

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.89-91

ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ РАДИОВОЛН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МОЩНЫМИ КОНТРОЛИРУЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «FENICS»

П.Е. Терещенко¹, А.Е. Сидоренко²

¹Санкт-Петербургский филиал ИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Мурманск, Россия

Аннотация. На основе экспериментальных исследований по приему сигналов контролируемого источника в ближней зоне в различных геофизических условиях отмечено наличие вариаций амплитуды поля в нижней части КНЧ диапазона и на более низких частотах. При этом отмечено отсутствие вариаций в диапазоне СЧ. Для оценки факторов, обуславливающих эту особенность поведения поля, рассмотрен вопрос о возбуждении электромагнитного поля диапазона КНЧ и более низких частот в волноводе Земля-ионосфера и предложены теоретические расчеты, показывающие, что при низкой проводимости Земли влияние ионосферы в ближней зоне может быть заметным.

Введение

Применение наземных контролируемых источников электромагнитных полей КНЧ (3–30 Гц) и СЧ (30–300 Гц) диапазонов важно для организации связи на больших расстояниях, глубинного зондирования земли, сейсмического мониторинга и дистанционного контроля состояния ионосферы. Основные отличительные особенности низкочастотных волн заключаются в крайне малом затухании с расстоянием при распространении в волноводе Земля-ионосфера и в глубоком проникновении в подстилающую среду.

Во многих задачах зондирования природных сред для интерпретации результатов проводить измерения поля необходимо на достаточном удалении от источника. В непосредственной близости от наземного горизонтального источника электромагнитное поле слабо зависит от проводимости земли и ионосферы. Для применения импедансных методов зондирования земли требуется расстояние не менее 5–7 скин-слоев, а для установления характерной зависимости поля от геометрических и электрических параметров волновода Земля-ионосфера

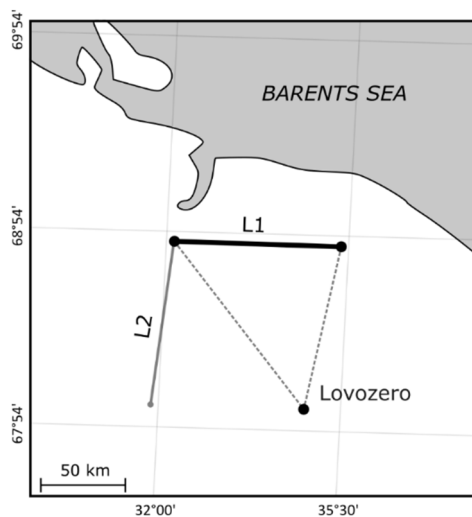


Рисунок 1. Карта-схема эксперимента.

необходима дистанция более трех высот эффективного волновода h .

Промежуточной области малых расстояний от источника (0.5–2 h) в работах по КНЧ и СЧ диапазонам уделено крайне мало внимания. Существующие теоретические представления и некоторые численные оценки [1] сводятся, в основном, к тому, что в этой области зависимость поля от проводимости ионосферы пренебрежимо мала, а обратная высота волновода начинает играть роль множителя в выражениях для амплитуды полей лишь дальше нескольких десятков километров от источника. Зачастую влиянием ионосферы на таких малых расстояниях от источника пренебрегают [2]. Экспериментальные работы в этой области частот и расстояний немногочисленны [3, 4], при этом полученные результаты не полностью согласуются с существующими представлениями на частотах ниже 10 Гц, в частности, наблюдаются вариации амплитуды поля в разные времена года и в различное время суток.

В представленной работе изложены результаты и проведена теоретическая интерпретация измерений, проведенных в ходе эксперимента FENICS-2014, проходившего на Кольском полуострове в 2014 г. [5], в котором, в отличие от ранее выполненных экспериментов, использовался более мощный передатчик, что позволило исключить влияние как внешних, так и внутренних шумов. В качестве теоретической основы предложено новое решение задачи о возбуждении магнитного поля в плоском волноводе горизонтальной наземной антенной в строгой электродинамической постановке.

Эксперимент

Международный комплексный эксперимент FENICS-2014 был проведен в августе-сентябре 2014 г. Осуществлялась серия сеансов генерации электромагнитного поля в диапазоне 10^2 –200 Гц. В первой половине эксперимента использовалась антенна субширотного направления (L1), а во второй — субмеридионального (L2) (рис. 1). Длина каждой антенны составляет около 100 км. Генерация производилась ежедневно с 01:00 до 05:00 по местному времени на 14 частотах продолжительностью 10–15 мин на каждой частоте.

