

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННОГО СОСТАВА ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

А.О. Рябов

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия  
RyabovAIOI@yandex.ru

## METHOD FOR DETERMINING ION COMPOSITION IN THE OUTER IONOSPHERE

A.O. Ryabov

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia  
RyabovAIOI@yandex.ru

**Аннотация.** На основе спектральных характеристик наблюдаемых излучений реализован метод оценки ионного состава околоземной плазмы. Метод верифицирован по результатам натурных измерений на высотах внешней ионосферы Земли.

**Ключевые слова:** ионосфера, плазма, ионы.

**Abstract.** Based on the spectral characteristics of the observed radiation, a method for estimating the ion composition of near-earth plasma is implemented. The method is verified by the results of field measurements at the heights of the earth's outer ionosphere.

**Keywords:** ionosphere, plasma, ions.

### ВВЕДЕНИЕ

Определение ионного состава в ионосфере является одной из актуальных задач современной экспериментальной физики плазмы. На основе характеристик наблюдаемых КНЧ-СНЧ-излучений предлагается независимый метод оценки ионного состава на высотах внешней ионосферы.

На рис. 1 представлены полученные с помощью Метода сингулярного разложения (МСР) характеристики плазменно-волновых возмущений в ионосфере на частотах порядка гирочастоты ионов водорода (600 Гц) [Parrot et al., 2007; Ryabov, 2018]. Входными данными для получения результатов были время и три компоненты магнитного поля.

На верхней панели рис. 1 видно, что вертикальные линии на спектрограммах характеризуются практически неизменными значениями полярного угла (вариации не более  $10^\circ$ ) и азимутального угла (вариации не более  $20^\circ$ ). Загиб спектральных характеристик сопровождается изменением полярного угла на  $35\text{--}45^\circ$  и резким изменением азимутального угла (вплоть до  $90^\circ$ ). Стоит отметить, что сами загибы тоже имеют вариации углов (около  $20^\circ$ ).

Особенность (загиб) дисперсионных кривых указывает на то, что на определенной частоте  $\omega_{co}$ , называемой перекрестной частотой, возможен энергетический обмен между характеристическими волнами (быстрой магнитозвуковой и ионно-циклотронной) [Колесник, 2007].

Используемые результаты сеанса за 27.08.2009, были подтверждены аналогичными результатами для других сеансов.

### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННОГО СОСТАВА

Как следует из рис. 2, перекрестная частота характеризуется квазипродольным распространением вдоль геомагнитного поля (около  $9^\circ$  между волновым вектором и направлением геомагнитного поля). Для волновых нормалей, которые очень близки к на-

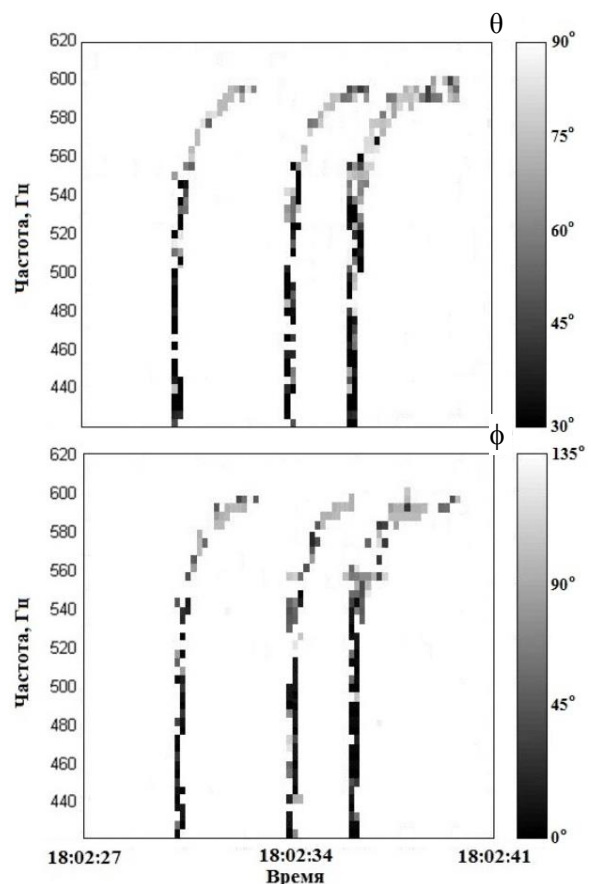


Рис. 1. Характеристики плазменно-волновых возмущений в ионосфере: частотно-временные зависимости полярного и азимутального углов (верхняя и нижняя панели)

правлению магнитного поля, поляризация и показатели преломления двух характеристических волн почти одни и те же там, где  $\omega = \omega_{co}$ , и одна волна возбуждает другую при своем распространении [Ратклифф, 1975]. В связи с этим может быть применен метод определения ионного состава на высотах внешней ионосферы Земли [Колесник, 2007].

