

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.009

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ ВЫСОКИХ ШИРОТ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ В ДИАПАЗОНЕ ОНЧ

О.И. Ахметов, И.В. Мингалев, О.В. Мингалев, В.Б. Белаховский, З.В. Суворова

ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Мурманская область

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования распространения электромагнитных волн ОНЧ диапазона в горизонтально однородных участках высокоширотного волновода Земля-ионосфера при различных профилях концентрации электронов. Используемые профили концентрации электронов и частоты столкновений электронов с нейтралами соответствовали условиям суббурь, приходу межпланетной ударной волны к ионосфере и спокойным условиям. Частоты модельных источников сигнала соответствовали частотам навигационной системы «Альфа» и системе точного времени «Бета» постоянно вещающих в диапазоне ОНЧ. Полученные в результате численных расчетов данные об амплитудах и фазах сигналов, распространяющихся в участках волновода Земля-ионосфера при различных профилях концентрации электронов и частоты столкновений электронов с нейтралами, позволили сделать вывод о принципиальной возможности использования сигналов ОНЧ диапазона для мониторинга состояния D слоя и частично E слоя ионосферы на пути распространения этих сигналов. Амплитуды и фазы сигналов на частотах навигационной системы «Альфа» демонстрируют более заметную реакцию на изменения ионосферных параметров концентрации и частоты столкновения электронов.

Ключевые слова: распространение ОНЧ волн, численное моделирование, ионосфера.

1. Введение. Исследования радиосигналов диапазона очень низких частот (ОНЧ) не теряют актуальность в течение многих лет. Первоначально данный диапазон представлял интерес с точки зрения связи и навигации, особенно в условиях возмущений электронной плотности в нижней ионосфере, а в последнее время появились работы, наоборот, использующие сигналы диапазона ОНЧ для получения дополнительных сведений о состоянии ионосферы на пути их распространения. Так в работах [Bashkuev et al., 2018; Стародубцев и др., 2019] для диагностики ионосферы используются фазовые и амплитудные параметры сигналов радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20 «Альфа»). Кроме передатчиков навигационной системы «Альфа» на территории Российской Федерации постоянно действуют в режиме 24/7 передатчики эталонных сигналов времени и частоты системы «Бета». Использование антропогенных стабильных постоянно действующих источников радиосигнала в сравнении со случайными сигналами естественной природы делает задачу исследования нижней ионосферы по результатам наземной регистрации сигналов ОНЧ несколько проще. Однако, сложность интерпретации зарегистрированных амплитудных и фазовых характеристик сигналов с точки зрения влияния на них параметров нижней ионосферы значительно ограничивает такой метод исследования ионосферы. Современные методы численного моделирования распространения радиосигналов в сложных анизотропных средах, а именно такой средой является ионосфера, позволяют получить свободные от влияния сторонних факторов изменения амплитудных и фазовых характеристик обусловленные изменениями профилей электронной концентрации в D и частично в E областях ионосферы. Полученные таким образом амплитудные и фазовые характеристики для разных частот, и разных видов профилей электронной концентрации, позволят выявить наиболее информативные параметры радиосигналов для исследования нижней ионосферы и связать их с видом профиля электронной концентрации преобладающим на пути следования радиосигнала.

Целью представленной работы является получение амплитудных и фазовых характеристик сигналов на несущих частотах системы дальней навигации «Альфа» и государственной системы эталонных сигналов времени и частоты «Бета» в условиях возмущения электронной плотности нижней ионосферы различной интенсивности методами численного моделирования.

2. Модельные профили электронной концентрации, частоты столкновений электронов с нейтральными частицами и ионами

Профили электронной концентрации, используемые для моделирования, получены на основе усредненных за 5 минут данных радара некогерентного рассеивания EISCAT, двух экспоненциальной модели ионосферы Уайта [Wait and Spies, 1964]:

$$N_e(h) = 1.43 \cdot 10^7 e^{(-0.15 \cdot h)} e^{[(\beta - 0.15)(h - h')]} ,$$

где h' и β – два параметра в км и км⁻¹ обозначающих высоту D слоя и резкость ионосферного перехода соответственно. Подбор параметров производился таким образом, чтобы профиль Уайта соединился с профилем EISCAT.

Небольшое 5-ти минутное усреднение данных радара EISCAT производилось для уменьшения ошибок измерения радаром в области соединения профилей.

