

Изучение поляризационных характеристик крайне низкочастотных сигналов в области ионосферы, возмущенной мощным коротким радиоизлучением.

А. О. Рябов

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия, 603950, Россия, г. Нижний Новгород,
проспект Гагарина, 23, RyabovAIOl@yandex.ru*

Реализовано применение метода сингулярного разложения для численного моделирования возмущений околоземной плазмы, возбуждаемых мощным коротковолновым радиоизлучением с поверхности Земли. Моделирование проводилось на основании данных, зафиксированных бортовой аппаратурой искусственного спутника Земли DEMETER. С помощью моделирования исследованы поляризация и вектор Пойтинга искусственных крупномасштабных возмущений в ионосфере Земли.

Ключевые слова: поляризационные характеристики, ионосфера, метод сингулярного разложения

Investigation of the polarization characteristics of extremely low-frequency signals in the region of the ionosphere disturbed by a powerful short radio emission

A. O. Ryabov

*Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod - National Research University
603950 Nizhnij Novgorod, 23 Prospekt Gagarina (Gagarin Avenue)
E-mail: RyabovAIOl@yandex.ru*

The application of the singular value decomposition method for numerical simulation of near-Earth plasma perturbations excited by powerful short-wave radio radiation from the Earth's surface is realized. The simulation was carried out on the basis of data recorded by the onboard equipment of the DEMETER artificial Earth satellite. The polarization and Poyting vector of artificial large-scale disturbances in the Earth's ionosphere are studied using simulation.

Keywords: polarization characteristics, ionosphere, singular value decomposition method

Введение

Нагрев ионосферы мощным КВ радиоизлучением наземных станций является одним из самых эффективных методов, позволяющих осуществлять систематические исследования околоземной плазмы с контролируемыми параметрами воздействия.

Воздействие мощного КВ радиоизлучения на F-область ионосферы может создавать значительные возмущения как в области отражения волны накачки, так и во всей толще ионосферы.

Исследования воздействия мощного КВ радиоизлучения на околоземную плазму позволили определить характеристики плазменно-волновых возмущений в нижней части ионосферы [1], в то время как параметры возмущений выше F-области остаются сравнительно малоизученными.

Непосредственные (in situ) измерения с применением бортовой аппаратуры искусственных спутников Земли позволили получить результаты только о локальных характеристиках турбулентности на высотах внешней ионосферы [2-4]. Для результативного изучения пространственной структуры и динамики развития искусственной ионосферной турбулентности во всех слоях ионосферы необходимо

проведение измерений с высоким пространственным (по высоте, широте, долготе) и временным разрешением, что в настоящее время затруднительно.

В данной работе используется метод сингулярного разложения, который позволяет провести численное моделирование, используя данные бортовой аппаратуры искусственного спутника Земли, и получить общие параметры ионосферных возмущений, создаваемых при воздействии мощного КВ-радиоизлучения. Входными параметрами моделирования служили данные серии натуральных экспериментов «Сура»-DEMETER.

Сингулярное разложение

Существует несколько спектральных методов определения параметров среды, исходя из известных комплексных амплитуд магнитных и электрических полей. Однако в рамках настоящего исследования большинство из них оказываются неэффективными: либо вследствие природы рассматриваемых явлений [5], либо по причине ограниченного количества данных [6]. Таким образом, наиболее результативным выглядит метод сингулярного разложения [7].

Распространение плазменно-волновых возмущений в ионосфере описывается системой уравнений:

$$A \cdot \vec{k} = 0, \quad (1)$$

где $\vec{k} = \vec{k} / k$ - нормированный волновой вектор, а \hat{A} - это матрица порядка 6×3 и определяется следующим выражением:

$$A = \begin{pmatrix} RS_{11} & RS_{12} & RS_{13} \\ RS_{12} & RS_{22} & RS_{23} \\ RS_{13} & RS_{23} & RS_{33} \\ 0 & -IS_{12} & -IS_{13} \\ IS_{12} & 0 & -IS_{23} \\ IS_{13} & IS_{23} & 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где компоненты $S_{ij} = B_i B_j^*$ определяются через значения комплексных амплитуд магнитных полей.

Метод сингулярного разложения позволяет решить систему (1) и определить параметры плазменно-волновых возмущений, в том числе их поляризацию.