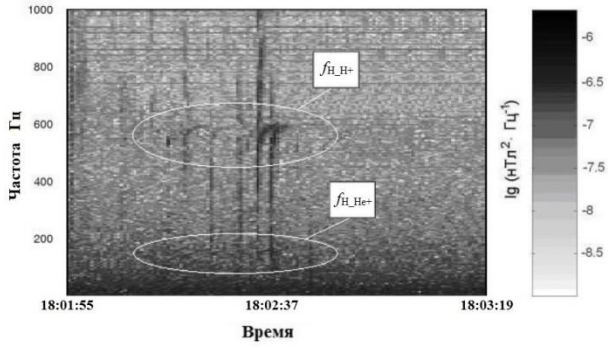


Рис. 2. Спектрограмма волновых возмущений магнитного поля для сеанса 27.08.2009 г.

В ионосферной плазме в большинстве обстоятельств необходимо учитывать присутствие нескольких сортов ионов, имеющих различные массы, а следовательно, и различные гирочастоты  $\Omega$ . Практически все ионы в ионосферной плазме относятся к ионам трех типов ( $H^+$ ,  $He^+$ ,  $O^+$ ) с концентрациями  $n_1, n_2, n_3$  и массами  $m_1, m_2, m_3$  соответственно. При этом должно выполняться условие квазинейтральности:

$$n_1 + n_2 + n_3 = n_e, \quad (1)$$

где  $n_e$  — концентрация электронов. Тогда можно записать выражение для ионов водорода:

$$X_1 = \frac{n_1 e^2}{\epsilon_0 m_1 \omega^2} = \frac{n_1 m_e}{n_e m_1} X_e = \frac{A_1}{M_1} X_e,$$

где введены обозначения:

$$A_1 = n_1/n_2, \quad M_1 = m_1/m_e.$$

Аналогично можно записать выражения для ионов гелия и кислорода.

Далее введем обозначение:

$$Y = \Omega/\omega.$$

Тогда:

$$Y_1 = Y_e/M_1, \quad Y_2 = Y_e/M_2, \quad Y_3 = Y_e/M_3.$$

Для поляризации можно записать [Колесник, 2007]:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_e + \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_3,$$

где  $\mathbf{P}_e$  — вектор поляризации электронов, а  $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$  и  $\mathbf{P}_3$  — векторы поляризации соответствующих ионов.

Величина  $(n^2 - 1)$  получается путем сложения отдельных векторов поляризации от электронов и трех сортов ионов и в результате получаем выражение [Колесник, 2007]:

$$n^2 - 1 = - \left( \frac{X_e}{1 \pm Y_e} + \frac{X_1}{1 m Y_1} + \frac{X_2}{1 m Y_2} + \frac{X_3}{1 m Y_3} \right), \quad (2)$$

где  $n^2$  — квадрат показателя преломления.

Дисперсионные ветки, являющиеся решениями для верхнего и нижнего знаков, пересекаются на перекрестной частоте  $\omega_{co}$ . Тогда из (2) при  $\omega = \omega_{co}$  можно приравнять решения для верхнего и нижнего знаков и после ряда преобразований получить

$$\frac{\omega_{co}^2}{\Omega_e^2} = \frac{A_1}{\left(\frac{\Omega_e}{\omega_{co}}\right)^2 - M_1^2} + \frac{A_2}{\left(\frac{\Omega_e}{\omega_{co}}\right)^2 - M_2^2} + \frac{A_3}{\left(\frac{\Omega_e}{\omega_{co}}\right)^2 - M_3^2}. \quad (3)$$

