от источника) показывает, что потенциал, магнитное поле и горизонтальные составляющие электрического поля могут быть представлены в удаленных областях в виде произведения поля в соответствующей точке на границе раздела и экспоненциальной функции.

Показано, что поведение компоненты магнитного поля H_x на границе раздела определяется функцией

$$F_x = r_1 \left(1 - \frac{r_0^2}{r_1^2} \right) \int_0^\infty \frac{1}{(\tau_1 + \tau_0)(\tau_0 + r_0^2/r_1^2 \cdot \tau_1)} J_1(s) s^2 ds, \quad (1)$$

$r_j = \rho \varkappa_j$, $\tau_j = \sqrt{s^2 + r_j^2}$, $j = 0, 1$ – безразмерные величины, определяющиеся геометрией задачи и электромагнитными характеристиками среды,

$$\varkappa_j = -i \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_0} + i \frac{\sigma_j}{\omega \varepsilon_0}}.$$

При $|\varkappa_0^2/\varkappa_1^2| \ll 1$ получено простое представление для выражения (1)

$$F_x|_{|\varkappa_0^2/\varkappa_1^2| \ll 1} = r_1 I_1 \left(\frac{r_1 - r_0}{2} \right) K_1 \left(\frac{r_1 + r_0}{2} \right) + \frac{r_1 r_0}{2} \left[I_0 \left(\frac{r_1 - r_0}{2} \right) K_1 \left(\frac{r_1 + r_0}{2} \right) + I_1 \left(\frac{r_1 - r_0}{2} \right) K_0 \left(\frac{r_1 + r_0}{2} \right) \right], \quad (2)$$

при $|r_1 \pm r_0|/2 \gg 1$ имеющее асимптотическое представление

$$F_x \sim (1 + r_0) \exp(-r_0), \quad |r_1 \pm r_0|/2 \gg 1. \quad (3)$$

На основе численного интегрирования функции F_x оценены границы применимости формулы (2) и приближения (3) (рис. 2). Видно, что для однородного полупространства приближенная формула (2), определяющая поперечную составляющую магнитного поля H_x , полученная в предположении $|\varkappa_0/\varkappa_1| < 1$, достаточно полно описывает поведение поля и дает хорошее количественное согласие с точными формулами. Причиной такого совпадения являются осциллирующие функции Бесселя в подынтегральных выражениях, из-за которых вклад в интеграл областей с большими значениями переменной интегрирования мал.

Остальные компоненты поля выражаются через похожие функции и к ним применимы те же методы анализа, приводящие к аналогичным результатам. В СНЧ-КНЧ диапазоне при низкой проводимости подстилающей среды, характерной для Кольского полуострова, границы применимости квазистационарного приближения для полей сужаются, поэтому предложены более широко применимые представления. Отмечено, что в отличие от полей, поверхностный импеданс совпадает с импедансом плоской волны в более широком, чем ограниченным квазистационарным приближением диапазоне проводимостей подстилающей среды.

Далее решена задача возбуждения электромагнитных волн горизонтальным диполем, расположенным на границе раздела между вакуумом и проводящей слоистой средой. Это позволило оценить эффективность подхода к

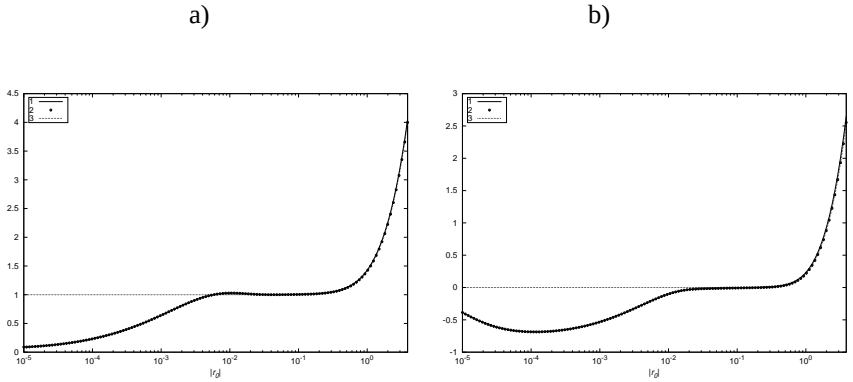


Рис. 2 — Зависимость от безразмерного расстояния $|r_0|$ модуля (а) и аргумента (б) функции $F_x - 1$, аппроксимации (2) – 2 и функции $(1 + r_0) \exp(-r_0) - 3$ для горизонтального диполя на границе двух однородных сред.

определению поля при малости длины волны в проводящей среде по сравнению с вакуумом. Сравнение численных расчетов по точным и приближенным формулам, аналогичное проведенному для (1), показало целесообразность такого подхода как в задаче с однородным полупространством, так и для слоистой среды.

Для расстояний от источника, превышающих величину скин-слоя любого из проводящих слоев, найдено асимптотическое представление для магнитного поля на границе раздела между плоскострой Землей и атмосферой, имеющее вид волны в однородном полупространстве с коэффициентом возбуждения, зависящим от эффективной проводимости нижнего полупространства.

Во **Второй главе** рассмотрено возбуждение горизонтальным заземленным вибратором плоского волновода Земля-ионосфера. Из системы дифференциальных уравнений для вектора-потенциала получено его интегральное представление. При этом выражения для компонент поля определяются функциями F_x и F_z , подобными рассмотренным в главе один, с изменениями описывающими влияние ионосферы.

С помощью численного моделирования, аналогичного проведенному в главе один, показано, что изменение высоты ионосферы изменяет общий уровень амплитуды горизонтальных компонент магнитного поля во всем диапазоне частот, в то время как вариации проводимости ионосферы изменяют амплитуду лишь в некоторой области частот, не превышающей 10 Гц (рис. 3). То есть в низкочастотных областях имеется чувствительность поля к состоянию ионосферы даже на расстояниях, не превышающих удвоенную высоту волновода.

Что касается вертикальной компоненты магнитного поля, то численные расчеты показывают, что на небольших расстояниях от источника ($\rho \rightarrow 0$)

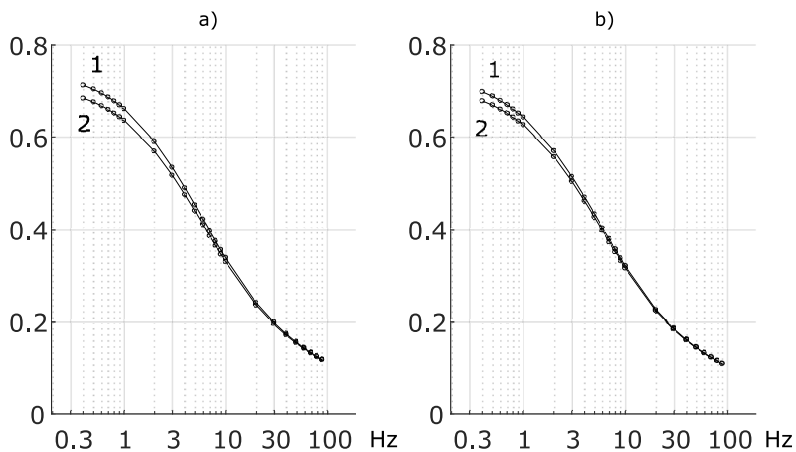


Рис. 3 — Расчетные значения $|F_x/r_g|$ при высотах ионосферы 70 км (а) и 85 км (б) и проводимостях $\sigma_i = 10^{-4}$ См/м (кривые 1) и $5 \cdot 10^{-4}$ См/м (кривые 2).

влияние ионосферы пренебрежимо мало и увеличивается по мере роста ρ . Исключение составляют очень низкие частоты, меньше нескольких Гц, для которых при проводимости ионосферы $\sigma_i = 10^{-4}$ См/м, сопоставимой с проводимостью Земли, для $0 < \rho \leq 2h$ заметно влияние ионосферы (рис. 4).

При значительном удалении от источника поле на поверхности Земли формируется суммой полей волн, распространяющихся в ионосфере и Земле. При этом в КНЧ диапазоне вклад составляющей поля в вакууме пренебрежимо мал.

Таким образом, исследование временных вариаций магнитного поля позволяет судить о степени возмущенности в ионосфере и пригодности ионосферных моделей для описания КНЧ-СНЧ полей активного источника. Сравнение измерений полей в спокойных и возмущенных условиях позволяет экспериментально проверить выводы, сделанные в главе, а также необходимость использования более сложной модели проводимости ионосферы.

