

Том I, с. 460–463
УДК: 537.877+519.6

О ВЛИЯНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНЧ СИГНАЛОВ В ВОЛНОВОДЕ ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА

О. И. Ахметов¹, И. В. Мингалев¹, О. В. Мингалев¹, З. В. Суворова¹,
В. Б. Белаховский¹, С. М. Черняков²

¹ Полярный геофизический институт, 184209, Россия, г. Апатиты, Академгородок, 26а
E-mail: admin@pgia.ru

² Полярный геофизический институт, 183010 г. Мурманск, Халтурина, 15
E-mail: general@pgia.ru

Аннотация. В работе рассмотрено влияние горизонтальных неоднородностей электронной плотности в D области ионосферы высоких широт на распространение сигнала частотой 1500 Гц в волноводе Земля – ионосфера. Представленные результаты получены методом численного моделирования распространения радиоволн с учетом магнитного поля Земли и анизотропии проводимости ионосферы. Реалистичные профили электронной плотности получены на основе данных установки частичных отражений Полярного геофизического института, расположенной на радиофизическом полигоне «Туманный» Мурманской области (69.0 с.ш., 35.7 в.д.).

Ключевые слова: распространение ИНЧ волн; численное моделирование; ионосфера

ABOUT HORIZONTAL INHOMOGENEITIES OF ELECTRON CONCENTRATION INFLUENCE ON THE PROPAGATION OF ULF SIGNALS IN THE WAVEGUIDE EARTH-IONOSPHERE

O. I. Akhmetov, I. V. Mingalev, O. V. Mingalev, Z. V. Suvorova, V. B. Belakhovsky,
S. M. Chernyakov

Abstract. The influence of horizontal electron density inhomogeneities in the D region of the high latitude ionosphere on a 1500 Hz signal propagation in the Earth-ionosphere waveguide is studied in this paper. The presented results were obtained by the numerical simulation method of radio wave propagation taking into account the Earth's magnetic field and anisotropy of the ionospheric conductivity. Realistic electron density obtained by the Polar Geophysical Institute partial reflection radar data, located on the «Tumanny» radio-physical observatory in the Murmansk region (69.0 N, 35.7 E).

Keywords: ULF wave propagation; numerical modeling; ionosphere

Введение

Одними из основных задач радиофизики в области распространения электромагнитных сигналов в атмосфере Земли являются: поиск методов обеспечения стабильной связи или радиолокации на различных частотах, определение условий, когда это невозможно, прогнозирование возникновения таких условий и поиск методов преодоления мешающих связи или радиолокации факторов. В этой связи получение достоверных результатов влияния всевозможных явлений в ионосфере Земли на распространение радиоволн невозможно переоценить. Статистические методы, основанные на анализе совместных измерений ионосферных параметров и характеристик электромагнитных сигналов, измеренных у поверхности Земли, развиваются достаточно давно и уже близки к исчерпанию своих возможностей. Основной проблемой такого подхода является невозможность во многих случаях достоверно проследить связь изменений характеристик электромагнитных сигналов с изменением структуры ионосферы. Даже простое измерение пространственной структуры электронной плотности в ионосфере представляет крайне сложную техническую задачу. Поэтому методы численного моделирования на данный момент единственный возможный вариант изучения чистых от постороннего влияния эффектов связанных

со структурой ионосферы. В тоже время выявление характера и величины изменений основных характеристик волн различного диапазона связанных с конкретной пространственной структурой электронной плотности ионосферы имеет большое значение для решения обратной задачи определения состояния ионосферы по данным наземных измерений компонент электромагнитного поля сетью регистраторов. Решение такой задачи может значительно повысить точность существующих моделей ионосферы таких как International Reference Ionosphere (IRI).

В представленной работе авторы рассматривают влияние размера и границы горизонтальной неоднородности электронной плотности ионосферы на распространение сигналов ИНЧ диапазона в волноводе Земля-ионосфера. Неоднородности подобные рассматриваемым в работе характерны для высыпаний заряженных частиц во время магнитных бурь в области высоких широт.

Условия среды распространения сигнала

Магнитная буря 17 марта 2013 года была вызвана солнечной вспышкой М-класса 15 марта и началась с приходом к магнитосфере межпланетной ударной волны, которая проявилось на земной поверхности в виде импульса SSC (storm sudden commencement) в 06 UT. В это момент скорость солнечного ветра резко увеличилась с ~ 400 км/с до $\sim 650-700$ км/с. B_z -компонента межпланетного магнитного поля стала отрицательной, что обеспечило постоянное поступление энергии в магнитосферу. Индекс SYM-H, характеризующий интенсивность магнитной бури, упал до -100 нТл и оставался на этом уровне. Авроральный AE индекс резко возрос до ~ 1000 нТл и оставался повышенным. AE индекс показывает в 16 UT появление другой авроральной активизации (увеличение AE до ~ 2500 нТл).