Сингулярным разложением матрицы \hat{A} порядка $m \times n$ является разложение следующего вида:

$$A = U \cdot W \cdot V^T, \quad (3)$$

где W - матрица размера $m \times n$, а матрицы U и V - это две унитарные матрицы, состоящие из левых и правых сингулярных векторов (а V^T - это сопряженно-транспонированная матрица к V).

Используя метод сингулярного разложения, находятся формулы для определения поляризации плазменно-волновых возмущений в ионосфере:

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan(\sqrt{\kappa_1^2 + \kappa_2^2} / \kappa_3), \\ \phi &= \arctan(\kappa_2 / \kappa_1), \quad \kappa_1 \geq 0, \\ \phi &= \arctan(\kappa_2 / \kappa_1) - \pi, \quad \kappa_1 < 0, \quad \kappa_2 < 0, \\ \phi &= \arctan(\kappa_2 / \kappa_1) + \pi, \quad \kappa_1 < 0, \quad \kappa_2 \geq 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где θ - полярный угол, изменяющийся от 0° до 90° , ϕ - азимутальный угол, изменяющийся от -180° до 180° , κ_1 , κ_2 , κ_3 - диагональные элементы матрицы V . Убывающая последовательность из этих элементов дает собственные значения матрицы

W , через которые можно определить планетарную поляризацию волн магнитного поля и соотношение осей эллипса поляризации:

$$F = 1 - \sqrt{w_1 / w_3}, \quad (5)$$

$$L_p = w_2 / w_3.$$

Для получения полной картины распространения плазменно-волновых возмущений рассчитывается вектор плотности потока энергии электромагнитного поля [8]. Исходя из значений компонент комплексных амплитуд магнитных и электрических полей, получаем формулу:

$$D_\alpha = F_z / \sigma(F_z) = \frac{RS_{y\alpha} a_x - RS_{x\alpha} a_y}{\sigma(RS_{y\alpha}) |a_x| - \sigma(RS_{x\alpha}) |a_y|}, \quad (6)$$

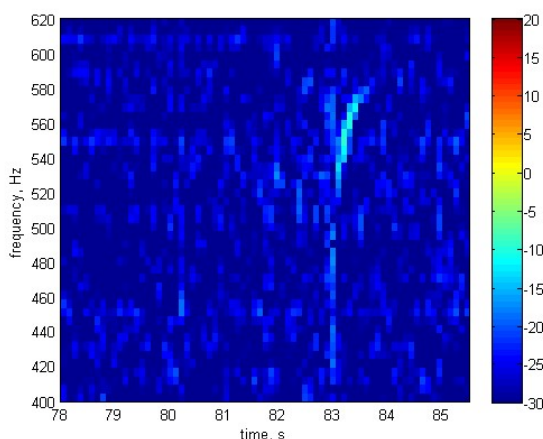
где F_z - вектор Пойтинга, $\sigma(RS_{nm}) = \sqrt{S_{nm} S_{nm} - RS_{nm}^2 + IS_{nm}^2} / \sqrt{2}$ - стандартное отклонение.

Постановка эксперимент «Сура»-DEMETER

В период с 2005 по 2010 гг. была проведена серия экспериментов по спутниковым измерениям характеристик плазменно-волновых возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере Земли при нагреве ее F-области мощным КВ-радиоизлучением среднеширотного нагревного стенда «Сура» (59.15^0 N, 46.1^0 E) [3, 9-13]. Непосредственные измерения выполнялись с помощью бортовой аппаратуры французского микроспутника DEMETER (высота орбиты спутника приблизительно 660 км) при его пролете через возмущенную магнитную силовую трубку.

В настоящей работе наиболее характерные результаты были получены в рамках эксперимента, проведенного 27.08.2009 г. в вечерние часы. Стенд излучал в течение времени 18:00:00 – 18:07:30 UT в непрерывном режиме радиоволны O-поляризации на частоте $f_{pump} = 4300$ кГц с эффективной мощностью излучения $P_{eff} = 40$ МВт. В этом эксперименте диаграмма направленности была направлена вертикально вверх. Область отражения волны накачки находилась на высоте $h_{refl} = 240$ км. Поперечный масштаб области турбулентного нагрева определяется диаграммой направленности стенда и в данном случае составляет порядка 70 км.

Эксперимент проводился в достаточно спокойных геомагнитных условиях. Значение индекса планетарной геомагнитной активности в рассматриваемое время $K_p = 3$.