В **Третьей главе** в четырех разделах описаны экспериментальные исследования распространения низкочастотных волн, возбуждаемых горизонтальной заземленной антенной.

В **первом разделе** исследуется сверхнизкочастотное поле заземленного горизонтального электрического диполя на высокоширотной субмеридиональной трассе с протяженностью до 1000 км (рис. 5).

Отличие от большинства предшествующих работ, в диссертации рассмотрено распространение волн поперёк оси диполя, когда основной компонентой магнитного поля является радиальная в силу геометрии эксперимента.

По измерениям поля на расстоянии менее трёх высот ионосферы найдена частотная дисперсия проводимости земли под источником, определяющая коэффициент возбуждения волновода Земля–ионосфера. Типичные параметры распространения сверхнизкочастотных волн уточнены с учётом специфики

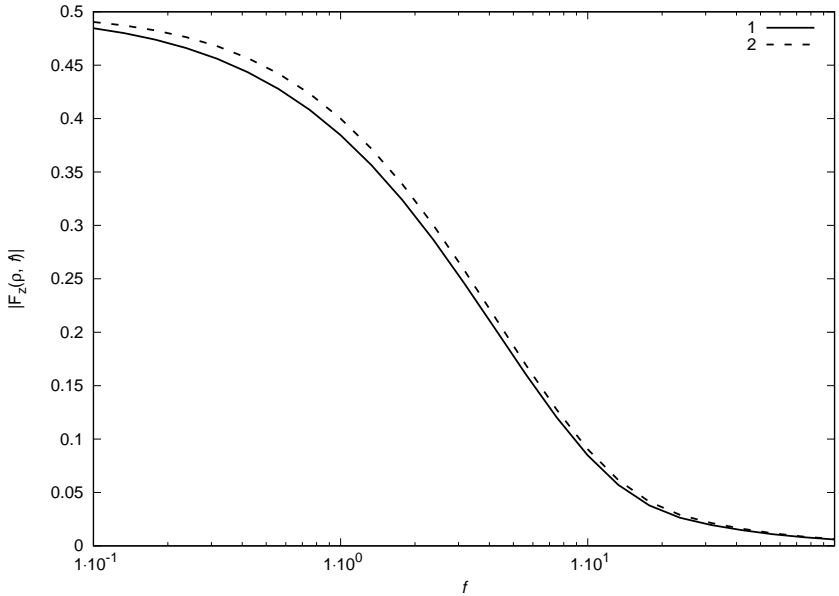


Рис. 4 — Зависимость функции $|F_z(\rho, f)|$ от частоты f при проводимости ионосферы $\sigma_i = 10^{-4}$ См/м — 1 и $\sigma_i = 10^{-5}$ См/м — 2.

используемой в эксперименте трассы. Показана важность учёта проводимости Земли при распространении излучения вдоль низкопроводящих областей (рис. 6). Отмечена теоретическая возможность определения фазовой скорости волны по отношению измеренных компонент магнитного поля на больших расстояниях.

Второй раздел посвящен наблюдениям за распространением искусственных радиоволн с частотой 82 Гц в волноводе Земля-ионосфера во время солнечного затмения на частично и полностью затененных трассах протяженностью 450–1200 км (рис. 7 и табл. 1).

Возбуждение контролировалось путем синхронных измерений поля вблизи передатчика, независящих от состояния ионосферы. Обнаружена вариация амплитуды поля в удаленных точках, близкая по времени к проходящему затмению (рис. 8).

Особенности вариаций связаны также с динамикой угла возвышения Солнца. Предварительный анализ показывает, что изменения структуры нижней ионосферы во время затмения могут качественно сводиться к уменьшению эффективной высоты отражения СНЧ-волн. Наблюдаемые эффекты показывают реакцию распространяющегося поля на изменения структуры ионосферной



Рис. 5 — География эксперимента.

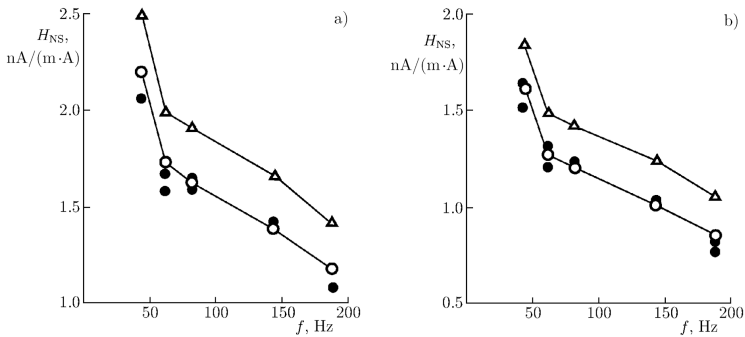


Рис. 6 — Результаты расчетов и измерений для компоненты H_{NS} в Петрозаводске – а и в Сторожно – б. \triangle – оценка с электродинамическими параметрами Баннистера, \circ – оценка со скорректированными электродинамическими параметрами, \bullet – экспериментальные данные.

стенки волновода и впервые наблюдались в этом частотном диапазоне во время солнечного затмения.

Таблица 1 — Характерные времена и относительные величины затмения для каждой точки в эксперименте.

Пункт наблюдений	Начало, УТ	Максимум, УТ	Окончание, УТ	Максимальная фаза, %
Источник, Ловозеро	09.14	10.18	11.22	86.9
Баренцбург	09.11	10.10-10.12	11.12	100
Лехта	09.12	10.18	11.24	78.6
Петрозаводск	09.11	10.18	11.24	73.5

Третий раздел об изменениях фазы сверхнизкочастотного магнитного поля на разломной тектонике. В нем описан эксперимент (рис. 9) по измерению фаз трех компонент напряженности магнитного поля мощного контролируемого источника излучения сверхнизкочастотного диапазона вдоль двух ортогональных направлений на разломной тектонике. В ходе эксперимента обнаружены резкие изменения фазы величиной около 180° между некоторыми точками измерения (рис. 10). Установлена их связь с токопроводящими геологическими разломами и, соответственно, возможность локализации таких разломов (рис. 11).

Четвертый раздел содержит описания и результаты двух экспериментов по электромагнитному зондированию мощным удаленным источником Кольского залива Баренцева моря.

В первом (рис. 12а) сравнивались результаты одновременных исследований электромагнитных шумов на дне Кольского залива и на острове вблизи точки погружения аппаратуры, а также в обсерватории, расположенной на значительном расстоянии от места измерения в заливе. Показано влияние разломной тектоники на структуру естественного магнитного поля, приводящее к усилению его вертикальной составляющей в заливе.

Во втором натурном эксперименте (рис. 12b) сигналы на нескольких частотах порядка десятков Гц от удаленного мощного сверхдлинноволнового передатчика были зарегистрированы в шести точках дна на профиле, пересекающем Кольский залив. Несмотря на то, что по техническим причинам не в каждой точке все шесть компонент были успешно записаны, в целом, качество экспериментальных данных оказалось вполне пригодным для интерпретации.

В результате априорная геоэлектрическая модель района Кольского залива, построенная на основе обобщения предшествующих геолого-геофизических данных, в частности, на данных наземного магнитотеллурического зондирования и магнитотеллурического профилирования, привела к величинам полей далеким от экспериментально измеренных. Однако пошаговая модификация исходной модели привела к вполне удовлетворительному совпадению полей. Результирующая модель позволяет внести коррективы в имеющиеся региональные геолого-геофизические представления, особенно касающиеся разломной тектоники.

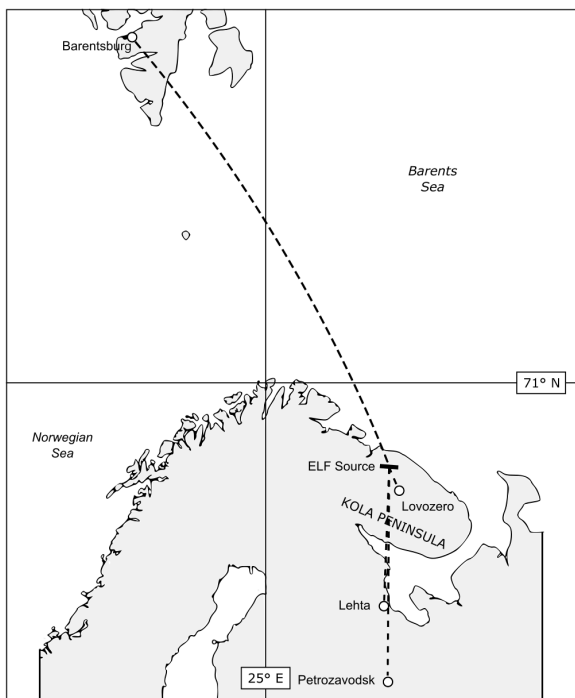


Рис. 7 — География эксперимента.

