

## О возможности квазивертикального радиозондирования ионосферы в крайне низкочастотном диапазоне

Е. Д. Терещенко, В. Ф. Григорьев, А. Е. Сидоренко<sup>1)</sup>, А. Н. Миличенко, А. В. Мольков, Л. А. Собчаков\*, А. В. Васильев\*

Полярный геофизический институт КНЦ РАН, 183010 Мурманск, Россия

\* Российский институт мощного радиостроения (РИМР), 199048 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 22 февраля 2007 г.

В результате проведенных экспериментальных измерений обнаружено заметное влияние состояния ионосферы на поле крайне низкочастотного (КНЧ) диапазона в переходной зоне. Работы проводились в 2006 г. на Кольском полуострове в различное время года и в разное время суток. Наблюдавшиеся при этом сезонные отличия результатов более значительны, чем суточные. При уменьшении частоты измеренная напряженность поля не стремится к расчетному статическому значению без учета влияния ионосферы. Обсуждается возможность практического использования квазивертикального радиозондирования ионосферы в экстремально низком частотном диапазоне с целью изучения ее структуры и электрических параметров.

PACS: 91.25.Qi, 94.20.bb, 94.20.Tt

Теоретические оценки поля для сверхнизкочастотного (СНЧ) диапазона (30 ... 300 Гц) [1, 2] показали практически полное отсутствие влияния ионосферы на величину электромагнитного поля в переходной зоне, то есть в области приема, удаленной от источника на расстояние больше половины, но меньше двух высот эквивалентного волновода. Для СНЧ волн высота эквивалентного волновода определяется высотой нижней ионосферы, а для задания электрических свойств ионосферы достаточно информации о профиле электронной плотности и частоты соударений электронов с нейтралами. В крайне низкочастотном (КНЧ) диапазоне (3 ... 30 Гц), и особенно в области частот (0.1 ... 10 Гц), электрические свойства ионосферы зависят еще и от частоты соударений ионов с нейтралами, массы положительных ионов, а также от распределения электронной плотности во внешней ионосфере [3]. На сегодняшний день в этом диапазоне частот отсутствуют корректные расчеты для переходной области, учитывающие реальную структуру ионосферы. Различие же в электрических характеристиках ионосферы в СНЧ и КНЧ диапазонах позволяет надеяться на различный характер возбуждения полей. Поэтому проведение экспериментальных исследований в указанном направлении представляет определенный интерес.

Важность таких работ обусловлена еще и тем, что прием поля в переходной зоне позволит реали-

зовать квазивертикальное зондирование ионосферы и тем самым определить важные ионосферные параметры, недоступные другим методам радиозондирования. Отметим, что зависимость ионосферных параметров от продольных координат в экспериментах, основанных на приеме КНЧ сигналов в дальней зоне, то есть на расстояниях, значительно превышающих высоту эквивалентного волновода, усложняет интерпретацию результатов. Поэтому использование диапазона экстремально низких частот в подобных экспериментах малоэффективно. Исключить этот недостаток позволяет измерение поля наземного КНЧ источника на расстоянии, соизмеримом с высотой эквивалентного волновода. Эксперименты по квазивертикальному зондированию ионосферы ранее не выполнялись и в настоящей работе приведены первые реализации таких исследований.

Эксперименты по генерации и приему электромагнитных полей КНЧ диапазона проводились на Кольском полуострове весной (20 апреля), осенью (28 сентября) и зимой (4 декабря) 2006 г. в различное время суток. Особенностью зимних измерений является то, что они выполнены в период полярной ночи, когда ионосфера, включая внешнюю, не освещалась Солнцем. Источником КНЧ сигнала была установка, состоящая из маломощного передатчика с горизонтальной заземленной передающей антенной длиной около 60 км, расположенной практически вдоль географической параллели. Возбуждаемое установкой поле регистрировалось в приемном пункте в observa-

<sup>1)</sup>e-mail: anton@pgi.ru

тории Ловозеро на расстоянии около 80 км от антенны передатчика. Измерение напряженности магнитного поля, созданного КНЧ передатчиком, производилось при помощи индукционного магнитометра. Два ортогональных датчика магнитометра, расположенные горизонтально, были ориентированы в направлении магнитного севера (компонента  $H_x$ ) и магнитного запада (компонента  $H_y$ ). Аналоговые сигналы двух выходных каналов приемника оцифровывались с частотой 5 кГц и затем сохранялись для последующего спектрального анализа.

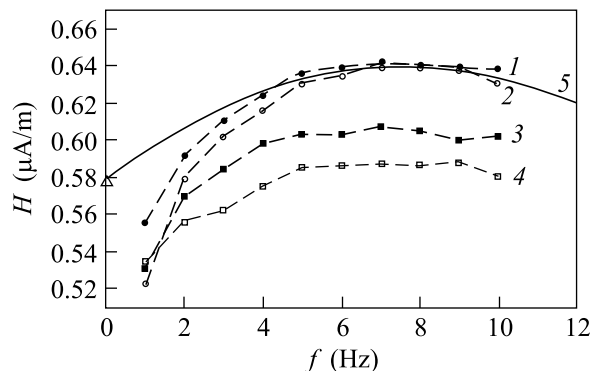
Для регистрации тока КНЧ передатчика был разработан специальный аппаратно-программный комплекс. Одновременная запись тока, создающего поле, и самой величины поля в приемном пункте позволили произвести корректную нормировку поля, что необходимо для анализа и сравнения результатов экспериментов, проведенных в различные сезоны года.