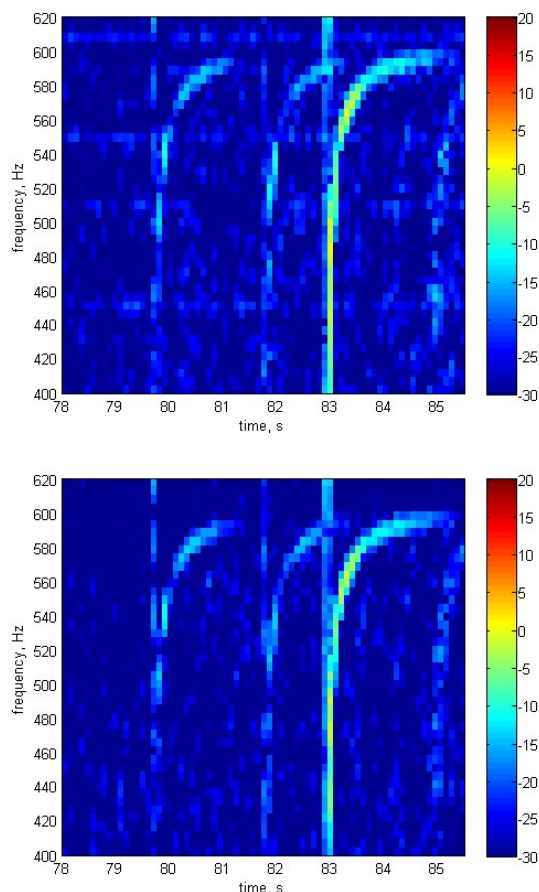


Рис. 1. Спектральные диаграммы компонент возмущений магнитного поля на высотах внешней ионосферы для эксперимента, проведенного 27.08.2009 г

На Рис. 1 представлены спектральные диаграммы компонент возмущений магнитного поля, полученные с помощью обработки данных бортовой аппаратуры спутника DEMETER. Характерной особенностью данных спектрограмм заключается в загибе дисперсионных кривых и их обрезании в окрестности гирочастоты ионов гелия ($f_{H_{He^+}}$) и атомарного водорода ($f_{H_{H^+}}$).

Расчет поляризационных характеристик

Входными параметрами в рамках проведения моделирования являлись: дата и время проведения эксперимента, широта и долгота места пролета спутника, значения компонент магнитных и электрических полей. Для расчета искомым характеристик использовался метод сингулярного разложения.

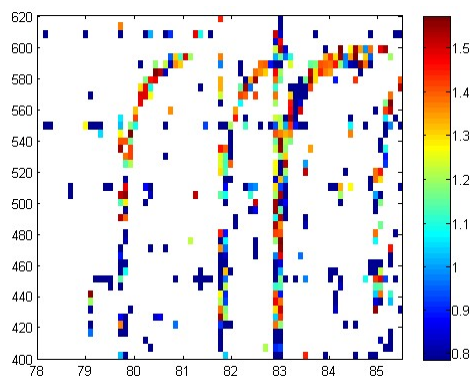


Рис. 2. Спектрограмма полярного угла плазменно-волновых возмущений в ионосфере

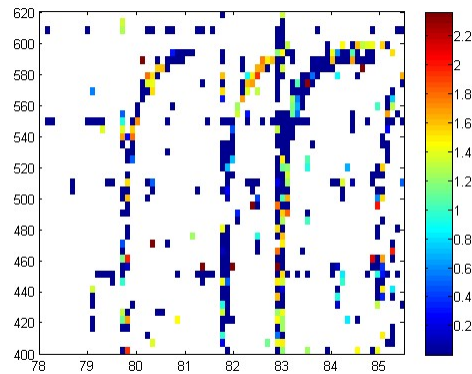


Рис. 3. Спектрограмма азимутального угла плазменно-волновых возмущений в ионосфере