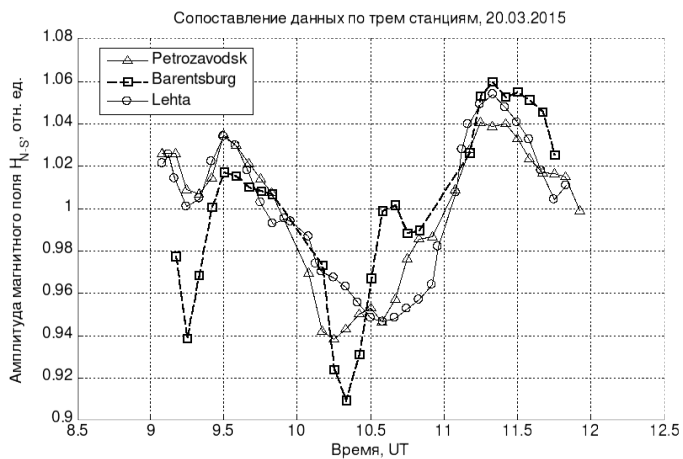


Рис. 8 — Относительные вариации поля в пунктах наблюдений во время затмения.

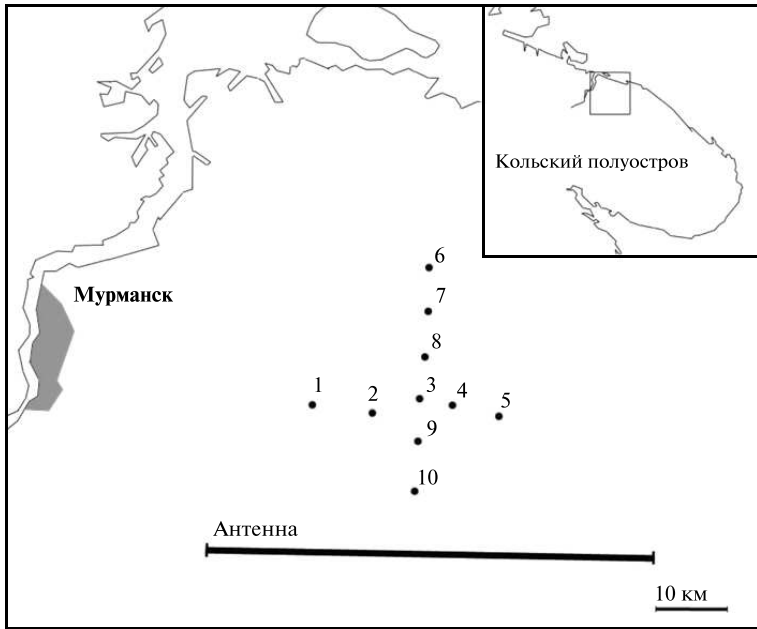


Рис. 9 — Схема эксперимента.

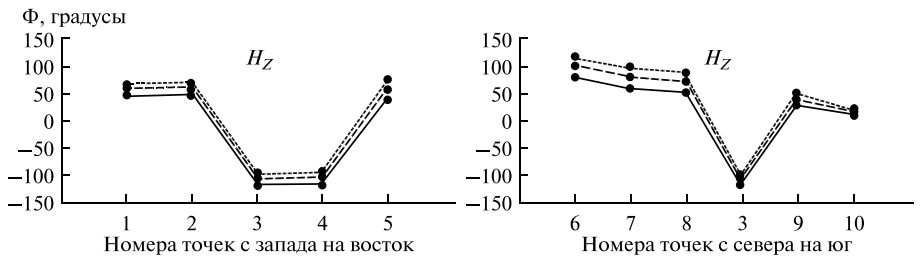
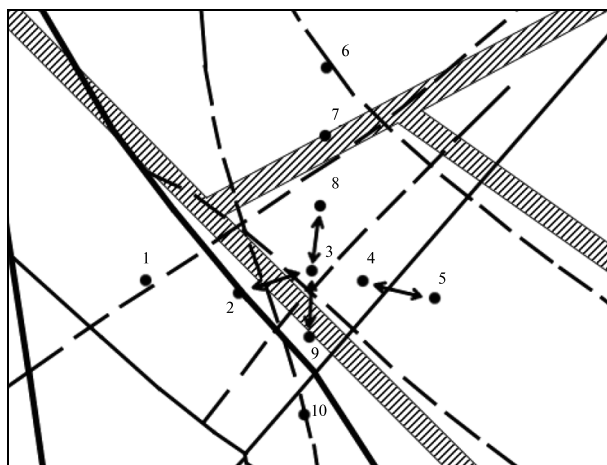


Рис. 10 — Распределения фазы вертикальной компоненты магнитного поля H_z по широтной и меридиональной трассам. Сплошная линия – частота 41 Гц, пунктирная линия – 62 Гц, точечная линия – 82 Гц.

Четвертая глава содержит два подраздела, описывающих 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.

Экспериментальные исследования (рис. 13) показали наличие вариаций амплитуды (рис. 14) и поляризационных характеристик поля (схема проведения



- Условные обозначения
- Геологические разломы достоверные
 - - - Геологические разломы предполагаемые
 - ▨ Проводящие структуры теоретической модели из [Велихов и др., 2011]
 - ↔ Области, где наблюдаются скачки фазы вертикальной компоненты магнитного поля

Рис. 11 — Сравнение результатов эксперимента с проводящими структурами [37] и геологическим строением региона.

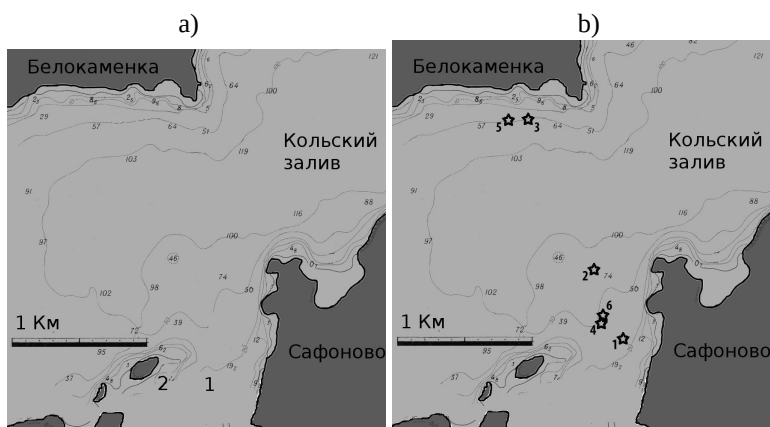


Рис. 12 — Схема экспериментов. а) 1 – место погружения донного регистратора, 2 – остров, на котором установлен переносной магнитометр. б) – точки наблюдений.

эксперимента рис. 15) в нижней части КНЧ диапазона и на более низких частотах в различных геофизических условиях при отсутствии вариаций в диапазоне СНЧ.

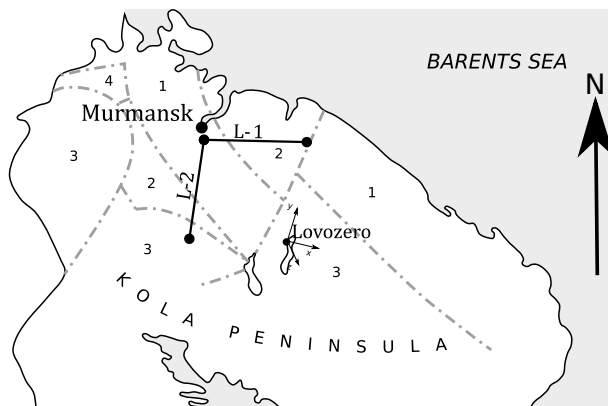


Рис. 13 — Схема эксперимента. Ориентировочная проводимость Земной коры по оценкам из [38]. 1 – 10^{-4} См/м, 2 – $6 \cdot 10^{-5}$ См/м, 3 – 10^{-3} См/м, 4 – 10^{-2} См/м.

Эти особенности поведения поля подтверждены теоретическими расчетами, показывающими, что при низкой проводимости земли влияние ионосферы в ближней зоне может быть заметным.

