

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.015

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДАЛЬНЕЙ НАВИГАЦИИ РСДН-20 «АЛЬФА» В УЧАСТКАХ ВОЛНОВОДА ЗЕМЛЯ – ИОНОСФЕРА С ГОРИЗОНТАЛЬНО НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

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

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

Аннотация. Представлены результаты моделирования распространения электромагнитных волн ОНЧ диапазона в горизонтально неоднородных участках высокоширотного волновода Земля-ионосфера при различных профилях концентрации электронов. Профили концентрации электронов и частоты столкновений электронов с нейтралами, которые были использованы соответствовали событиям 24 января 2012 г. В это время происходили высыпания высокоэнергетических частиц в полярную ионосферу в результате взаимодействия межпланетной ударной волны с магнитосферой и последующей магнитной суббурей. Частоты модельного источника сигнала соответствовали частотам радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа» постоянно вещающей в диапазоне ОНЧ на территории Российской Федерации. Показано, что изменения амплитуды сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа» вызванные действием геомагнитного поля и горизонтальными неоднородностями зависят от направления распространения сигнала относительно вектора геомагнитного поля и не могут быть обращены в случае изменения направления распространения на противоположное.

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 коллективы авторов использующие сигналы диапазона ОНЧ для получения дополнительных сведений о состоянии ионосферы на пути их распространения. В качестве хорошего примера можно рассматривать международную сеть приемников и передатчиков Antarctic-Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition - VLF Atmospheric Research Konsortium (AARDDVARK) [1]. Несмотря на то, что на территории Российской Федерации отсутствуют исследовательские группы, официально сотрудничающие с данным консорциумом, работы в данном направлении проводятся. Так в работах [2] и [3] для диагностики ионосферы используются фазовые и амплитудные параметры сигналов радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20 «Альфа») [4]. 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. Современные методы численного моделирования распространения радиосигналов позволяют получить свободные от влияния посторонних 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 двух этапное моделирование сигналов системы дальней навигации «Альфа». На первом этапе моделируется источник сигналов системы дальней навигации «Альфа» вблизи города Краснодар (45°24' N 38°09' E), а на втором используются результаты первого этапа для моделирования амплитудных и фазовых характеристик сигналов на несущих частотах системы дальней навигации «Альфа» в области полярных широт при различных состояниях ионосферы.

Профили электронной концентрации, частоты столкновений их с нейтральными частицами и ионами используемые в численных экспериментах

Для моделирования поля источника использовались данные о концентрации электронов и частоты их соударений с нейтральными молекулами и ионами в районе расположения передатчика около города

Краснодар (45°24' N 38°09' E) полученные из ГОСТ Р 25645.157-94. Передатчик, расположенный в районе города Краснодар, был выбран для моделирования из-за его географического положения. Сигнал от него в направлении Кольского полуострова распространяется с очень маленьким углом к горизонтальной составляющей геомагнитного поля. В представленных численных экспериментах на этапе моделирования источника геомагнитное поле принималось горизонтальным направленным вдоль волнового вектора и нормально к волновому вектору. Модуль геомагнитного поля во всех случаях принимался равным $5,3 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Профили электронной концентрации, используемые на втором этапе для моделирования различных состояний высокоширотной ионосферы, получены на основе усредненных за 5 минут данных радара некогерентного рассеивания VHF EISCAT (г. Тромсе) во время события 24 января 2012 года и двух экспоненциальной модели ионосферы Уайта [5]:

$$N_e(h) = 1.43 \cdot 10^7 e^{(-0.15 \cdot h')} e^{[(\beta - 0.15)(h - h')]}$$
 (1)

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.

Частота столкновений с нейтралами и ионами ν_e рассчитывалась на основе данных EISCAT и данных модели NRLMSISE2000 по формулам из [6].

Профиль проводимости литосферы был задан с учетом результатов исследований, полученных несколькими научными группами и опубликованных в работе [7], по формуле

$$\sigma_L(z) = 2 \cdot 10^5 \cdot 10^{(-z - 0.22222 \dots)}$$
 (2)

где z обозначает глубину в км.