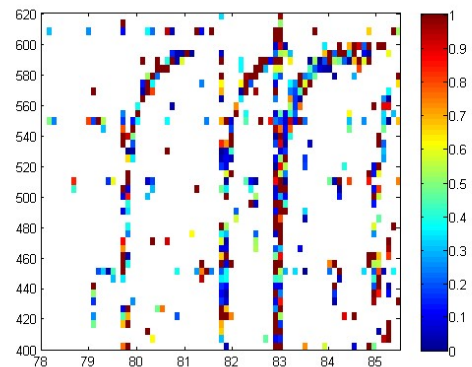


Рис. 4. Спектрограмма планетарной поляризации волн магнитного поля

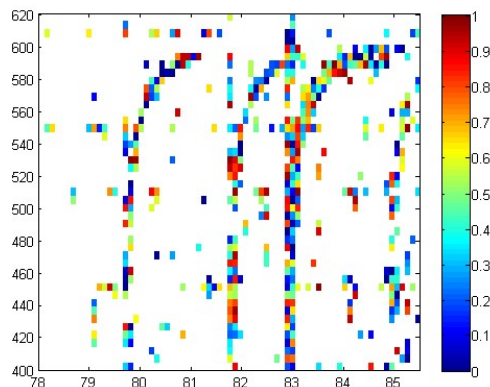


Рис. 5. Спектрограмма величины соотношения осей эллипса поляризации

На Рис. 2-5 представлены полученные при моделировании характеристики плазменно-волновых возмущений в ионосфере: спектрограммы полярного и азимутального углов, планетарной поляризации волн магнитного поля, величины соотношения осей эллипса поляризации. Данные результаты получены для периода времени с 18:03:40 по 18:03:50 27.08.2009 г.

На Рис. 2 видно, что загиб дисперсионных характеристик сопровождается изменением полярного угла на 30° - 40° . Кроме того, на Рис.3 видно, что данный загиб может сопровождать резким изменением азимутально угла (вплоть до 90°). Изменение поляризации плазменно-волновых возмущений при приближении в гирочастоте ионов гелия свидетельствует об изменении природы данных волн.

Спектрограмма на Рис. 4 характеризует систему (1). Если величина планетарной поляризации F близка к единице, то система уравнений (1) имеет один или два ненулевых

собственных значений, то система вырождается в одно или два уравнения. В случае, если F меньше единицы, то система имеет три ненулевых собственных значения.

На Рис. 5 представлены спектрограмма величины соотношения осей эллипса поляризации L . Когда данная величина близка к единице, то поляризация круговая. Когда L близка к нулю, то поляризация линейная. Таким образом, можно сделать вывод о том, что до загиба ($\omega < 520$ Гц) поляризация наблюдаемых волн квазилинейная, а после загиба структура может сильно измениться, и поляризация становится круговой. Особенно заметно рассматриваемое явление на наиболее мощной, менее подверженной шумам, правой дисперсионной характеристике.

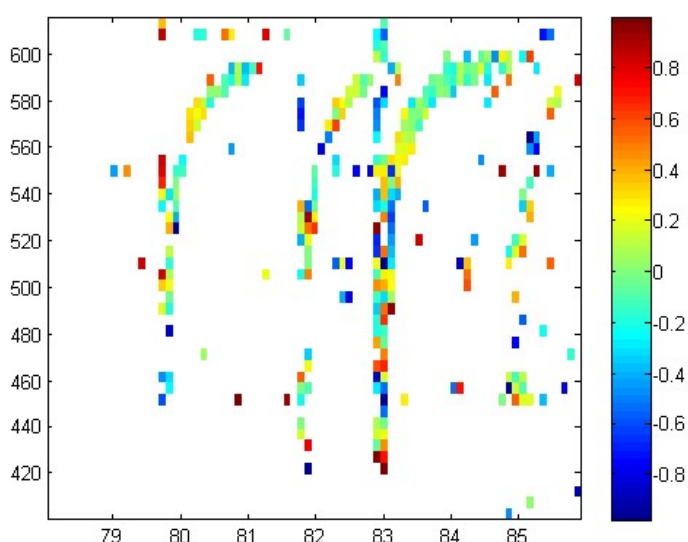


Рис. 6. Спектрограмма отнормированного вектора плотности потока энергии электромагнитного поля

На основании Рис. 6 можно сделать вывод о поведении вектора Пойтинга. Если значение положительное, то вектор плотности потока энергии направлен вверх. Если отрицательный, то вниз. Можно разделить эту спектрограмму на три части. До 520 Гц значение вектора Пойтинга принимает значения во всем диапазоне, следовательно, нет выделенного направления энергии. С 520 до 580 Гц вектор Пойтинга слабо положителен (0,1-0,3), что говорит о направлении энергии вверх. Однако после 580 Гц вектор Пойтинга, наоборот, становится слабо отрицательным (от -0,2 до 0), что говорит о направленности энергии вниз.

Представленные на Рис. 2-6 результаты показывают разную структуру плазменно-волновых возмущений в ионосфере до загиба ($\omega < 520$ Гц) и после него. Подобные структурные изменения объясняются энергетическим обменом и соответствуют возбуждению ионно-циклотронных волн.