Полученные результаты следует принимать во внимание в задачах глубинного зондирования земли и мониторинга состояния ионосферы с применением контролируемых источников, в особенности, при работах на экстремально низких частотах в областях с низкой проводимостью Земли.

Далее рассмотрено влияние крупномасштабных неоднородностей проводимости литосферы на генерацию низкочастотного электромагнитного поля в предыдущем эксперименте. Передающие антенны L-1 и L-2 располагались в областях с разной проводимостью (рис. 13). Использование модели двухслойной литосферы позволило объяснить особенности поведения принятого поля в ближней зоне. В ходе расчетов получено совпадение экспериментальных данных и теоретических оценок для амплитуд горизонтальных компонент магнитного поля и, соответственно, его большей оси эллипса поляризации. Наблюдаемые различия в направлении эллипса поляризации и эллиптичности скорее всего являются следствием разломов в Земной коре, а также анизотропией образующих ее пород. Таким образом, применение плоскостойкой модели литосферы с однородными слоями имеет не только методическое значение, но и практический результат.

Во **втором подразделе** представлены результаты экспериментов по генерации и приему электромагнитных полей крайне низкочастотного диапазона.

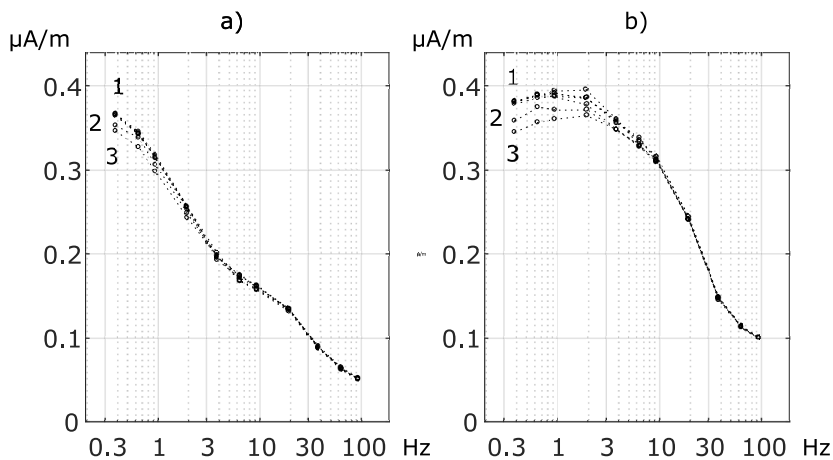


Рис. 14 — Зависимость амплитуды магнитного поля от частоты при силе тока в передающей антенне 1 А в сеансах 23-29 августа 2014 г. (обс. Ловозеро) — компоненты H_{W-E} (а) и H_{N-S} (б). Обозначения кривых: 1 — измерения 23-27.08.2014 г., 2 — 28.08.2014 г., 3 — 29.08.2014 г.

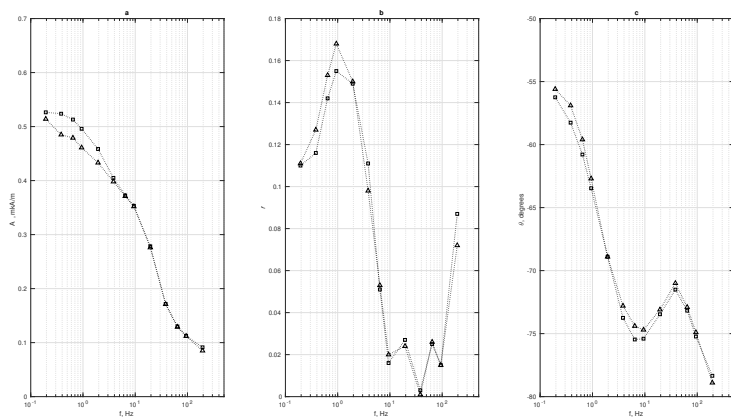


Рис. 15 — Поляризационные характеристики измеренного магнитного поля: а – большая полуось эллипса поляризации; б – коэффициент эллиптичности; с – ориентация большой полуоси эллипса в горизонтальной плоскости в системе координат измерителя. Квадраты – данные 23.08.2014 г., треугольники – 29.08.2014 г.

В одном из них в дневное время осуществлялся синхронный прием монохроматического сигнала в двух удаленных пунктах – на расстояниях 760 и 900 км от источника (рис. 16).

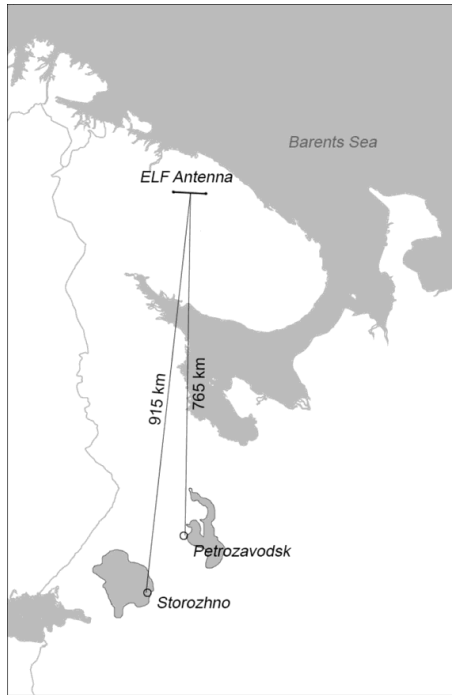


Рис. 16 — Карта-схема области проведения эксперимента.

Установлено, что в дневное время возможен немонотонный характер зависимости амплитуды от частоты (рис. 17a-b). В ночное время (рис. 17c-d)

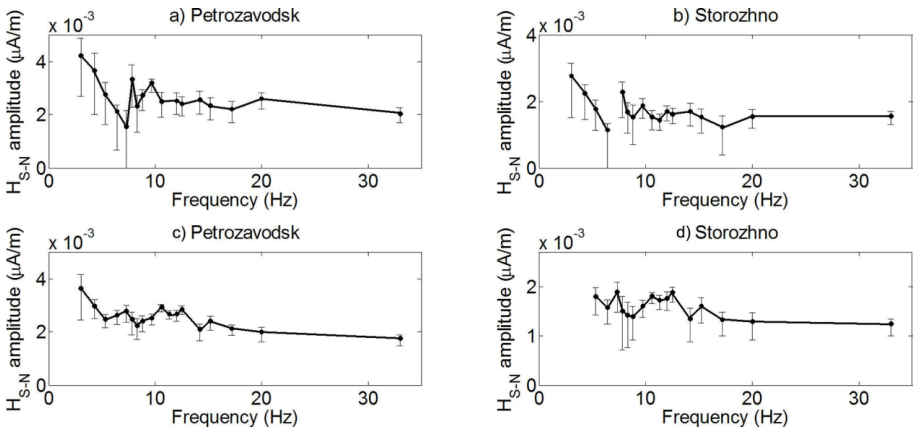


Рис. 17 — Измеренные в эксперименте амплитуды компоненты H_y магнитного поля. a-b первый сеанс, c-d – второй.

аналогичные осцилляции объясняются специфической структурой профиля электронной концентрации во внешней ионосфере. Просачивание КНЧ-волн во внешнюю ионосферу днем возможно в высоких широтах благодаря наличию главного ионосферного провала, который не описывается имеющимися эмпирическими моделями субавроральной ионосферы. Поэтому при высокоширотном расположении источника или трассы распространения осцилляции импеданса ионосферы и изменения амплитуды поля с частотой могут возникать и в дневное время. Таким образом, более высокая чувствительность КНЧ-волн (по сравнению с СНЧ) к изменениям во внешней ионосфере открывает хорошие возможности использования этого диапазона в исследованиях околоземного пространства.

В следующем эксперименте рассмотрено влияние ионосферы на возбуждение волн крайненизкого и более низкого частотного диапазона контролируемым источником в волноводе Земля-ионосфера в ночное время. Описан эксперимент, выполненный на Кольском полуострове (рис. 18). Приведены статистически на-

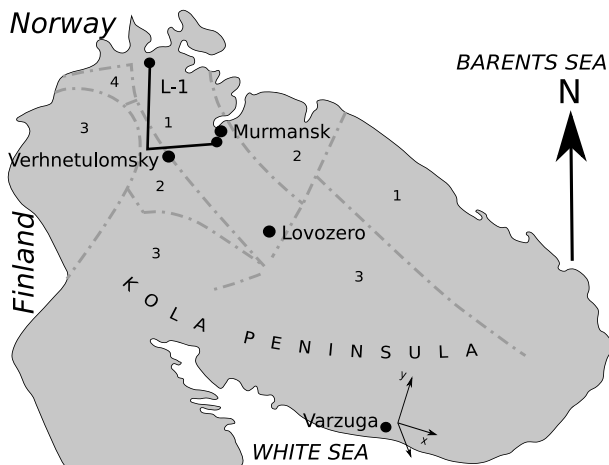


Рис. 18 — Схема эксперимента FENICS-2019. Ориентировочная проводимость Земной коры [38] 1 – 10^{-4} См/м, 2 – $6 \cdot 10^{-5}$ См/м, 3 – 10^{-3} См/м, 4 – 10^{-2} См/м.