Для моделирования использовались данные радара EISCAT 42m (архипелаг Шпицберген) во время магнитной суббури 11.12.2015 г. В качестве возмущенных условий для моделирования были взяты данные радара в 16:00 UT, спокойные условия взяты за полчаса до всплеска электронной концентрации вызванной вторжением авроральных и энергичных заряженных частиц в полярные области ионосферы Земли. Луч радара EISCAT 42m направлен вдоль геомагнитного поля. Таким образом получены профили для возмущенных и спокойных условий, из которых далее методом линейной интерполяции получались промежуточные профили.

Эти профили использовались для моделирования распространения радиосигналов на несущих частотах радионавигационной системы «Альфа».

Для моделирования распространения радиосигналов на несущих частотах системы точного времени «Бета» использовались данные радара VHF EISCAT (г. Тромсе) во время двух событий. Во время события 24 января 2012 года в момент резкого повышения электронной концентрации, вызванного приходом к магнитосфере межпланетной ударной волны в 15:06 UT. Второе событие – развитие суббури в 22:00 UT. Для спокойных условий использовались данные за полчаса до указанных выше всплесков электронной концентрации. Методом, аналогичным тому, что использовался ранее для суббури 11.12.2015 г., получены две серии профилей.

В представленных численных экспериментах геомагнитное поле принималось вертикальным направленным к поверхности земли равным $5.3 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Частота столкновений с нейтралами и ионами v_e рассчитывалась на основе данных EISCAT и данных модели NRLMSISE2000 по формулам:

$$\begin{aligned} v_{e-O} &= 2.8 \cdot 10^{-16} N_O \sqrt{T_e} \\ v_{e-N_2} &= \frac{2.5 \cdot 10^{-17} N_{N_2}}{1 + 0.0092 \sqrt{T_e}} \\ v_{e-O_2} &= 1.82 \cdot 10^{-16} N_{O_2} \sqrt{T_e} (1 + 0.0036 \sqrt{T_e}) \\ v_{e-i} &= \frac{5.4 \cdot 10^{-5} N_e}{T_e \sqrt{T_e}} \\ v_e &= v_{e-i} + v_{e-O_2} + v_{e-N_2} + v_{e-O} \end{aligned} ,$$

где N_O , N_{N_2} , N_{O_2} – концентрации нейтральных атомов и молекул, T_e – температура электронов.

Профиль проводимости литосферы был задан с учетом результатов исследований, полученных несколькими научными группами и опубликованных в работе [Korja et al., 2002].

3. Область моделирования, источник сигнала и численная схема

Область моделирования для численных экспериментов представляла собой прямоугольный участок волновода Земля–ионосфера размером 128x400 км по горизонту, 200 км по высоте в атмосфере и ионосфере и 25 км в глубину в литосфере. Шаг сетки над поверхностью Земли – 500 м по вертикали и по горизонтали, в литосфере – 250 м по вертикали. Центр источника сигнала располагался на расстоянии 64 км от трех боковых граней полученного параллелепипеда.

Источник излучения задавался следующим образом. На расстоянии 74 км от левой вертикальной границы прямоугольной области моделирования на части вертикальной плоскости, параллельной этой границе, шириной 60 км и на высотах от поверхности Земли до 60 км было задано горизонтальное магнитное поле в виде суммы гармонических колебаний на частотах системы «Альфа», а именно 11905, 12679, 14881 Гц [Хафизов, 2010; Jacobsen, 2020]. Для экспериментов с сигналами системы «Бета» было задано горизонтальное магнитное поле в виде суммы гармонических колебаний на частотах 20500, 23000 и 25100 Гц [Бюллетень В15/2015].

Антенны радиотехнической системы дальней навигации-20 (РСДН-20 или «Альфа») представляют собой высокие вертикальные изолированные мачты на растяжках, высотой 462 м. Система «Альфа» состоит из

передатчиков, которые расположены в Новосибирске ($55^{\circ}45'$ с.ш. $84^{\circ}26'$ в.д.), Краснодаре ($45^{\circ}24'$ с.ш. $38^{\circ}09'$ в.д.) и Комсомольске-на-Амуре ($50^{\circ}04'$ с.ш. $136^{\circ}36'$ в.д.). Эти передатчики излучают последовательности сигналов длительностью 3.6 секунд, состоящие из шести импульсов на частотах 11.905 кГц, 12.649 кГц и 14.881 кГц продолжительностью 400 мс с паузами в 200 мс. [Хафизов, 2010; Jacobsen, 2020].

