

СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

УДК 621.317.361.029.42

С.А. КОЛЕСНИК, А.А. КОЛМАКОВ, Д.А. НЕДОСЕКОВ

**ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА
КРАЙНЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА В ТОМСКЕ**

Представлены результаты анализа поляризационных характеристик мод шумановских резонансов за 2014 г. в сезонном цикле наблюдений. Экспериментально определены распределения коэффициента эллиптичности для первых трех мод шумановских резонансов. Показано, что частота появления эллиптической поляризации для разных мод шумановских резонансов составляет ~ 70–80 %. Круговая поляризация – крайне редкое событие, частота ее появления менее 1 % для любого сезона года. Для первой моды шумановских резонансов преобладает правая поляризация.

Ключевые слова: шумановские резонансы, поляризация электромагнитных волн, мониторинг.

Введение

Экспериментальные исследования магнитных компонент естественного электромагнитного фона КНЧ-диапазона проводятся с января 2013 г. на полигоне Томского государственного университета «Коларово» (17 км от г. Томска, 56.34 с.ш., 84.95 в.д.) [1]. Измерения, организованные за пределами индустриального центра, позволяют выделять моды шумановских резонансов (ШР) [2]. Для измерений используется трехкомпонентный индукционный магнитометр LEMI-30 [3]. Трехкомпонентные измерения позволяют определять не только энергетические и частотные характеристики ШР, но также дают возможность вычислять и ряд других важных параметров, к числу которых относятся поляризационные характеристики ЭМ-волн [4].

Первое исследование поляризационных характеристик ШР было представлено в работе [5] (D.D. Sentman, 1987 г.). В настоящее время интерес к определению поляризационных характеристик ШР весьма велик, чему способствует потенциальная возможность определения диэлектрических свойств нижней ионосферы Земли и характеристик глобальной грозовой активности, являющейся основным источником возбуждения ШР.

Целью работы является исследование статистических закономерностей возникновения различных видов поляризации ШР в зависимости от сезона года.

Методика определения поляризационных характеристик

Первый этап определения поляризационных характеристик состоит в следующем. Суточные временные реализации горизонтальных магнитных компонент разбивается на 480 трехминутных интервала, для каждого из которых вычисляются усредненные энергетические S_{xx} -, S_{yy} - и взаимные S_{xy} -спектры [6]:

$$S_{ij}(f_n) = H_i(f_n)H_j^*(f_n); \tag{1}$$

$$H_x(f_n) = \sum_{k=0}^{N-1} H_x(t_k) e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} \equiv \sum_{k=0}^{N-1} \left(H_x^k \cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) + iH_x^k \sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) \right) \equiv \text{Re} H_x(f_n) + i \text{Im} H_x(f_n), \tag{2}$$

где i и j соответствуют каналам «север-юг» (X) и «восток-запад» (Y); $H_x(f_n)$ – комплексная амплитуда компоненты X на частоте f_n ; n – номер спектральной гармоники ($n = 0 \dots N/2$); k – номер временного отсчета [$0 \dots N-1$] (соответствует интервалу 10 с), $N = 128 \text{ Гц} \times 10 \text{ с} = 1280$, для компоненты $H_y(f_n)$ – аналогично. Подробно методика расчета спектральных характеристик электромагнитного фона и выделение мод шумановских резонансов (резонансных частот и амплитуд мод ШР) представлена в работе [7].

На втором этапе по полученным спектральным реализациям горизонтальных компонент модуля магнитной индукции происходит расчет параметров Стокса [4] для каждой частоты (здесь и далее зависимость от частоты опускается):

$$\begin{aligned}
 I &\equiv S_{xx} + S_{yy} = (\operatorname{Re} H_x)^2 + (\operatorname{Im} H_x)^2 + (\operatorname{Re} H_y)^2 + (\operatorname{Im} H_y)^2, \\
 Q &\equiv S_{xx} - S_{yy} = (\operatorname{Re} H_x)^2 + (\operatorname{Im} H_x)^2 - (\operatorname{Re} H_y)^2 - (\operatorname{Im} H_y)^2, \\
 U &\equiv 2 \operatorname{Re} S_{xy} = 2(\operatorname{Re} H_x \operatorname{Re} H_y + \operatorname{Im} H_x \operatorname{Im} H_y), \\
 V &\equiv 2 \operatorname{Im} S_{xy} = 2(\operatorname{Im} H_x \operatorname{Re} H_y - \operatorname{Re} H_x \operatorname{Im} H_y).
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Далее, используя выражение (3), вычисляется коэффициент эллиптичности ε :

$$\varepsilon = \frac{V}{\sqrt{Q^2 + U^2} + \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}.
 \tag{4}$$