Область моделирования и источник сигнала

Численные расчеты проводились в декартовой системе координат, где ось Z располагалась нормально к поверхности Земли. Таким образом область моделирования для численных экспериментов была параллелепипедом, включающим участок волновода Земля–ионосфера.

В численных экспериментах, моделирующих поле антенны РСДН-20 размер области моделирования, составил 192x600 км по горизонтали, 100 км по высоте в атмосфере и ионосфере и 20 км в глубину в литосфере. Шаг сетки над поверхностью Земли – 200 м по вертикали, 750 м по горизонтали, в литосфере – 100 м по вертикали. Источник представлял собой вертикальный диполь с током высотой 400 м (2 узла сетки) в ближайших окрестностях которого задавалось магнитное поле по закону Био-Савара-Лапласа. Диполь располагался на расстоянии 96 км от трех ближайших граней модельной области. Ток в диполе представлял собой сумму гармонических колебаний на частотах радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20, а именно 11905, 12679, 14881 Гц [8;4].

В численных экспериментах с горизонтально неоднородной ионосферой размер модельной области был 512x1650 км 200 км по высоте в атмосфере и ионосфере и 50 км в глубину в литосфере. Шаг сетки над поверхностью Земли – 1000 м по вертикали, 2000 м по горизонтали, в литосфере – 500 м по вертикали. Центр источника сигнала располагался на расстоянии 256 км от трех боковых граней полученного параллелепипеда. В области шириной 250 км на высотах от поверхности Земли до 60 км было задано горизонтальное магнитное поле, полученное при моделировании источника сигналов системы «Альфа». Это позволило в первом приближении задать плоский фронт волны, создаваемой вблизи источника.

Для всех внешних сторон области моделирования, кроме стороны источника, использовалось условие свободного ухода волны вместе с адаптированными поглощающими слоями PML и профилем потерь Беренгера [9], аналогично тому, как это было реализовано в работе [10]. Это позволило снизить уровень отражений сигналов от границ области до 0.1%.

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 использовалась в работах [10-11]. Численные схемы модели были опробованы на известных аналитических решениях и продемонстрировали хорошее соответствие расчетных волновых характеристик, известных из литературы [12-13], для таких эффектов, как поляризация волн ионосферного источника в высокоширотной замагниченной ионосферной плазме [14].

Результаты экспериментов и их обсуждение

Моделирование источника сигналов радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20 «Альфа»)

В работе исследовано поле антенны системы «Альфа» на расстояниях более 10 длин волн от передающей антенны. Концентрация и частота столкновений выбраны согласно модели спокойной ионосферы ГОСТ Р

25645.157-94 для передатчика, расположенного вблизи города Краснодар, Российская федерация (45°24' N 38°09' E). Для случая, когда фоновое геомагнитное поле направлено вдоль направления распространения сигнала в вычислительном эксперименте получено, что вблизи антенны преобладает ТЕ мода, а на расстоянии более 300 км основной становится ТМ мода. В вычислительном эксперименте с вектором фонового геомагнитного поля, направленным нормально к направлению распространения сигнала, наблюдается аналогичная картина, но волноводная ТМ мода выделяется несколько медленнее. Однако характер затухания позволяет предполагать, что в обоих случаях на значительном расстоянии более 500 км до источника, останется только ТМ мода.

Прохождение сигналов системы «Альфа» участка волновода Земля-ионосфера с горизонтально сильно неоднородной концентрацией электронов

В данном подразделе обсуждаются результаты четырех экспериментов в которых моделируется преодоление сигналами радиотехнической системы «Альфа» области быстроизменяющейся электронной концентрации.