Сеть передатчиков эталонных сигналов государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли «Бета» состоит из следующих радиостанций: RJH69 («Антей»), Вилейка (Белоруссия) ($54^{\circ}27'$ с.ш. $26^{\circ}46'$ в.д.); RJH77 («Геркулес»), Архангельск ($64^{\circ}21'$ с.ш. $41^{\circ}33'$ в.д.); RJH63 («Океан»), Краснодар ($44^{\circ}46'$ с.ш. $39^{\circ}32'$ в.д.); RJH90 («Голиаф»), Нижний Новгород ($56^{\circ}10'$ с.ш. $43^{\circ}55'$ в.д.); RJH86 («Прометей»), Бишкек (Киргизия) ($43^{\circ}02'$ с.ш. $73^{\circ}36'$ в.д.); RAB99 («Титан»), Хабаровск ($48^{\circ}29'$ с.ш. $134^{\circ}49'$ в.д.). Сигналы сети «Бета» представляют собой несущие колебания синусоидальной формы на частотах 20.5, 23 и 25.1 кГц, прерываемые в течение каждых 100 мс на время 5 мс [Бюллетень В15/2015].

В представленном исследовании была использована модель распространения электромагнитных сигналов, основанная на численном интегрировании по времени системы уравнений Максвелла и уравнения для плотности тока с учетом инерции электронов в ионосфере. Модификации этой модели также представлены в работах [Ахметов и др., 2019; Akhmetov et al., 2019a; Akhmetov et al., 2019b].

Схемы были опробованы на известных аналитических решениях и продемонстрировали хорошее соответствие расчетных волновых характеристик, известных из литературы [Ларченко и др., 2018], для таких тонких эффектов, как поляризация волн ионосферного источника в высокоширотной замагниченной ионосферной плазме [Ахметов и др., 2019].

4. Обсуждение результатов

Сигналы системы «Альфа» во время суббури 11.12.2015 г. Численное моделирование распространения электромагнитных волн ОНЧ диапазона в прямоугольном участке волновода Земля–ионосфера для десяти вариантов горизонтально однородных распределений концентраций электронов в ионосфере, описанных в разделе 2 показало значительный рост амплитуды сигнала при переходе от профиля спокойных условий к профилю соответствующему максимальной фазе суббури. Увеличение концентрации электронов в нижней части E слоя и в D слое ионосферы за счет выпадения частиц из магнитосферы во время суббури оказывает наибольшее влияние на сигнал с частотой 11905 Гц, амплитуда электрического поля увеличивается примерно в 10.7 раза, а магнитного поля увеличивается примерно в 5.2 раза.

Волновое сопротивление среды на расстоянии более 160 км от источника для всех трех частот, полученное в результате всех вычислительных экспериментов меньше в спокойных условиях, чем для других профилей. При существенном увеличении концентрации электронов в нижней ионосфере волновое сопротивление среды на частотах 11905 Гц, 12649 Гц и 14881 Гц увеличивается на 10–15 Ом, то есть на 3–5%.

При переходе от спокойных условий к условиям суббури разность фаз между электрической и магнитной компонентами электромагнитного сигнала меняется следующим образом для сигналов на частотах 14881 Гц на 30 градусов, 12649 Гц на 70 градусов, 11905 Гц на 150 градусов. Значительное изменение разности фаз для сигнала на частоте 11905 Гц является хорошим критерием существенных изменений вертикального профиля концентрации электронов в окрестности пункта регистрации ОНЧ-сигналов.

Сигналы системы «Бета» во время прихода межпланетной ударной волны (МУВ) 11.12.2015 г. В условиях МУВ по данным численных экспериментов наблюдалось незначительное усиление поля примерно на 10%, для электрической и магнитной компонент сигнала. Реакция сигналов различной частоты на возмущенные условия в случае возмущения вызванного МУВ как для электрического, так и для магнитного поля в целом одинакова. Разность фаз между электрической и магнитной компонентами электромагнитного поля и волновое сопротивление среды слабо изменяются во время МУВ. Снижение волнового сопротивления в возмущенных условиях не превышает 1 Ома относительно спокойных условий. Зависимость разности фаз от частоты так же очень слабая – менее двух градусов.