дежные результаты измерений поля в диапазоне частот 0.4 – 95 Гц. На рис. 19 показаны значения горизонтальных компонент магнитного поля с доверительными интервалами на примере первого дня измерений. Выявлен немонотонный характер изменения горизонтальных компонент магнитного поля с частотой.

На рис. 20 представлены результаты измерения тангенциальной составляющей $|H_{\tau}| = \sqrt{|H_{SN}|^2 + |H_{WE}|^2}$ магнитного поля активного сигнала. Видно, что они разделяются на две различающиеся между собой в низкочастотной области группы: одна, относящаяся к 11–13 сентября, другая – к 14–16 сентября,

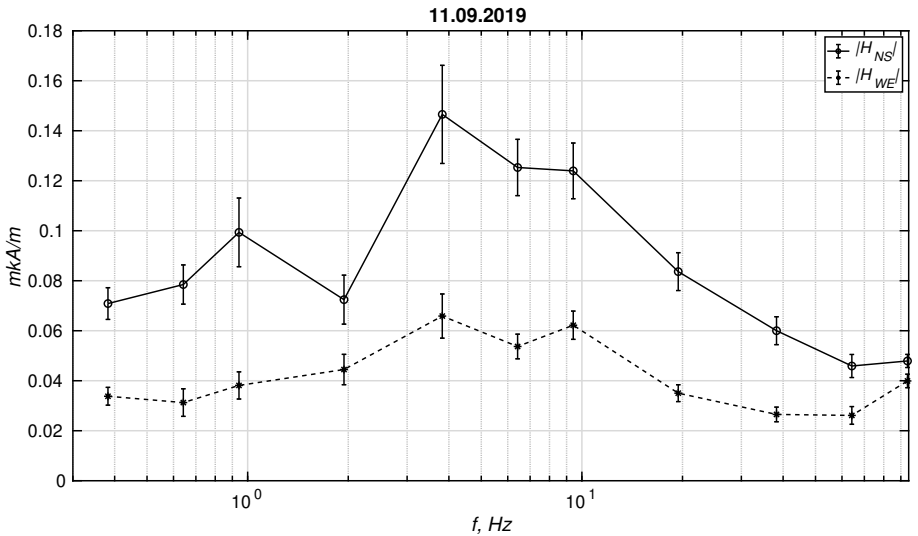


Рис. 19 — Амплитуды горизонтальных компонент магнитного поля 11.09.2019.

то есть к спокойным и возмущенным геомагнитным условиям (по данным ближайших к месту измерений обсерваторий Ловозеро и Соданкюля).

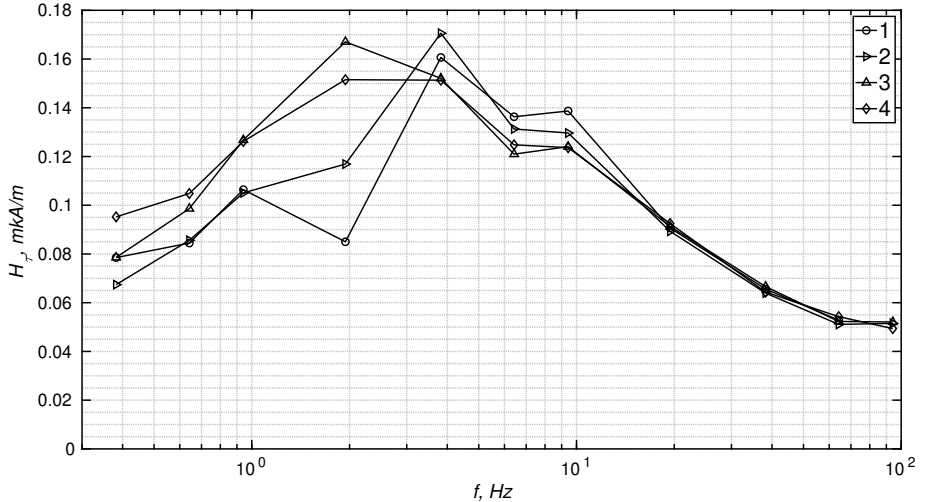


Рис. 20 — Тангенциальная составляющие магнитного поля $|H_{\tau}|$, 1 – 11.09.2019, 2 – 12.09.2019, 3 – 14.09.2019, 4 – 15.09.2019.

Отличие в группах, наблюдаемое в низкочастотной области, можно связать с изменениями, происходящими во внешней ионосфере [32], то есть с различным

характером взаимодействия поля с ионосферой. При этом во всех регистрациях присутствовало отражение от внешней ионосферы, что видно по немонотонному ходу низкочастотной части магнитного поля активного сигнала и практически совпадающими изменениями поля на частотах больше 10 Гц в разные дни.

В дни эксперимента проводилась фактически непрерывная регистрация естественных электромагнитных шумов в точке наблюдения. На рис. 21 приведена сонограмма $|H_y|$. На ней показано, что вплоть до начала магнитосферной

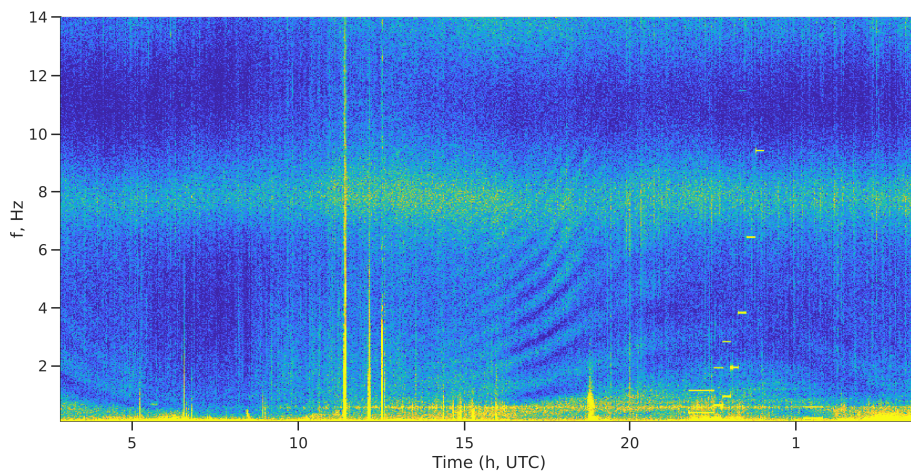


Рис. 21 — Сонограмма составляющей магнитного поля $|H_y|$ в условных единицах 14–15 сентября 2019.

суббури 14 сентября, регистрировались альвеновские резонансы. При этом перед бурей гармоники сдвинулись в область высоких частот и превысили частоту первого шумановского резонанса. С началом суббури высокочастотные альвеновские спектральные полосы исчезают, при этом низкочастотные составляющие теряют интенсивность, и их частота перестает увеличиваться. По окончании суббури амплитуда низкочастотных составляющих увеличивается, а частота падает со временем до прекращения регистрации на фоне низкочастотного шума.

Совместное наблюдение вариаций поля активного источника (обусловленное отражением от внешней ионосферы, то есть возможностью существования альвеновского резонатора) и проявления альвеновских резонансов в регистрации естественного шума способствует пониманию источника альвеновских резонансов в высоких широтах. Сравнение этих результатов позволяет отдать предпочтение магнитосферному происхождению источника альвеновских резонансов в высоких широтах.