Профили концентрации, используемые в численных экспериментах, получены при помощи доработки профилей, сгенерированных моделью IRI2016. Доработка профилей базируется на данных средневолнового радиолокатора вертикального излучения для исследования нижней ионосферы, расположенного на радиофизическом полигоне «Туманный» Полярного геофизического института в Мурманской области (69.0 с.ш., 35.7 в.д.) [1], вовремя магнитной бури 17.03.2013, а именно 17.03.2013 в 06:00 UT (возмущенные условия) и за сутки до неё 16.03.2013 в 6:00 UT (спокойные условия).

В работе представлены результаты 9 численных экспериментов: эксперимент (1) – вся область имеет концентрацию электронов однородную по горизонтали, а по высоте соответствует невозмущенным условиям 16.03.2013; эксперимент (2) – вся область имеет концентрацию электронов однородную по горизонтали, а по высоте соответствует возмущенным условиям 17.03.2013; эксперименты (3 – 9) – область моделирования имеет неоднородную концентрацию электронов по горизонтали в направлении распространения сигнала высотный профиль плавно изменяется от случая как в эксперименте (1) к случаю описанному для эксперимента (2) и обратно по функции Гаусса с дисперсией 509, 29, 83, 136, 189, 243, 376 км соответственно. Изменение профиля по функции Гаусса с различной дисперсией задает не только ширину области с повышенной концентрацией электронов, но и градиент концентрации в зоне перехода так для эксперимента (3) градиент в зоне перехода составил $7,83 \text{ м}^{-3}/\text{км}$, а для эксперимента (4) $58,06 \text{ м}^{-3}/\text{км}$. В остальных случаях градиент был между этими крайними значениями.

Модель, граничные условия, источник

Используемая в представленной работе модель распространения электромагнитных сигналов в различных средах построена на основе схемы с противопотоковой аппроксимацией пространственных производных (метод Годунова с коррекцией потоков). Также используется расщепление по пространственным направлениям и по физическим процессам, причем затухание поля сигнала за счет проводимости и его вращение при наличии холловской проводимости среды учитываются на отдельных шагах расщепления по аналитическим формулам. Схема является монотонной, имеет 2-й порядок точности по времени и 3-й по пространственным переменным, а также является консервативной [2, 3].

Во всех поставленных в работе численных экспериментах область моделирования представляла собой параллелепипед с основанием 512×1280 км, высотой в атмосфере 150 км и глубиной

в литосфере 50 км. Шаги сетки по горизонтали составляли 2 км, по вертикали в атмосфере 2 км и 0,5 км в литосфере. Шаг по времени составлял $4 \cdot 10^{-6}$ с.

В модельных экспериментах на всех внешних границах действовало граничное условие свободного ухода волны, что достигалось обнулением исходящего за пределы области потока. Применяемая авторами схема в таких условиях имеет достаточно низкие коэффициенты отражения плоской волны от границ области моделирования: для волн, падающих под углом от 80 до 90 градусов, отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей плоской волны не превышает 0,01. При угле падения 60 градусов это отношение уже составляет 0,05, при угле 45 градусов - 0,16, при угле 27 градусов - 0,33, а при угле 18,4 градуса - 0,43 [2]. Метод FDTD (finite-differences time-domain method) [4] при применении простых граничных условий, таких как условия Мура (Mur) [5] и Лиао (Liao) [6], дает отражения порядка 0,1..1 %, но только при падении волны на границу под прямым углом. При падении под острым углом коэффициент отражения растет вплоть до 100 %. Однако при использовании непрерывно действующего источника даже столь малых отражений, которые порождает применяемая схема, достаточно для накопления ошибок в области моделирования, и возникает необходимость в использовании методов подавления, подобных PML (perfectly matched layer), использующихся в FDTD-моделях [7]. Именно такой тип источника применялся в представленных авторами экспериментах, что привело к необходимости адаптации и применения метода PML. Разделение схемы по пространственным переменным и физическим процессам позволяет применять профиль электрических и магнитных потерь, предложенный Беренгером, непосредственно к потокам противопотоковой схемы на границе области моделирования. Геометрический профиль потерь внутри отдельного слоя имеет вид

$$\rho(r) = -\frac{\varepsilon_0 c_0}{2 \cdot \Delta x} \frac{\ln(g)}{g^N - 1} \ln(R_0) g^{(r/\Delta x)}, \quad (1)$$

где g – коэффициент геометрической прогрессии, Δx - шаг по пространству, c_0 - скорость света, N - номер PML-слоя, считая от интерфейса счетного региона и границы, r - расстояние от границы, R_0 - коэффициент отражения от первого слоя. В представленных численных экспериментах авторы используют профиль потерь, рассчитанный по формуле (1) со следующими параметрами: $R_0=0.01$ (1 %), коэффициент прогрессии $g = 2,15$, количество слоев 14. Несмотря на то что коэффициент отражения от первого слоя не лучше, чем характерный для данной схемы при обнулении исходящих потоков на углах падения 80-90 градусов, а на практике даже хуже вследствие отражений от последующих слоев, основным преимуществом метода PML является его крайне слабая зависимость от угла прихода электромагнитной волны.