Рассмотрим результаты измерений магнитного поля субширотной антенны, которые были получены в обсерватории ПГИ в п. Ловозеро (рис. 1) 23–29 августа 2014 г. Расстояния от точки измерений до концов антенны составляли 125 и 100 км. Регистрация сигналов производилась при помощи трехкомпонентного индукционного магнитометра, имеющего два ортогональных горизонтальных датчика и один вертикальный. Горизонтальные датчики ориентировались по стрелке буссоли в направлениях С-Ю (H_{N-S}) и З-В (H_{W-E}). Магнитное склонение — восточное, 12° . Сила тока в передающей антенне регистрировалась цифровой системой сбора данных. Частота дискретизации составляла 512 Гц.

По окончании эксперимента была проведена спектральная обработка полученных данных по методу Уэлча и выполнена нормировка амплитуды магнитного поля на силу тока в антенне.

Результаты приема низкочастотных сигналов в обсерватории Ловозеро

Результаты измерений в диапазоне 0.4–100 Гц показаны на рис. 2. Как можно видеть, амплитуда поля в диапазоне частот 10–100 Гц в течение всего эксперимента оставалась постоянной, а на частотах ниже 10 Гц средний уровень поля в некоторые дни заметно менялся. Эти колебания амплитуды не могут быть связаны с влиянием случайных шумов — по результатам измерений сигнал превышал шум на два порядка, поэтому измерялся с точностью, многократно превышающей суточные вариации. Такую же особенность поведения поля мы наблюдали и в предыдущих экспериментах, которые проводились в различные времена года и в разное время суток [3, 4].

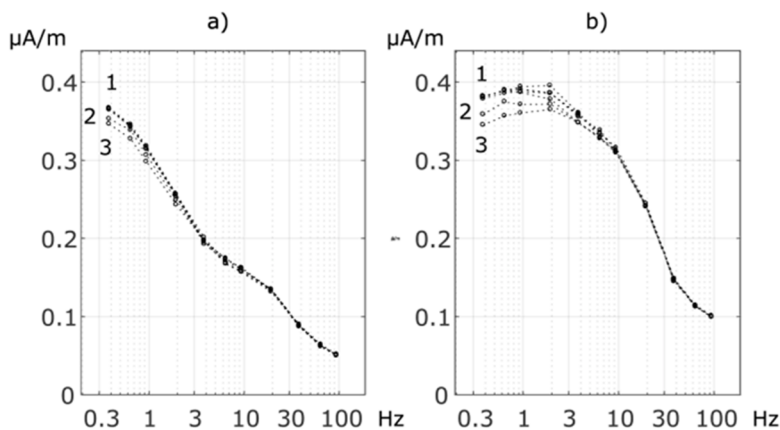


Рисунок 2. Зависимость амплитуды магнитного поля от частоты при силе тока в передающей антенне 1 А в сеансах 23-29 августа 2014 г. (обс. Ловозеро) — компоненты H_{W-E} (а) и H_{N-S} (б). Обозначения кривых: 1 — измерения 23-27.08.2014 г., 2 — 28.08.2014 г., 3 — 29.08.2014 г.

условиями [6].

Таким образом, можно получить выражение, связывающее амплитуду поля с условиями внешней среды

$$H_x^{(-1)}(\rho r, 0) = \left(\frac{I}{2\pi \rho^2} \frac{F_H(\rho \eta)}{(1-i)D_{-1}} \right)_{-L}^L,$$

где связь амплитуды поля с условиями внешней среды определяется множителем F_H/D_{-1} , зависящим от σ_{-1} , σ_1 и высоты ионосферы h . На рис. 3 приведены графики этой величины для частот 0.4–100 Гц для значений параметров $\sigma_1 = 10^{-4}$, $5 \cdot 10^{-4}$ См/м и $h = 70$ и 85 км. Координаты точки, для которой выполнен расчет, соответствуют условиям рассматриваемого эксперимента, а проводимость земли σ_{-1} принималась равной $5 \cdot 10^{-5}$ См/м, что характерно для Кольского полуострова.

Как следует из графиков, изменения высоты ионосферы влияют на общий уровень амплитуды во всем диапазоне, в то время как вариации эффективной проводимости изменяют амплитуду лишь в некоторой

Теоретическая интерпретация экспериментальных результатов

Рассмотрим возбуждение плоского волновода горизонтальной заземленной антенной. Определим поле в трехслойной среде, формируемое горизонтальным излучателем длиной $2L$, питаемым током с гармонической зависимостью от времени $\exp(-i\omega t)$ и находящимся на границе раздела $z = 0$. При этом будем считать проводимость земли σ_{-1} и ионосферы σ_1 постоянными и изотропными.