Выводы

В настоящей работе рассмотрена структура распространения плазменно-волновых возмущений в ионосфере, на которую оказано воздействие мощным наземным КВ-радиоизлучением. Возникновение неоднородных крупномасштабных возмущений околоземной плазмы происходит из-за анизотропии процесса самофокусировки волны накачки.

Анализ картины наблюдаемых явлений с помощью метода сингулярного разложения позволил проанализировать поляризацию возмущений плазмы и направленности вектора плотности потока энергии электромагнитного поля. Показано, что начиная с

определенных частот дисперсионные характеристики приобретают специфический загиб, характеризующийся отличной поляризацией и энергетическими свойствами.

Для F -слоя ионосферы Земли основными компонентами являются атомарный водород, ионы гелия и атомарного кислорода, поэтому дисперсионные кривые для волн, распространяющихся вдоль геомагнитного поля, пересекаются на двух, так называемых перекрестных, частотах f_{cross} [14], где показатель преломления для двух характеристических волн (быстрой магнитозвуковой, выше гирочастоты ионов переходящей в электронный свист, и ионно-циклотронной волны) один и тот же. На частотах пересечения этих кривых возможен энергетический обмен между характеристическими волнами, в результате чего возможно возбуждение ионно-циклотронных волн. При распространении ионно-циклотронной волновой пакет приходит с большим запаздыванием в силу малой групповой скорости, что объясняет характерный загиб на наблюдаемых спектрограммах волновых возмущений. По наблюдаемым спектрограммам возможно определять относительные концентрации ионов (по частотам f_{cross}), а также ионную гирочастоту на высоте спутника (по значению частот отсечки) [11].

В ходе настоящей работы было обнаружено изменение параметров распространяющихся волн после частоты f_{cross} , а именно изменение полярного (на 30° - 40°) и азимутального (вплоть до 90°) углов, смена квазилинейной поляризации на круговую и упрощение энергетической картины.

Таким образом, результаты моделирования подтверждают возбуждение ионно-циклотронных волн на частотах выше f_{cross} и позволяют глубже понять природу явлений, возникающих при воздействии мощным радиоизлучением на ионосферу.

Представленные в докладе исследования А. О. Рябова выполнялись при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-52-15007.

Литература

1. Л. М. Ерухимов, С. А. Метелев, Е. Н. Мясников и др., Изв. ВУЗов. Радиофизика 30, 208 (1987).
2. В. М. Костин, Ю. А. Романовский, В. М. Чмырев и др., Космич. иссл. 31, 84 (1993).
3. В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Г. П. Комраков и др., Письма в ЖЭТФ 88, 908 (2008).
4. G. M. Milikh, E. Mishin, I. Galkin et al., Geophys. Res. Lett. 37 L18102 (2010).
5. R. L. McPherron, C. T. Russel, P. J. Coleman Jr., Space Sci. Rev., 13, 411 (1972).
6. J. C. Samson, Geophys. J. R. Astron. Soc. 34, 403 (1973).
7. O. Santolik, M. Parrot, F. Lefeuvre, Radio Sci. 38, 1010 (2003).
8. O. Santolik, F. Lefeuvre, M. Parrot et al. Geophys. Res. 106, 13191 (2001).
9. В. О. Рапопорт, В. Л. Фролов, Г. П. Комраков и др., Изв. ВУЗов. Радиофизика 50, 709 (2007).
10. Г. А. Марков, А. С. Белов, В. Л. Фролов и др., ЖЭТФ 138 1037 (2010).
11. Рябов А.О. Определение ионного состава внешней ионосферы на основе характеристик КНЧ-СНЧ-волн, регистрируемых во время работы стенда «СУРА». // Физика плазмы. – 2018. – Т. 44, № 11. – С. 916-921.
12. Фролов В.Л., Лукьянова Р.Ю., Белов А.С., Болотин И.А., Добровольский М.Н., Рябов А.О., Шорохова Е.А. Характеристики плазменных возмущений, возбуждаемых на высотах 450 – 500 км при работе стенда "Сура". // Известия вузов. Радиофизика. – 2018. – Т.61, №5, – С. 359-373.
13. Рябов А.О., Фролов В.Л. Связь между потенциалом искусственного спутника Земли и температурой электронов в верхней ионосфере. // Известия вузов. Радиофизика. – 2019. – Т. 62, № 10, – С. 736-746.
14. А. Д. Колесник, Волны в околоземной плазме, ТМЛ-Пресс, Томск (2007).