Из (3) можно получить выражения для ионов водорода и ионов гелия, и вместе с преобразованным условием квазинейтральности (1) они образуют систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{A_1}{\alpha_1^2 - 1} + \frac{A_2}{\alpha_1^2 - 16} + \frac{A_3}{\alpha_1^2 - 256} = \frac{1}{\alpha_1^2}, \\ \frac{A_1}{16\alpha_2^2 - 1} + \frac{A_2}{16\alpha_2^2 - 16} + \frac{A_3}{16\alpha_2^2 - 256} = \frac{1}{16\alpha_2^2}, \\ A_1 + A_2 + A_3 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

где  $\alpha_1 = \frac{\Omega_{H1}}{\omega_{co1}}, \quad \alpha_2 = \frac{\Omega_{He2}}{\omega_{co2}};$   $\Omega_{H1}, \Omega_{He2}$  — гирочастоты

ионов водорода и гелия,  $\omega_{co1}, \omega_{co2}$  — перекрестные частоты.

Таким образом, зная гирочастоты и перекрестные частоты можно определить ионный состав среды.

Используя данные сеанса за 27.08.2009 г., представленные на рис. 2, можно определить значения гирочастот ионов и перекрестные частоты.

Частота отсечки для верхнего загиба соответствует гирочастоте ионов водорода ( $\Omega_{H1} = 600$  Гц), а частота, где вертикальная линия начинает загибаться, соответствует перекрестной частоте ( $\omega_{co1} = 570$  Гц). Аналогичным образом определяются искомые величины для нижнего загиба ( $\Omega_{He2} = 150$  Гц,  $\omega_{co2} = 138$  Гц). Подставляя эти величины в систему уравнений (4), получаем следующие значения относительного содержания ионных компонент для трех моментов времени:

- 1) для 18:02:30:  $A_1 = 0.19; A_2 = 0.20; A_3 = 0.61;$
- 2) для 18:02:34:  $A_1 = 0.22; A_2 = 0.20; A_3 = 0.58;$
- 2) для 18:02:37:  $A_1 = 0.13; A_2 = 0.15; A_3 = 0.72;$

где  $A_1, A_2, A_3$  — относительные концентрации ионов водорода, гелия и кислорода соответственно.

На рис. 3 представлены данные концентрации ионов основных компонент среды, полученные с помощью бортовой аппаратуры ИСЗ DEMETER (вертикальным линиям «1», «2» и «3» соответствуют моменты времени 18:02:30, 18:02:34 и 18:02:37).  $A_1, A_2, A_3$  — относительные концентрации ионов водорода, гелия и кислорода в процентах. Числами на рисунках обозначены абсолютные значения плотностей компонент ионов в  $см^{-3}$ .

Результаты представленного выше метода хорошо соответствуют экспериментальным данным (расхождение — около 7 %). Таким образом, описанный способ позволяет достаточно точно определить ионный состав на высотах внешней ионосферы Земли.

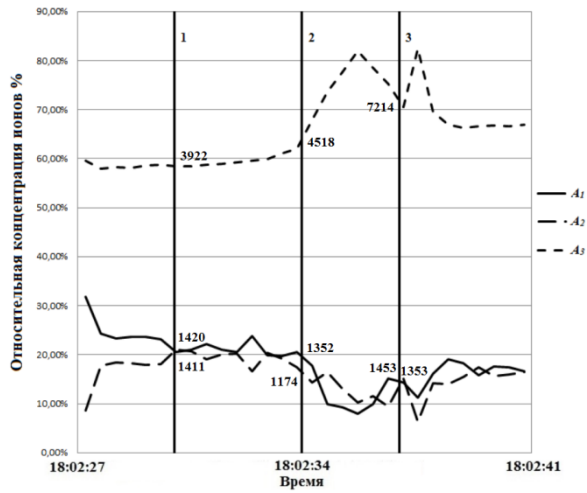


Рис. 3. Относительная концентрация разных сортов ионов ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  — соответственно водород, гелий и кислород)

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (грант № 3.1844.2017/4.6). Исследования Рябова А.О. выполнялись при поддержке РФФИ (грант № 19-52-15007).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Колесник А.Д. Волны в околоземной плазме. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007.  
 Ратклифф Д. Введение в физику ионосферы и магнитосферы. М.: Мир, 1975.  
 Parrot M., Sauvaud J.A., Berthelier J.J., Lebreton J.P. // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L11111.  
 Ryabov A.O. Determination of the Ion Composition of the Outer Ionosphere from the Characteristics of ELF-VLF Waves Detected during the Operation of the Sura Facility // Plasma Physics Reports. 2018. V. 44, N 12. P. 1140–1145.