После цифровой обработки данных измерений на нескольких частотах КНЧ диапазона были получены абсолютные значения двух измеренных компонент напряженности магнитного поля, приведенные к току 1 А в антенне передатчика. Для каждого наблюдения, учитывая практически линейность поляризации поля, по двум ортогональным горизонтальным компонентам  $H_x$  и  $H_y$  были определены частотные зависимости амплитуды горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля  $H$  от частоты  $f$  в начальной части КНЧ диапазона.

Для наглядного представления влияния ионосферы выполнены расчеты поля при плоской двухслойной структуре подстилающей поверхности в отсутствие ионосферы, что справедливо для описания большинства реальных земных структур [4]. Результаты измерений и расчетов приведены на рисунке, разброс значений в эксперименте не превышал размеров знака, обозначающего тот или иной случай.

Модель, не противоречащая данным аналогичных измерений в СНЧ диапазоне, проведенных ранее [5], подбиралась таким образом, чтобы расчетные значения были близки к кривой 1. Такой критерий выбора параметров модели обусловлен тем, что кривая 1 при  $f > 0$  наиболее соответствует асимптотическому значению  $H(f)$  при  $f > 0$  – величине поля провода, питаемого постоянным током [6], которое для заданного тока определяется только геометрией задачи.

В итоге были подобраны следующие приближенные значения электрической проводимости двух слоев подстилающей структуры  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  и положение границы раздела слоев (мощность верхнего слоя)  $d$ , удовлетворительно описывающие поведение поля в СНЧ диапазоне, а также в диапазоне КНЧ, на частотах



Частотная зависимость напряженности магнитного поля при токе 1 А в антенне передатчика. Обозначения кривых: 1 – данные эксперимента 28.09.2006 (ночь); 2 – 28.09.2006 (день); 3 – 4.12.06 (ночь); 4 – 20.04.06 (день); сплошная кривая 5 – расчетная зависимость  $H(f)$ ;  $\Delta$  – асимптотическое значение  $H(f)$  при  $f > 0$

тах выше 4 Гц:  $\sigma_1 = 3 \cdot 10^{-5}$  см/м,  $\sigma_2 = 2 \cdot 10^{-6}$  см/м,  $d = 10$  км.

Измерения, проведенные в различное время одних и тех же суток, показывают, что влияние ионосферы проявляется на частотах ниже 7 Гц. При этом ночные значения больше дневных. Это различие в напряженности возрастает с уменьшением частоты до 1 Гц. В то же время, в измерениях, проведенных в разные сезоны года, напряженности отличаются во всем рассматриваемом диапазоне частот, и различие это более существенно (в среднем около 10%).

Во всех рассматриваемых случаях на одних и тех же частотах обнаружены локальные экстремумы кривых 1–4: максимумы на частотах 2, 4 и 7 Гц, минимумы – на частотах 3 и 6 Гц. Также на частоте 9 Гц обнаружены локальные минимумы ночных кривых при максимумах на этой частоте в дневных.

Таким образом, обнаруженная в экспериментах различная частотная зависимость напряженности поля в различные сезоны и в разное время суток свидетельствует о влиянии состояния ионосферы на формирование поля в нижней части КНЧ диапазона – в области ниже 10 Гц. Кроме того, рассмотренные экспериментальные факты свидетельствуют об обнаружении реакции КНЧ полей переходной зоны на изменения электрических параметров ионосферы (отличия дневных и ночных измерений, а также измерений в разные времена года).

Наличие локальных экстремумов частотной зависимости напряженности может являться проявлением резонансных свойств волновода в рассматриваемом диапазоне [3]. Обнаруженные экстремумы на частотах, совпадающих в разные сезоны года, ха-

рактически резонансные свойства ионосферы. В то же время, наблюдавшиеся на частоте 9 Гц отличия в характере экстремумов дневных и ночных измерений свидетельствуют о различии резонансных свойств ионосферного волновода в дневных и ночных условиях.

Из рисунка видно, что при уменьшении частоты результаты измерений не стремятся к теоретическому асимптотическому значению  $H(f)$  при  $f > 0$ , которое при отсутствии ионосферы не зависит от электрических свойств подстилающей поверхности, а определяется лишь геометрией задачи. Этот факт также подтверждает наличие влияния ионосферы на формирование полей экстремально низких частот.

Экспериментально обнаруженное существенное проявление влияния ионосферы на КНЧ поле в переходной зоне, однозначно регистрируемое при использовании даже сравнительно маломощной передающей аппаратуры, показывает практическую

возможность дальнейшего эффективного квазивертикального зондирования ионосферы в указанном диапазоне частот с целью изучения электрических параметров и структуры ионосферы.

- 
1. P. R. Bannister and F. J. Williams, J.G.R. **79**, 725 (1974).
  2. А. К. Сараев, П. М. Косткин, Вопросы геофизики **35**, 117 (1998); (Ученые записки СПбГУ № 433).
  3. В. В. Кириллов, В. Н. Копейкин, Изв. Вузов, Радиофизика **XLV**, 1011 (2002).
  4. Г. И. Макаров, В. В. Новиков, С. Т. Рыбачек, *Распространение электромагнитных волн над земной поверхностью*, М.: Наука, 1991.
  5. Л. А. Собчаков, Е. Д. Терещенко, А. Е. Сидоренко, *Региональная IX конференция по распространению радиоволн*, Санкт-Петербург, 2003, стр. 78.
  6. А. В. Вешев, *Электропрофилирование на постоянном и переменном токе*, Л.: Недра, 1965.