Задача о возбуждении электромагнитного поля сторонним током J сводится к решению уравнений Гельмгольца для электрического вектора-потенциала A с соответствующими граничными

области частот, не превышающей 10 Гц. Такой же характер имеют и вариации амплитуды в различные дни наблюдений во время эксперимента (рис. 2).

Выводы

Предложенное решение задачи о поле горизонтального диполя в трехслойной среде позволяет связать наблюдаемые в экспериментах в КНЧ диапазоне вариации амплитуды магнитного поля контролируемого источника на расстояниях 1–2 высот эффективного волновода с изменениями проводимости ионосферы в различных геофизических условиях. По данным ближайшей обсерватории Лопарская (Мурманская обл.) К-индекс геомагнитной активности в часы наблюдений 23–27 августа колебался в пределах от нуля до единицы, а 28–29 августа вырос до пяти-шести единиц. Как видно на рис. 2, кривые для спокойных дней практически совпадали друг с другом, а в возмущенный период их уровень понижался. На основании этого можно предположить, что возмущение привело к изменению концентрации электронов и проводимости в ионосфере.

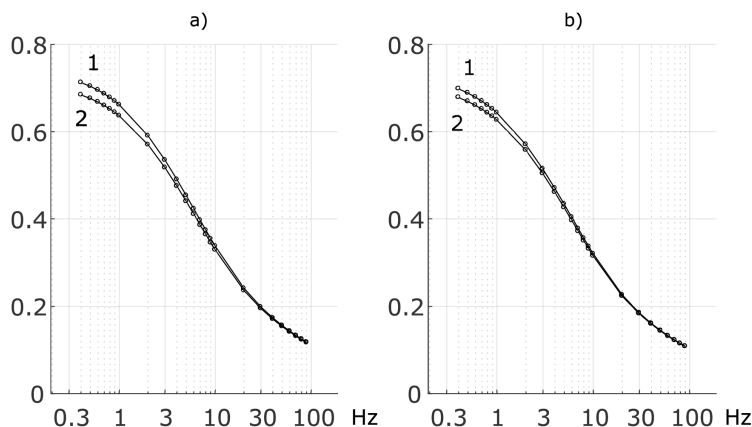


Рисунок 3. Расчетные значения F_h/D_{-1} при высотах ионосферы $h = 70$ км (а) и 85 км (б) и проводимостях $\sigma_1 = 10^{-4}$ См/м (кривые 1) и $5 \cdot 10^{-4}$ См/м (кривые 2).

Таким образом, экспериментально обнаружено и теоретически показано, что в области, не превышающей 1–2 высот волновода, имеется заметное влияние ионосферы на амплитуду электромагнитного поля диапазона КНЧ и более низких частот. Предложенный расчет поля справедлив и на больших расстояниях - до 2000 км, где допустимо пренебрежение кривизной волновода Земля-ионосфера. В результате расширяются возможности интерпретации дистанционного зондирования как ионосферы, так и земли с использованием контролируемых наземных источников КНЧ диапазона, а также повышается их информативность.

Литература

1. Wait J.R., *Electromagnetic waves in stratified media*. Elmsford, New York: Pergamon Press, 1970.
2. Вешев А.В., *Электропрофилирование на постоянном и переменном токе*. –2-е изд., перераб. и доп. Недра. 1980. 391 с.
3. Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Сидоренко А.Е., Миличенко А.Н., Мольков А.В., Собчаков Л.А., Васильев А.В. О возможности квазивертикального радиозондирования ионосферы в крайне низкочастотном диапазоне // *Письма в ЖЭТФ*. 2007. Т.85, Вып.8. с. 471-473.
4. Терещенко Е.Д., Григорьев В.Ф., Сидоренко А.Е., Миличенко А.Н., Мольков А.В., Собчаков Л.А., Васильев А.В. Влияние ионосферы на электромагнитные волны от наземного излучателя в диапазоне частот 1-10 Гц // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2007. Т. 47, N 6. с. 855-856.
5. Колобов В.В., Баранник М.Б., Жамалетдинов А.А. Опыт применения КНЧ-генератора ЭНЕРГИЯ-2 для электромагнитных зондирований в ходе международного эксперимента FENICS-2014 // *Труды Кольского научного центра РАН*. Энергетика. 2/2015 (28) вып. 10. с. 52-64.
6. Терещенко Е.Д., Терещенко П.Е., Сидоренко А.Е., Григорьев В.Ф., Жамалетдинов А.А. Влияние ионосферы на возбуждение электромагнитного поля диапазона КНЧ и более низких частот в ближней зоне // *Журнал технической физики*. 2018. выпуск 6. с. 907-913 10.21883/JTF.2018.06.4602453.