Теоретические модели (рис. 22), основанные на решении телеграфного уравнения, показывают, что наблюдаемые изменения в поле трудно объяснить

влиянием нижней ионосферы, требуется учет отражений от внешней ионосферы. Отмечено, что в измеряемой частотной зависимости амплитуды поля, кроме

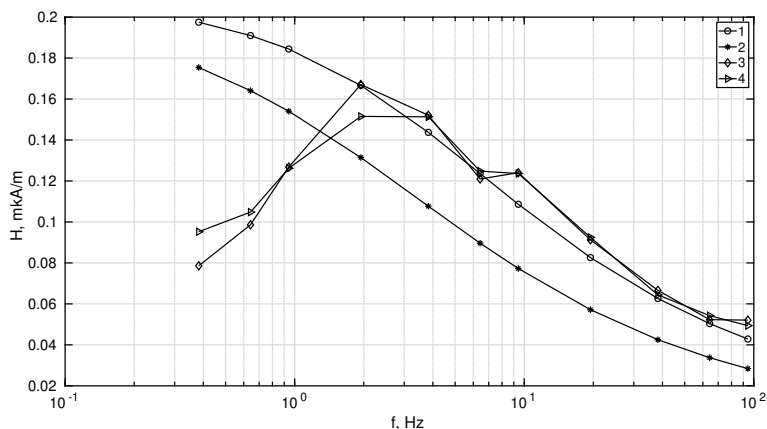


Рис. 22 — Тангенциальная составляющая магнитного поля. Теоретически рассчитанная при магнитной высоте привязки $h_m^* = 70$ км – 1, рассчитанная при $h_m^* = 96,5$ км – 2, по данным измерений 14 сентября 2019 – 3, по данным измерений 14 сентября 2019 – 4.

ионосферы, может играть существенную роль литосфера на трассе распространения, в особенности ее неоднородная структура в области возбуждения поля. Однако, в отличие от меняющегося влияния ионосферы, вклад литосферы постоянен.

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Аналитически решена задача распространения радиоволн, излучаемых элементарным заземленным (заводненным) источником, находящемся на границе двух сред, с обобщением на случай слоистой подстилающей среды. С помощью цифрового моделирования исследовано влияние ионосферы на возбуждение низкочастотного электромагнитного поля горизонтальным заземленным электрическим диполем. Проведено сравнение экспериментальных данных с теоретически ожидаемыми для объяснения изменения фазы сверхнизкочастотного магнитного поля на разломной тектонике, влияния ионосферы и структуры литосферы на амплитуду низкочастотного магнитного поля, а также на поляризационные характеристики низкочастотного магнитного поля при блочной горизонтально неоднородной литосфере.
2. В рамках обобщения квазистационарного приближения впервые получено аналитическое решение для потенциалов и полей ниже границы раздела сред для произвольного, не равного нулю, волнового числа. Для

плоскостной среды определены границы применимости квазистационарного приближения, а также импедансного подхода для описания литосферы.

3. Впервые теоретически и экспериментально оценено влияние ионосферы на КНЧ поле на расстояниях, не превышающих или сопоставимых с высотой эквивалентного ионосферного волновода. Эти результаты показали влияние ионосферы на поле в КНЧ-диапазоне в областях с низкой проводимостью литосферы.
4. Проведены экспериментальные и теоретические исследования влияния разломной тектоники на усиление вертикальной составляющей естественного источника магнитного поля и на фазу контролируемого источника. Оценена эффективность использования активных источников низкочастотных сигналов для исследования сложных, включающих разломы, геологических структур (на примере района Кольского залива). Исследовано поведение КНЧ–СНЧ поля в волновой зоне и влияние на его структуру параметров волновода Земля-ионосфера.
5. Впервые с активным крайним низкочастотным сигналом проведены поляризационные измерения, эффективно демонстрирующие влияние крупномасштабных неоднородных образований в литосфере на поляризационные характеристики горизонтальной компоненты магнитного поля.
6. Был выполнен ряд оригинальных экспериментальных исследований по влиянию ионосферы и литосферы на электромагнитное поле СНЧ-КНЧ диапазона как в ближней, так и в волновой зонах, включая
 - влияние низкопроводящих областей литосферы на затухание СНЧ поля в волноводе Земля-ионосфера;
 - проявление солнечного затмения в амплитуде СНЧ поля в волновой зоне и, соответственно, изменений в проводимости ионосферы;
 - экспериментально обнаруженный в волновой зоне в дневных и ночных условиях немонотонный характер изменения с частотой КНЧ-поля;
 - статистически достоверные результаты измерений в волновой зоне СНЧ-КНЧ поля в различных геофизических условиях и отражающие влияние на поле внешней ионосферы;
 - одновременные наблюдения структуры естественных электромагнитных шумов (Альвовских резонансов) и вариаций поля активного источника;
 - обоснование проявления влияния внешней ионосферы на КНЧ поле путем сопоставления экспериментальных данных и расчетов с использованием телеграфного уравнения.

Таким образом, выполненные в работе исследования показали существенную чувствительность волн диапазонов КНЧ-СНЧ к структуре ионосферы и литосферы. Это приводит к определенным трудностям при расчете полей в этом

диапазоне в реальных условиях. В то же время создает перспективы их применения для исследования окружающего пространства. Они применимы для исследования нижней и внешней ионосферы, глубинной структуры литосферы, в том числе для выявления источников низкочастотного электромагнитного поля в околоземном окружающем пространстве и в подземных областях. Кроме этого, результаты работы полезны при моделировании задач связи и управления подводными или заглубленными объектами.

Приложение А посвящено используемому экспериментальному оборудованию. Рассмотрены особенности передающих систем, используемых в экспериментах. Показаны границы применимости приемной аппаратуры, приведены результаты сравнения различных типов магнитных датчиков.

Приложение Б показывает соответствие между формулой Баннистера и двумерным телеграфным уравнением для однородного волновода Земля-ионосфера.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях, входящих в международную базу цитирования Web of Science

- A1. *Терещенко Е. Д., Терещенко П. Е., Сидоренко А. Е.* Поляризационные характеристики КНЧ–СНЧ магнитного поля, возбуждаемого линейным вибратором [Текст] // Наука и технологические разработки. — 2020. — 2 (99). — С. 5–17.
- A2. Preliminary Results of Marine Electromagnetic Sounding with a Powerful, Remote Source in Kola Bay off the Barents Sea [Text] / V. Grigoryev [et al.] // International Journal of Geophysics. — 2013. — Vol. Article ID 160915. — P. 1–16.
- A3. Effect of the total solar eclipse of 20 march 2015 on the elf propagation over high-latitude paths [Text] / E. D. Tereshchenko [et al.] // Geophysical Research Letters. — 2015. — Vol. 42, no. 17. — P. 6899–6905.
- A4. *Tereshchenko E. D., Tereshchenko P. E., Sidorenko A. E.* The Relationship Between the Variations in the Low-frequency (0.1–10 Hz) Near-zone Electromagnetic Field of a Controlled Source and the State of the Ionosphere [Text] // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). Vol. 1. — IEEE. 2019. — P. 71–74.
- A5. *Терещенко П. Е.* Вертикальная составляющая экстремально низкочастотного электрического поля, возбуждаемого заземленным горизонтальным вибратором [Текст] // Журнал технической физики. — 2010. — Т. 80, № 7. — С. 147–150.
- A6. Изменения фазы магнитного поля в СНЧ-диапазоне на разломной тектонике [Текст] / Е. Д. Терещенко [и др.] // Физика Земли. — 2012. — № 9. — С. 759–765.

- A7. Результаты морского электромагнитного зондирования мощным удаленным источником в Кольском заливе Баренцева моря [Текст] / В. Ф. Григорьев [и др.] // Физика Земли. — 2013. — № 3. — С. 75—86.
- A8. Study of interaction of elf–ulf range (0.1–200 Hz) electromagnetic waves with the Earth’s crust and the ionosphere in the field of industrial power transmission lines (FENICS experiment) [Text] / A. A. Zhamaletdinov [et al.] // Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. — 2015. — Vol. 51, no. 8. — P. 826—857.
- A9. Исследование взаимодействия электромагнитных волн КНЧ–СНЧ диапазона (0.1–200 Гц) с Земной корой и ионосферой в поле промышленных линий электропередачи (эксперимент “FENICS”) [Текст] / А. А. Жамалетдинов [и др.] // Геофизические процессы и биосфера. — 2015. — Т. 14, № 2. — С. 5—49.
- A10. Радиальная компонента сверхнизкочастотного магнитного поля горизонтального электрического диполя при низкой проводимости земли на трассе распространения [Текст] / Е. Д. Терещенко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. — 2016. — Т. 59, № 1. — С. 15—24.
- A11. Терещенко Е. Д., Терещенко П. Е. Электрическое поле горизонтальной линейной заводненной антенны [Текст] // Журнал технической физики. — 2017. — Т. 87, № 3. — С. 301—315.
- A12. Особенности резонансных структур в спектрах естественного электромагнитного шума в области главного ионосферного провала [Текст] / Н. В. Иванов [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. — 2017. — Т. 57, № 6. — С. 808—816.
- A13. Терещенко Е. Д., Терещенко П. Е. Электромагнитное поле горизонтальной антенны под поверхностью раздела двух сред [Текст] // Радиотехника и электроника. — 2018. — Т. 63, № 4. — С. 323—329.
- A14. Влияние ионосферы на возбуждение электромагнитного поля диапазона КНЧ и более низких частот в ближней зоне [Текст] / Е. Д. Терещенко [и др.] // Журнал технической физики. — 2018. — № 6. — С. 907—913.
- A15. Терещенко Е. Д., Терещенко П. Е. Поверхностный импеданс электромагнитного поля, возбуждаемого заземленной горизонтальной антенной в волноводе Земля–ионосфера [Текст] // Физика Земли. — 2019. — № 2. — С. 181—189.
- A16. Терещенко П. Е. Оценка эффективной проводимости подстилающей поверхности волновода Земля–ионосфера по результатам приема электромагнитных полей в средней зоне активного источника [Текст] // Наука и технологические разработки. — 2019. — № 4. — С. 34—42.