Коэффициент эллиптичности ε принимает значения от -1 до $+1$. Для линейной поляризации $\varepsilon = 0$, при ± 1 имеет место круговая поляризация, причем положительному знаку ε соответствует вращение вектора H в горизонтальной плоскости по часовой стрелке, отрицательному – в противоположном направлении.

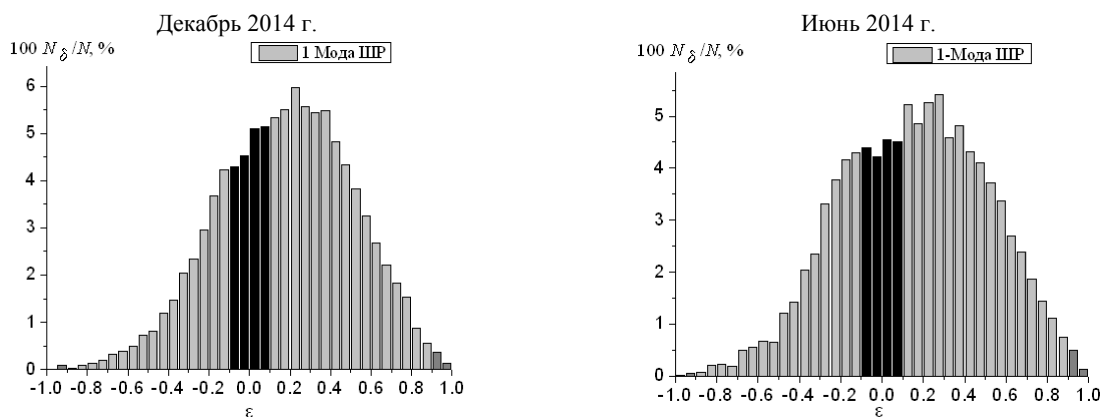
Анализ полученных результатов

Для расчета параметров Стокса было написано специализированное программное обеспечение [8], с помощью которого для каждого месяца 2014 г. были вычислены коэффициенты эллиптичности для первых трех мод шумановских резонансов (см. рис. 1).

Разделение на виды поляризации осуществлялись следующим образом. Строго линейной поляризации соответствует значение $\varepsilon = 0$. Однако для получения надежной количественной оценки линейной поляризации диапазон значений был расширен до ± 0.1 . Аналогичным образом определялась частота появления круговой поляризации. Все оставшиеся значения относятся к эллиптической поляризации. На рис. 1 светло-серым цветом обозначена эллиптическая поляризация, черным – линейная, а темно-серым (края распределения) – круговая.

Полученные за 2014 г. результаты показали, что для всех трех рассмотренных мод ШР во все сезоны года доминирующей является эллиптическая поляризация. Круговая поляризация – явление крайне редкое (менее 1 %). Характерной особенностью первой моды ШР является преимущественно правое вращение вектора магнитной индукции в горизонтальной плоскости (55–65 % в зависимости от сезона года). У третьей моды ШР наоборот вращение преимущественно левое (~ 40 %). Вторая мода ШР почти в равной мере имеет как левую, так и правую поляризацию, с небольшим преобладанием последней: в летний период (~ 48 %), в зимний (~ 35 %), весной и осенью ~ 44 %.

Частота появления эллиптической поляризации в зимний период (декабрь) для первой моды суммарно составляет 80.3 %, для второй и третьей 74.1 и 68.3 % соответственно. Отмечено, что с увеличением номера моды происходит уменьшение частоты появления эллиптической поляризации и увеличение частоты появления линейной. Так, например, в июне для первой моды линейная поляризация зарегистрирована в 17.7 %, для второй и третьей в 21.8 и 25.3 % случаев соответственно. В это время частота появления эллиптической поляризации уменьшается с 81.7 % для первой моды к значениям 77.8 и 74.3 % для второй и третьей мод.