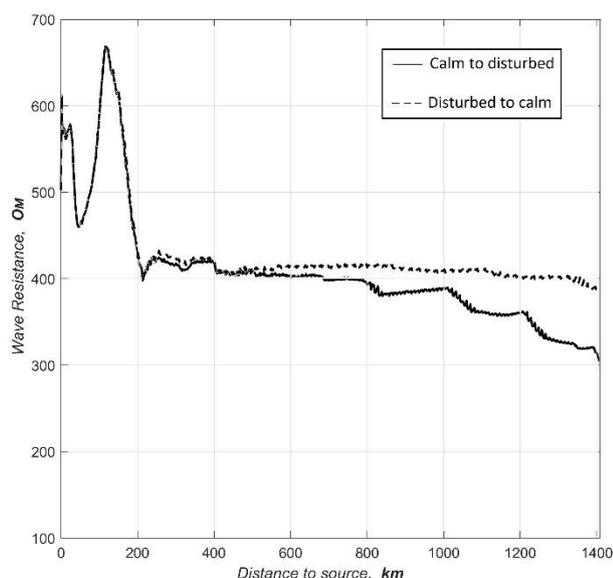


Рисунок 1. Волновое сопротивление в зависимости от расстояния до источника сигнала во время взаимодействия межпланетной ударной волны и магнитосферы с последующим высыпанием заряженных частиц в ионосферу 24 января 2012 года.

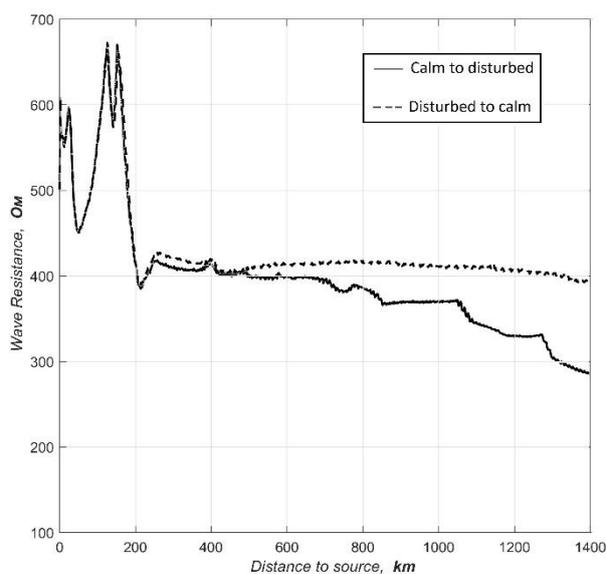


Рисунок 2. Волновое сопротивление в зависимости от расстояния до источника сигнала во время суббури 24 января 2012 года.

В первом эксперименте сигнал из спокойной ионосферы попадает в область с повышенной концентрацией электронов в ионосферной плазме вызванной взаимодействием межпланетной ударной волны и магнитосферы с последующим высыпанием заряженных частиц в ионосферу. Во втором, сигнал, наоборот, из области с повышенной концентрацией электронов попадает в область спокойной ионосферы. В третьем эксперименте сигнал из области спокойной ионосферы попадает в область с повышенной концентрацией электронов вызванной суббурей последовавшей за приходом межпланетной ударной волны. В четвертом, сигнал из области с повышенной концентрацией электронов попадает в область спокойной ионосферы. Эксперименты показали, что переход сигнала из невозмущенной области ионосферы в возмущенную вызывает, незначительное снижение высоты отражения сигнала от нижней ионосферы с 70 км до 68 км в случае межпланетной ударной волны. В случае перехода сигнала из невозмущенной области ионосферы в область повышенной концентрации электронов, вызванной высыпание высокоэнергетических частиц в ионосферу во время суббури вызывает заметное снижение высоты отражения сигнала от ионосферы с высоты 76 км до высоты 70-68 км. Интересно отметить, что во время обоих событий как межпланетной ударной волны, так и последующей суббури в случае перехода из возмущенной области в невозмущенную, высота отражения восстанавливается не полностью особенно во время суббури.