- A17. Терещенко Е. Д., Сидоренко А. Е., Терещенко П. Е. Влияние ионосферы и неоднородной структуры Земли на поляризационные характеристики магнитного поля в диапазоне частот 0.2–200 Hz в ближней зоне горизонтальной заземленной антенны [Текст] // Журнал технической физики. — 2019. — Т. 89, № 7. — С. 1092–1092.
- A18. Tereshchenko P. E. Effect of the Ionosphere on the Controlled-Source Field in the Frequency Range Between 0.4 and 95 Hz [Текст] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. — 2022. — Т. 21, № 1. — С. 208–211.
- A19. Терещенко П. Е. Влияние внешней ионосферы на магнитное поле контролируемого источника в диапазоне частот 0.4–10 Гц [Текст] // Наука и технологические разработки. — 2022. — Т. 101, № 2. — С. 33–49.

В сборниках трудов конференций

- A20. Морской приемо-передающий комплекс электромагнитного зондирования [Текст] / Е. Д. Терещенко [и др.] // Тезисы докладов II Международной Нобелевской конференции «Инновационные электромагнитные методы геофизики». — 2010. — С. 113.
- A21. Терещенко П. Е. Оценка проводимости подводной литосферы по поверхностному импедансу [Текст] // Материалы Всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли. Книга 2. — 2011. — С. 111.
- A22. Терещенко П. Е. Вертикальная составляющая электрического поля, возбуждаемая заземленным горизонтальным вибратором в экстремально низкочастотном диапазоне [Текст] // Материалы Всероссийской школы-семинара имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли. Книга 2. — 2011. — С. 113.
- A23. Использование фазовых скоростей УНЧ геомагнитных вариаций для исследования геоэлектрической структуры земной коры [Текст] / Ю. А. Копытенко [и др.] // 36-й Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". — 2013. — С. 113.
- A24. Исследование динамики положения плазмопаузы во время сильной магнитной суббури по данным меридиональной цепочки станций [Текст] / Ю. А. Копытенко [и др.] // 36-й Апатитский семинар "Физика авроральных явлений". — 2013. — С. 33–36.
- A25. Распространение электромагнитного поля СНЧ-диапазона в субавроральной зоне [Текст] / А. Е. Сидоренко [и др.] // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. Том 2. — 2014. — С. 132.
- A26. Особенности распространения электромагнитных волн СНЧ-диапазона на субавроральной трассе [Текст] / А. Е. Сидоренко [и др.] // Распространение радиоволн (РРВ-24). Труды конференции. — 2014. — С. 259–262.

- A27. Терещенко П. Е., Сергушин П. А., Григорьев В. Ф. Особенности использования вариационных и индукционных магнитометров в экстремально низкочастотном диапазоне [Текст] // Сборник тезисов 2-го Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара «Квази-3D модель электропроводности, температуры и реологии литосферы восточной части Балтийского щита по результатам электромагнитных зондирований с естественными и мощными контролируруемыми источниками». — 2018. — С. 44—46.
- A28. Влияние ионосферы в ближней зоне на поляризационные характеристики магнитного поля в диапазоне частот 0.2–200 Гц [Текст] / Е. Д. Терещенко [и др.] // Материалы V Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». — 2018. — С. 543—547.
- A29. Терещенко П. Е., Сидоренко А. Е. Влияние ионосферы на распространение низкочастотных радиоволн по результатам экспериментов с мощными контролируруемыми источниками в эксперименте «FENICS» [Текст] // Physics of auroral phenomena proceedings of the 42nd Annual Seminar Apatity. — 2019. — С. 89—91.
- A30. Терещенко Е. Д., Терещенко П. Е., Сидоренко А. Е. Связь вариаций в ближней зоне низкочастотного (0,1–10 Гц) электромагнитного поля контролируемого источника с состоянием ионосферы [Текст] // Распространение радиоволн. Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. В 2-х томах. Том I. — 2019. — С. 341—344.
- A31. Терещенко П. Е., Юрик Р. Ю. Оценка эффективной проводимости подстилающей поверхности волновода Земля-ионосфера по результатам эксперимента FENICS-2019 [Текст] // Physics of auroral phenomena proceedings of the 43rd Annual Seminar Apatity. — 2020. — С. 47—51.
- A32. Терещенко П. Е. Импедансный подход оценки проводимости земли в юго-восточной области Кольского полуострова в рамках эксперимента FENICS-2019 [Текст] // Материалы VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». — 2020. — С. 274—278.
- A33. Терещенко П. Е. Влияние ионосферы на поле контролируемого источника в диапазоне 0,4–95 Гц [Текст] // Распространение радиоволн. Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции, 28 июня – 3 июля 2021, Калининград. — 2021. — С. 534—540.
- A34. Терещенко П. Е. Структура магнитной составляющей крайне низкочастотного электромагнитного поля в волновой зоне [Текст] // Антенны и распространение радиоволн: сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». — 2021. — С. 52—53.

- A35. Терещенко П. Е. Особенности возбуждения электромагнитного поля в диапазоне менее 100 Гц заземленным или заводненным горизонтальным излучателем [Текст] // Научно-практический семинар “Исследование магнитного поля Земли как фактор прогресса национальной безопасности России”, Санкт-Петербург. — 2022. — С. 7—10.
- A36. Терещенко П. Е. Влияние ионосферы на вертикальную составляющую магнитного поля, возбуждаемого горизонтальным электрическим диполем [Текст] // Радиофизика, фотоника и исследование свойств вещества. Тезисы докладов I Российской научной конференции. — Омск : Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2020. — С. 52.

В прочих изданиях

- A37. Влияние разломной тектоники на структуру естественного электромагнитного поля в Кольском заливе [Текст] / Е. Д. Терещенко [и др.] // Вестник Кольского Научного Центра РАН: Кольский научный центр РАН (Апатиты). — 2013. — 3 (14). — С. 34—39.
- A38. Терещенко П. Е. Влияние ионосферы на вертикальную составляющую магнитного поля, возбуждаемого горизонтальным электрическим диполем [Текст] // Техника радиосвязи. — 2020. — Т. 4 (47). — С. 68—76.
- A39. Влияние солнечного затмения 20 марта 2015 г. на распространение СНЧ-радиоволн на высокоширотных трассах [Текст] / А. Е. Сидоренко [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. — 2015. — № 32. — С. 68—72.
- A40. Морской приемно-передающий комплекс электро-магнитного зондирования [Текст] / Е. Д. Терещенко [и др.] // Инновационные электромагнитные методы геофизики. Сборник статей под редакцией академика Е. П. Велихова. — М. : Науч. мир, 2012. — С. 34—39.
- A41. Немонотонная амплитудно-частотная зависимость магнитного поля контролируемого наземного КНЧ-источника в дневное время [Текст] / Е. Д. Терещенко [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — Т. 9, № 3. — С. 104—110.

Список литературы

1. Регламент радиосвязи [Электронный ресурс]. — 2020. — <http://handle.itu.int/11.1002/pub/814b0c44-en>.
2. Klessig L., Strite V. L. The ELF Odyssey: National Security Versus Environmental Protection [Text]. — Boulder, Colorado : Westview Press, 1980. — 310 p.
3. Kruger B. Project Sanguine, FBM Command and Control Communications [Text]. — Chicago, Illinois : Department of the Navy, Electronic Systems Command, 1972. — 64 p.