Сигналы системы «Бета» во время суббури 11.12.2015 г. В результате проведенных численных экспериментов было обнаружено заметное усиление поля на частоте 25100 Гц в 2 раза для электрической компоненты и более чем в 3 раза для магнитной компоненты сигнала. Реакция амплитуды сигналов различной частоты на возмущенные условия в случае суббури существенно отличается, так амплитуда сигнала с частотой 25100 Гц реагирует сильнее, чем амплитуды сигналов с частотами 23000 и 20500 Гц. Волновое сопротивление снижается в возмущенных условиях относительно спокойных условий изменение превышает 3-4 Ома.

5. Заключение

В условиях магнитной суббури 11 декабря 2015 г. согласно данным численных экспериментов наблюдается значительное отклонение амплитуд сигналов на уровне поверхности Земли. Обнаружено существенное влияние состояния ионосферы на разность фаз между основными электрическими и магнитными компонентами сигналов радионавигационной системы «Альфа» и волновое сопротивление среды, рассчитанное по максимальным амплитудам напряженности электрического и магнитного поля.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что сигналы системы «Альфа» могут быть использованы для геофизических исследований ионосферы.

Взаимодействие межпланетной ударной волны 24 января 2012 года и последующее заметное повышение электронной концентрации в нижней ионосфере по данным численных экспериментов, представленных в работе, оказывает незначительное влияние на амплитуду и фазу электромагнитных волн на частотах, используемых системой вещания эталонных сигналов точного времени и частоты «Бета» и не могут стабильно регистрироваться существующими инструментальными методами на фоне радишумов естественного и техногенного характера. В условиях последующей суббури влияние изменений профиля концентрации электронов в волноводе Земля-ионосфера на амплитудные и фазовые характеристики моделируемых сигналов оказалось более заметным. В целом, по данным численного моделирования прохождения электромагнитных сигналов в волноводе Земля-ионосфера можно сделать вывод, что сигналы системы точного времени «Бета» подходят для геофизических исследований ионосферы гораздо хуже, по сравнению с сигналами радионавигационной системы «Альфа».

Список литературы

- *Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Суворова З.В.* Тестирование численной схемы интегрирования уравнений Максвелла для широкополосных сигналов на задаче распространения электромагнитных волн от ионосферного источника // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 8. С. 193-198. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8.193-198.
- *Ларченко А.В., Пильгаев С.В., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В.* Особенности структуры электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на арх. Шпицберген в экспериментах по нагреву ионосферы // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 3. С. 115-119.
- *Стародубцев С.А., Баишев Д.Г., Григорьев В.Г. и др.* Анализ солнечных, космо- и геофизических событий в сентябре 2017 г. по комплексным наблюдениям ИКФИА СО РАН // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. №. 1. С. 17-38. DOI: 10.12737/szf-51201903.
- *Хафизов А.В.* Радионавигационные системы дальней навигации (РСДН): учебно-методическое пособие. Кировоград: Изд-во ГЛАУ. 2010. 30 с.
- Эталонные сигналы частоты и времени (Бюллетень В15/2015), ФГУП «ВНИИФТРИ»
- *Akhmetov O.I., Mingalev I.V., Mingalev O.V., et al.* Determination of Ulf-Wave Characteristics Most Strongly Reacting to Minor Changes of Ionospheric Electron Density in a High-Latitude Region // Solar-Terrestrial Physics. 2019. V. 5. N 4. pp. 81-90. DOI: 10.12737/stp-54201911.
- *Bashkuev Y., Advokatov V., Buyanova D., Pushkarev M.* Analysis of the conditions for the radio waves propagation in the waveguide "Earth-Ionosphere" on the paths "Novosibirsk-Ulan-Ude" and "Komsomolsk-on-Amur-Ulan-Ude" during magnetic storms august 31-september 12, 2017 // IX International Conference "Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors" (STRPEP 2018). E3S Web of Conferences. 2018. V. 62. id. 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/20186201002.
- *Jacobsen T.* The Russian VLF navaid system alpha, RSDN-20. Halden. Norway. <http://www.vlf.it/alphatrand/alpha.htm>. 2020.
- *Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., Kovtun A.A., et al.* Crustal conductivity in Fennoscandia – a compilation of a database on crustal conductance in the fennoscandian shield // Earth Planets Space. 2002. V. 54. N 5. P. 535–558. DOI:10.1186/BF03353044.
- *Wait J.R., and Spies K.P.* Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. Technical Note 300, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado. 1964. 96 p.