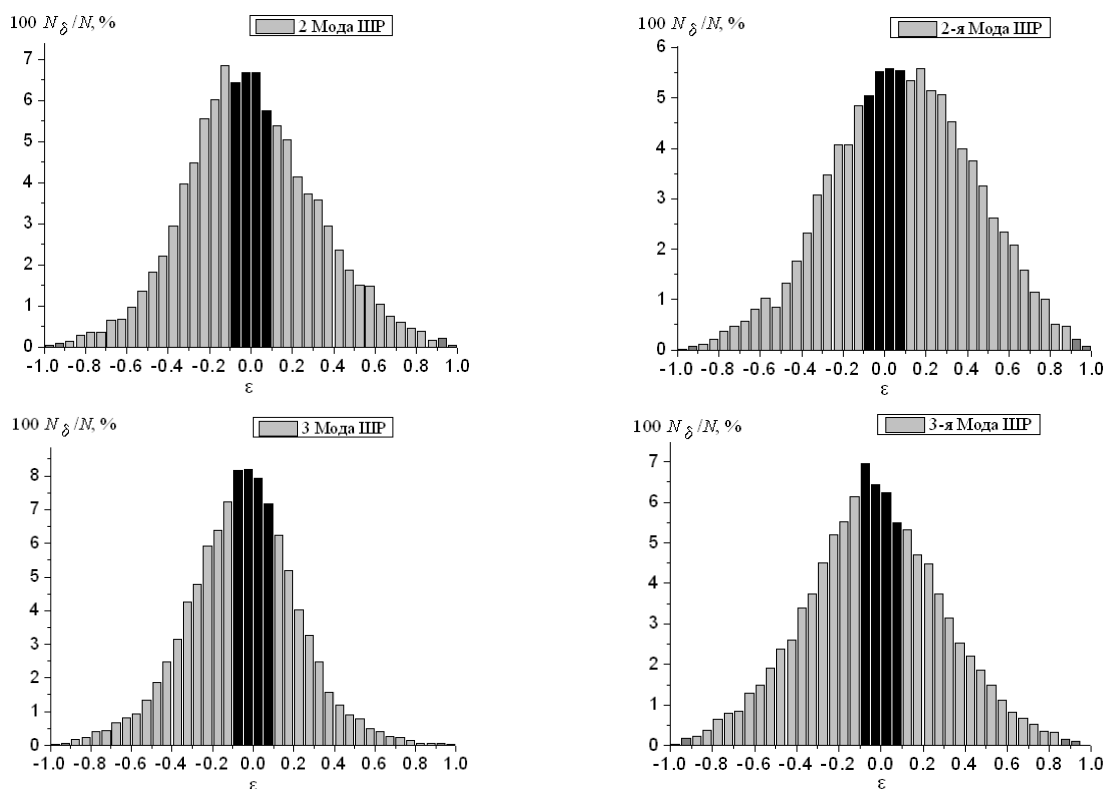


Рис. 1. Распределения частоты появления различных видов поляризации для первых трех мод ШР

Заключение

Экспериментально определены распределения коэффициента эллиптичности, для первых трех мод шумановских резонансов для различных сезонов 2014 г. Установлено наличие сезонного хода частоты появления для различных видов поляризации у первых трех мод ШР.

Показано, что частота появления эллиптической поляризации для разных мод шумановских резонансов составляет $\sim 70\text{--}80\%$. Круговая поляризация – крайне редкое событие, частота ее появления менее 1 % для любого сезона года.