4. *Evaluate the U.S. Navy's Extremely Low Frequency Communications System Ecological Monitoring Program* ". R. C. (C. to. An Evaluation of the U.S. Navy's Extremely Low Frequency Communications System Ecological Monitoring Program [Text]. — Washington (DC) : National Academies Press (US), 1997. — 176 p.
5. Кононов Ю. М., Жамалетдинов А. А. Системы СНЧ-радиосвязи и мониторинга среды: перспективное направление конверсионной политики России [Текст] // ИНФОРМОСТ - Радиотехника и Телекоммуникации. — 2002. — № 3. — С. 4—6.
6. Мольков А. В. 25 лет работы объекта «Зевс» [Текст] // Взаимодействие электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой: Материалы Всероссийского (с международным участием) научно-практического семинара. В 2 т. Т. 1. — Апатиты : Рос. акад. наук, Отд. наук о Земле, Кольский научный центр, Геологический институт, 2014. — С. 177.
7. Опыт частотного электромагнитного зондирования земной коры с применением мощной антенны СНЧ-диапазона [Текст] / Е. Велихов [и др.] // Докл. РАН. — 1994. — Т. 338, № 1. — С. 106—109.
8. Deep resistivity measurements in the Pacific Northwest [Текст] / T. Cantwell [и др.] // Journal of Geophysical Research (1896-1977). — 1965. — Т. 70, № 8. — С. 1931—1937.
9. Cantwell T., Orange A. Further deep resistivity measurements in the Pacific Northwest [Текст] // Journal of Geophysical Research (1896-1977). — 1965. — Т. 70, № 16. — С. 4068—4072.
10. Samson J. C. Deep resistivity measurements in the Fraser Valley, British Columbia [Текст] // Canadian Journal of Earth Sciences. — 1969. — Окт. — Т. 6, № 5. — С. 1129—1136.
11. Van Zijl J. A deep Schlumberger sounding to investigate the electrical structure of the crust and upper mantle in South Africa [Текст] // Geophysics. — 1969. — Т. 34, № 3. — С. 450—462.
12. Жамалетдинов А. А. Модель электропроводности литосферы по результатам исследований с контролируемыми источниками поля:(Балтийский щит, Русская платформа) [Текст]. — Наука. Ленингр. отд-ние, 1990.
13. Lienert B. R. Crustal electrical conductivities along the eastern flank of the Sierra Nevadas [Текст] // GEOPHYSICS. — 1979. — Т. 44, № 11. — С. 1830—1845.
14. Geoelectrical deep soundings in southern Africa using the Cabora Bassa power line [Текст] / E. Blohm, P. Worzyk, H. Scriba [и др.] // Journal of Geophysics. — 1977. — Т. 43, № 1. — С. 665—679.

15. *Велихов Е. П., Жамалетдинов А. А., Жданов М. С.* Эксперимент” Хибинь [Текст] // Земля и Вселенная. — 1984. — № 5. — С. 12—18.
16. *Сараев А. К., Пертель М. И., М. М. З.* Проявление деформаций земной коры, вызванных приливами, в изменениях импеданса электромагнитного поля СНЧ- радиостановки [Текст] // Вопросы геофизики. — 1998. — № 35. — С. 136—147.
17. *Жамалетдинов А. А.* Новое о строении континентальной земной коры по результатам электромагнитных зондирований с мощными контролируемыи источниками поля [Текст] // Доклады Академии наук. — 2011. — Т. 438, № 4. — С. 532—537.
18. О возможности квазивертикального радиозондирования ионосферы в крайне низкочастотном диапазоне [Текст] / Е. Д. Терещенко [и др.] // Письма в ЖЭТФ. — 2007. — Т. 85, № 8. — С. 471—473.
19. Влияние ионосферы на электромагнитные волны от наземного излучателя в диапазоне частот 1–10 Гц [Текст] / Е. Д. Терещенко [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. — 2007. — Т. 47, № 6. — С. 855—856.
20. *Жамалетдинов А. А.* Краткие воспоминания участника работ с СНЧ-источником Зевс по двойному назначению в 1990-2013 гг. [Текст] // Взаимодействие электромагнитных полей контролируемых источников СНЧ диапазона с ионосферой и земной корой. Т. 1. — Апатиты : Российская академия наук, Отделение наук о Земле, Кольский научный центр, Геологический институт, 2014. — С. 190—195.
21. Глубинные электромагнитные зондирования литосферы восточной части Балтийского (Фенно-скандинавского) щита в поле мощных контролируемых источников и промышленных ЛЭП (эксперимент FENICS) [Текст] / А. А. Жамалетдинов [и др.] // Физика земли. — 2011. — Т. 47, № 1. — С. 4—26.
22. *Фок В. А.* Теория сопротивления горных пород по способу каротажа [Текст]. — Л. : ГТТП, 1933. — 64 с.
23. *Обухов Г.* О некоторых свойствах нестационарных электромагнитных полей в Земле и их использовании в электроразведке [Текст] // Изв. АН СССР. Физика Земли. — 1968. — № 9. — С. 62.
24. *Вешев А. В.* Электропрофилирование на постоянном и переменном токе [Текст]. — 2-е изд, перераб. и доп. — Л. : Недра, 1980. — 301 с.
25. *Бердичевский М. Н., Ваньян Л. Л., Файнберг Э. Б.* Частотное зондирование Земли по результатам сферического анализа электромагнитных вариаций [Текст] // Геомагнетизм и аэрономия. — 1969. — Т. 9, № 2. — С. 372.
26. *Ваньян Л.* Электромагнитные зондирования [Текст]. — 1997.
27. *Жданов М. С.* Теория обратных задач и регуляризации в геофизике [Текст]. — Науч. мир, 2007.

28. *Casey J. P.* Extremely Low Frequency (ELF) Propagation Formulas for Dipole Sources Radiating in a Spherical Earth-Ionosphere Waveguide. NUWC-NPT Technical Report 11, 369, Naval Undersea Warfare Center Newport Division [Text]. — RI, USA : Naval Undersea Warfare Center Newport Division, 2002. — 182 p.
29. *Кириллов В. В.* Параметры волновода Земля–ионосфера на СНЧ [Текст] // Проблемы дифракции и распространения радиоволн. — 1993. — № 25. — С. 35—52.
30. *Кириллов В. В., Пронин А. Е.* Положение существенной области для дальнего поля от СНЧ- до СВ-диапазона. [Текст] // Проблемы дифракции и распространения волн. — 1997. — № 27. — С. 95—101.
31. *Кириллов В. В., Копейкин В. Н.* Решение двумерного телеграфного уравнения с анизотропными параметрами [Текст] // Изв. ВУЗов. Радиофизика. — 2002. — Т. 45, № 12. — С. 1011.
32. *Кириллов В. В., Копейкин В. Н.* Формирование резонансной структуры локальной индуктивности ионосферы в диапазоне 0,1-10 Гц [Текст] // Изв. ВУЗов. Радиофизика. — 2003. — Т. 46, № 1. — С. 1—12.
33. *Mushtak V. C., Williams E. R.* ELF propagation parameters for uniform models of the Earth–ionosphere waveguide [Text] // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. — 2002. — Vol. 64, no. 64. — P. 1989—2001.
34. *Поляков С. В.* Граничное условие на терминаторе для нестационарного горизонтального ионосферного тока с учётом затекания части тока в верхнюю ионосферу и магнитосферу [Текст] // Известия вузов. Радиофизика. — 2015. — Т. 58, № 1.
35. *Longman I.* Note on a method for computing infinite integrals of oscillatory functions [Текст] // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. Т. 52. — Cambridge University Press. 1956. — С. 764—768.
36. *Welch P. D.* The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms [Text] // Audio Electroacoust. — 1967. — Vol. AU—15. — P. 70—73.
37. Электромагнитное зондирование Кольского полуострова мощным крайне низкочастотным источником [Текст] / Е. П. Велихов [и др.] // Докл. РАН. — 2011. — Т. 438, № 2. — С. 390—395.
38. *Ковтун А. А.* Строение коры и верхней мантии на северо-западе Восточно-Европейской платформы по данным магнитотеллурического зондирования [Текст]. — Л. : Из-во ЛГУ, 1989. — 284 с.

Терещенко Павел Евгеньевич

Особенности возбуждения и распространения электромагнитного поля в диапазоне частот менее 300 Гц от заземленного или заводненного горизонтального излучателя

Автореф. дис. на соискание ученой степени Доктора физ.-мат. наук

Подписано в печать _____.____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 250 экз.

Типография _____