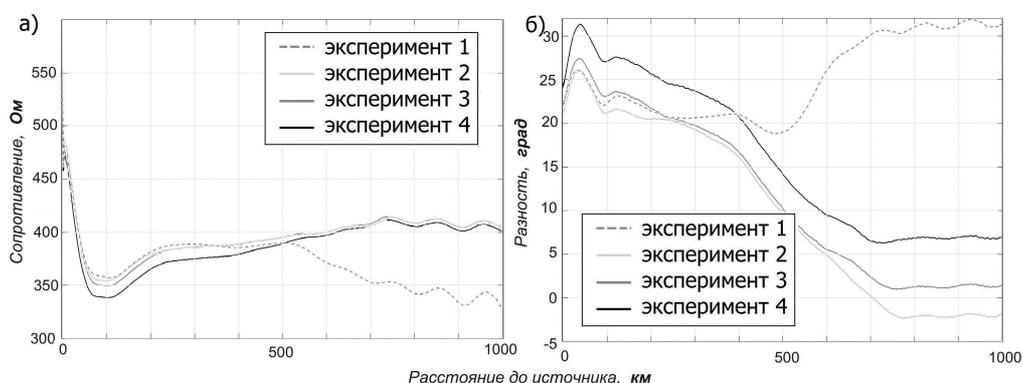


Рис. 1. Волновое сопротивление среды панель а) и разность фаз между полем E и H панель б).

В качестве источника сигнала во всех представленных экспериментах используется двухслойная плоскость на одной из граней расчетной области. Такое задание источника сигнала позволяет задать не только амплитуду сигнала во времени, но и её распределение в пространстве, задержками можно сформировать фронт волны необходимой формы подобно тому как это

делается в фазированной антенной решетке. В экспериментах, обсуждаемых в данной работе моделировалась плоская волна частотой 1500 Гц (~ 200 км), излучаемая в область под прямым углом к плоскости источника. Профиль проводимости литосферы был взят из работы [8], проводимость у поверхности составляла $2 \cdot 10^{-5}$ См.

Обсуждение результатов

На рис. 1а показано волновое сопротивление, рассчитанное как отношение E/H . Видно, что во всех возмущенных случаях оно выше чем в невозмущенных. Из рисунка заметно, что для данной длины волны требуется расстояние порядка четырех длин волн для стабилизации параметров характерных для данного состояния ионосферы. Также в случае узкой области повышенной концентрации с высоким градиентом в зоне перехода видно, что график изменяется не только после области, но и до неё, вероятно это связано с отражением сигнала от зоны перехода.

На рис. 1б показана разность фаз между электрической и магнитной частью электромагнитного поля в зависимости от гелиогеофизических условий. Видно, что в возмущенных случаях фаза магнитного поля догоняет и перегоняет, фазу электрического. Так же как на рис. 1а хорошо видно, что четырех длин волн достаточно для стабилизации параметров фазы сигнала при попадании в область с иными параметрами волновода Земля-ионосфера.

Анализ экспериментов с дисперсией более 30 км и градиентом мене $60 \text{ м}^{-3}/\text{км}$ не выявил значительных отличий от эксперимента (3), разница составляла не более единиц процентов.

Заключение

Выявлено значительное влияние вида вертикального профиля электронной концентрации на волновое сопротивление среды, показано, что в случаях увеличения концентрации электронов в D области волновое сопротивление среды увеличивается. Фазы электрической и магнитной части поля заметно по-разному реагируют на изменение параметров волновода Земля – ионосфера в возмущенных случаях фаза магнитного поля догоняет и перегоняет, фазу электрического. Показано, что параметры сигнала с частотой 1500 Гц при переходе между областями с различными характеристиками волновода Земля-ионосфера стабилизируются на расстоянии порядка 4 длин волн.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 18-77-10018).

Список литературы

1. Терещенко, В.Д., Васильев Е.Б., Овчинников Н.А., Попов А.А., Средневолновый радиолокатор Полярного геофизического института для исследования нижней ионосферы, В кн.: Техника и методика геофизического эксперимента, Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2003, с. 37-46.
2. Мингалев И.В., Мингалев О.В., Ахметов О.И., Суворова З.В. Явная схема расщепления для уравнений Максвелла. Математическое моделирование, 2018, том 30, № 12, стр. 17-38.
3. Мингалев О.В., Мингалев И.В., Мельник М.Н., Ахметов О.И., и др.. Новый метод численного интегрирования системы Власова-Максвелла. Математическое моделирование, 2018, том 30, № 10, стр. 21–43.
4. Yee Kane. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1966. Vol. 14. PP. 302-307.
5. Mur G., "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time domain electromagnetic field equations IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 23, no. 4, pp. 277-382, Nov. 1981.
6. Liao, Z.P., Wong, H L., Yang, B.P., Yuan, Y.F. A transmitting boundary for transient wave analyses. In: ScientaSinica (series A), 17 (1984), S. 1063 – 1076
7. Berenger J-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. JournalofComputationalPhysicsVolume 114, Issue 2, October 1994, Pages 185 – 200.
8. Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., Kovtun A.A., etc. Crustal conductivity in fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductance in the fennoscandian shield. EarthPlanetsSpace, 54, 2002, 535–558.