Для первой моды шумановских резонансов преобладает правая поляризация, что хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [5]. С повышением номера моды ШР частота появления эллиптической поляризации уменьшается, а линейной поляризации – напротив увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесник С.А., Колмаков А.А., Недосеков Д.А., Тарасенков М.В. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 10/3. – С. 27–29.
2. Колесник А.Г., Колесник С.А., Колмаков А.А., Шинкевич Б.М. Шумановские резонансы. 1. Мониторинг электромагнитного фона КНЧ-диапазона // Изв. вузов. Физика. – 2003. – Т. 46. – № 2. – С. 69–73.
3. Индукционный магнетометр LEMI-30. Техническое описание. – Львов, 2010. – 31 с.
4. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. – М.: Наука, 1981. – 640 с.
5. Sentman D. D. // Radio Sci. – 1987. – V. 22. – No. 4. – P. 595–606.
6. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
7. Kolesnik S. A., Kolmakov A. A., Nedosekov D. A. // Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. – 92924V (November 25, 2014); doi:10.1117/12.2075501; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2075501>.
8. Колмаков А.А., Недосеков Д.А., Хаитов Р.К. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013619037. Программа для расчета поляризационных параметров мод шумановских резонансов по данным трехкомпонентного магнитометра «LEMI 30». М.: РОСПАТЕНТ. – 24.09.2013.

Колесник Сергей Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент;
Колмаков Александр Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент;
Недосеков Даниил Александрович, аспирант.

S.A. KOLESNIK, A.A. KOLMAKOV, D.A. NEDOSEKOV

POLARIZATION CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC FIELD EXTREMELY LOW FREQUENCY IN TOMSK

The paper presents an analysis of polarization characteristics of the Schumann Resonance modes for the 2014 seasonal cycle observations. Distributions of a coefficient of ellipticity for the first three modes of the Schumann resonances have been experimentally determined. It is shown that the frequency of occurrence of elliptical polarization for different modes of the Schumann resonance is ~ 70–80 %. Circular polarization is a very rare event; the frequency of its occurrence is less than 1 % for every season of the year. For the first mode of the Schumann resonance the right polarization dominates.

Keywords: Schumann resonance, polarization of electromagnetic waves, monitoring.

REFERENCES

1. Kolesnik S.A., Kolmakov A.A., Nedosekov D.A., Tarasenkov M.V. Rezultaty magnitnich izmereni elektromagnitnogo fona krainenizkochastotnogo diapazona v zagorodnoy zone. *Izv. Vuzov. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 10/3, pp. 27–29. (In Russ.)
2. Kolesnik A.G., Kolesnik S.A., Kolmakov A.A., Shinkevich B.M. Shumanovskie resonansy. 1. Monitoring elektromagnitnogo fona krainenizkochastotnogo diapazona. *Izv. Vuzov. Fizika*. 2003, vol. 46, no. 2, pp. 69–73. (In Russ.)
3. *Induktsionnyy magnetometr LEMI-30. Technical description*. Lviv, 2010, 31 p. (In Russ.)
4. Achmanov S.A., D'yakov Yu.E., Chirkin A.S. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku i optiku*. Moscow, Nauka Publ., 1981, 640 p. (In Russ.)
5. Sentman D.D. Magnetic elliptical polarization of Schumann resonances. *Radio Science*, 1987, vol. 2, no.4, pp. 595–606.
6. Gonorovsky I.S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly*. Moscow, Radio i Sviyaz Publ., 1986, 512 p. (In Russ.)
7. Kolesnik S.A., Kolmakov A.A., Nedosekov D.A. Resonances in the Earth-ionosphere cavity according to the data of magnetic observations in Tomsk. Proc. SPIE 9292, 20th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 92924V (November 25, 2014); doi:10.1117/12.2075501; <http://dx.doi.org/10.1117/12.2075501>.
8. Kolmakov A.A., Nedosekov D.A., Khaitov R.K. Sertifikat o gosudarstvennoy registracii programmy dlya EVM no. 2013619037. Programma dlya rascheta polarizatsionnykh parametrov mod shumanovskikh resonansov po dannym trehkomponentnogo magnetometra «LEMI 30». Moscow, ROSPATENT, 24.09.2013. (In Russ.)

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia
E-mail: kolmakov@mail.tsu.ru

Kolesnik Sergey Anatolievich, Ass. Prof., Ph.D.;
Kolmakov Aleksander Anatolievich, Ass. Prof., Ph.D.;
Nedosekov Daniil Aleksandrovich, Postgraduate Student.