На рисунках 1 и 2 показано волновое сопротивление для рассмотренных ранее вычислительных экспериментов, на рис. 1 событие с межпланетной ударной волной, а на рис. 1 с суббурей. Волновое сопротивление, показанное на графиках, рассчитывалось как отношение амплитуд напряженностей

электрического поля к магнитному зарегистрированных на уровне поверхности Земли. Графики показывают существенную разницу для случая распространении сигналов системы «Альфа» с невозмущенной области в возмущенную и наоборот из возмущенной в невозмущенную, как во время события с межпланетной ударной волной, так и во время суббури. Видно, что влияние суббури более заметно во всех рассмотренных экспериментах.

Выводы

1. На основе вычислительных экспериментов по моделированию сигналов предающей антенны радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа» обнаружена существенная зависимость характера затухания амплитуды в зависимости от направления геомагнитного поля Земли. Показано, что вблизи антенны преобладает TE мода, а на расстоянии более 300 км основной становится TM мода.
2. Вычислительные эксперименты с сильно горизонтально неоднородной электронной концентрацией ионосферы полученной на основе данных радара EISCAT для событий 24 января 2012 года - взаимодействие межпланетной ударной волны с магнитосферой и последующей суббури показали, что изменения амплитуды сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа» вызванные действием геомагнитного поля и горизонтальными неоднородностями зависят от направления их распространения. Таким образом, в случае прохождения сигналов системы «Альфа» через полярные участки волновода Земля-ионосфера во время сложных гелиогеофизических условий на основе наземных измерений амплитуд отдельных компонент электромагнитного поля достоверное восстановление профиля электронной концентрации ионосферы на этих участках без предварительных сведений о её горизонтальной структуре не представляется возможным.

Литература

1. http://www.physics.otago.ac.nz/space/AARDDVARK_homepage.htm (17.10.2021).
2. Bashkuev Y., Advokatov V., et al. 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. STRPEP 2018. E3S Web of Conferences, V. 62. id. 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/20186201002. 2018.
3. Starodubtsev S.A., Baishev D.G., et al. Analyzing solar, cosmic, and geophysical events in September 2017, using SHICRA SB RAS complex observations. Solar-Terrestrial Physics. 2019. V. 5. Is. 1. P. 14–27. DOI: 10.12737/stp-51201903
4. Jacobsen T. The Russian VLF navaid system alpha, RSDN-20. Halden. Norway. <http://www.vlf.it/alphatrand/alpha.htm> (17.10.2021).
5. Wait J.R., 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.
6. Schunk R., Nagy A. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry (2nd ed., Cambridge Atmospheric and Space Science Series). Cambridge: Cambridge University Press. 2009. DOI: 10.1017/CBO9780511635342
7. Korja T., Engels M., 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
8. Хафизов А.В. Радионавигационные системы дальней навигации (РСДН): учебно-методическое пособие. Кировоград: Изд-во ГЛАУ. 2010. 30 с.
9. Berenger J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. J. Computational Phys. 1994. V. 114. N 2. P. 185–200. DOI: 10.1006/jcph.1994.1159
10. Akhmetov O., Mingalev O., et al. About horizontal inhomogeneities of electron concentration influence on the propagation of ULF signals in the Earth ionosphere wave guide. 2019. RWP IEEE. P. 224–227. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810389
11. Akhmetov O.I., Mingalev I.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. P. 81-90. DOI: 10.12737/stp-54201911
12. Лебедь О.М., Пильгаев С.В., и др. Оценка высоты ионосферного источника, образованного при ВЧ-нагреве стендом EISCAT/heating, по данным измерений фаз на сети высокоширотных станций в спокойных и возмущенных гелиогеофизических условиях. Вестник КНЦ РАН. 2017. № 4. С. 67-74.
13. Ларченко А.В., Пильгаев С.В., и др. Особенности структуры электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на арх. Шпицберген в экспериментах по нагреву ионосферы. Вестник КНЦ РАН. 2018. № 3. С. 115-119.
14. Ахметов О.И., Мингалев И.В., и др. Тестирование численной схемы интегрирования уравнений Максвелла для широкополосных сигналов на задаче распространения электромагнитных волн от ионосферного источника. Труды КНЦ РАН. 2019. Т. 8. P. 193-198. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8.193-198