

## ПЕРИОДЫ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН ВО ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЯХ $f_oF_2$ ПО ДАННЫМ ИОНОЗОНДА ВАРШАВА ВО ВРЕМЯ ЗИМ 2014–2019 гг.

С.А. Рябова

<sup>1</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия  
riabovasa@mail.ru

## PLANETARY WAVE PERIODS IN $f_oF_2$ TIME VARIATIONS BASED ON DATA OBTAINED BY WARSAW IONOSONDE IN WINTERS OF 2014–2019

S.A. Ryabova

<sup>1</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
riabovasa@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты анализа вариаций критической частоты F2-слоя, полученные для зимних периодов 2014–2019 гг. Данные были получены при высотно-частотном зондировании ионосферы, выполненном Центром космических исследований Польской академии наук (Польша, Варшава) с помощью ионозонда VISRC2. Результаты спектрального анализа, выполненного на основе непрерывного вейвлет-преобразования и преобразования Фурье, показали, что в спектрах временных вариаций в диапазоне планетарных волн в зимний период присутствуют как гармоники, связанные с солнечной активностью, так и гармоники, соответствующие планетарным волнам.

**Ключевые слова:** планетарные волны, критическая частота, F2-слой ионосферы, спектр.

**Abstract.** This paper presents the results of analysis of variations in the critical frequency of the F2 layer obtained in winters of 2014–2019. The data were obtained during high-altitude-frequency sounding of the ionosphere performed by the Space Research Center of the Polish Academy of Sciences (Warsaw, Poland) using the VISRC2 ionosonde. The results of the spectral analysis performed using the continuous wavelet transform and the Fourier transform showed that the spectra of time variations in the range of planetary waves in winter contain harmonics associated with solar activity and harmonics corresponding to planetary waves.

**Keywords:** planetary waves, critical frequency, F2 layer of the ionosphere, spectrum.

### ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера подвержена многим вариациям. Изменения освещенности атмосферы Солнцем в течение суток или года приводят к возникновению суточных и годовых вариаций соответственно [Шалимов, 2018; Rishbath, Garriott, 1969].

Типичные для планетарных волн периоды (близкие к периодам 2, 5, 10 и 16 сут) были сначала обнаружены в вариациях ионосферного поглощения радиоволн (D-область), которые ассоциировались с одновременными 5-суточными волнами в стратосфере [Frazer, 1977].

Результаты исследований [Forbes, Leveroni, 1992; Forbes, Zhang, 1997] в целом подтверждают подобие спектров возмущений (в диапазоне периодов планетарных волн) в атмосфере и различных ионосферных слоях. Вместе с тем было обращено внимание и на возможность проникновения этих возмущений на высоту более 100 км [Deng et al., 1997; Hagan et al., 1993].

В настоящей работе анализируются результаты высотно-частотного зондирования ионосферы, выполненного Центром космических исследований Польской академии наук (Польша, Варшава) во время зим 2014–2019 гг.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В настоящей работе в качестве характеристики ионосферы использовались результаты определения критической частоты F2-слоя на основе анализа ионограмм, полученных Центром космических исследований Польской академии наук в ходе высот-

но-частотного зондирования ионосферы в Варшаве (ионозонд VISRC2) [<http://www.rwc.cbk.waw.pl>].

Технические характеристики ионозонда: мощность 10 кВт, длительность импульса 100 мс, период дискретизации 5 мкс, разрешение по частоте 25 Гц, аппаратное разделение обыкновенной и необыкновенной компонент. Зондирование выполняется каждые 15 мин. Географические координаты ионозонда: 52.21° N, 21.06° E.

Ионограммы регистрируют следы отражений высокочастотных импульсных радиосигналов, генерируемых ионозондами, от различных слоев ионосферы. Наиболее высокая частота отражения от какого-либо ионосферного слоя при вертикальном зондировании называется критической частотой этого слоя.

С 2008 г. ионозонд VISRC2 снабжен программой автоматической обработки данных Autoscala [Enell et al., 2016], обеспечивающей получение основных ионосферных параметров каждые 15 мин.

При проведении настоящих исследований в процессе анализа экспериментальных данных каждая ионограмма подвергалась ручной обработке и интерпретации по методике URSI [Руководство..., 1977]. Следует отметить, что определение ионосферных характеристик, в том числе критической частоты F2-слоя, часто затруднено. При анализе ионограмм отсутствие измерений или сомнительность в правильности определения характеристики помечается в соответствии с принятыми обозначениями [Wakai et al., 1987].

В результате обработки ионограмм были сформированы неэквидистантные цифровые ряды значе-

ний критической частоты F2-слоя с дискретизацией 15 мин.

С целью получения информации о частотном составе исследуемых цифровых рядов в настоящей работе использовался спектральный анализ.

При выполнении спектрального оценивания мы не смогли применить хорошо зарекомендовавший себя при анализе спектров на частотах, близких к планетарным волнам, параметрический метод на основе авторегрессионной модели [Riabova, Shalimov, 2020; Рябова, Шалимов, 2021a], поскольку этот метод применяется только к эквидистантным рядам.

В рамках настоящих исследований применяется метод спектрального оценивания неэквидистантных рядов, предложенный Ломбом [Lomb, 1976] и впоследствии модернизированный Скаргллом [Scargle, 1982]. В основе метода Ломба — Скаргла лежит аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК-аппроксимация) сигнала гармоническими функциями [Рябова, Шалимов, 2021б]. Отличительной особенностью метода является то, что оценка данных происходит по самим точкам отсчетов, а не по временным промежуткам, что позволяет сигналу иметь переменный шаг дискретизации.

Кроме того, временные ряды анализировались с помощью непрерывного вейвлет-преобразования. Непрерывное вейвлет-преобразование определяется как свертка сигнала с масштабированной и преобразованной версией вейвлет-функции. Изменяя масштаб вейвлета и перемещая по локализованному времени, можно построить картину, показывающую как амплитуду любого признака в зависимости от масштаба, так и изменение этой амплитуды со временем [Riabova, 2018]. В настоящей работе в качестве базисного вейвлета используется вейвлет Морле.

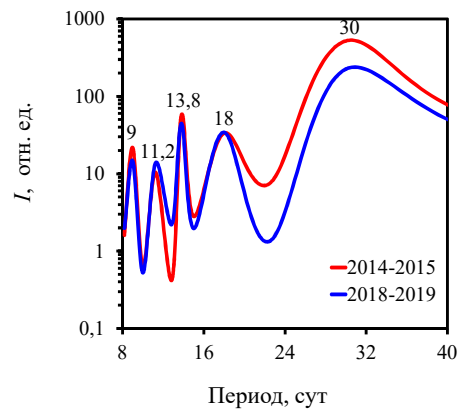
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе было выполнено сопоставление спектров геомагнитных вариаций, полученных методом Ломба—Скаргла (в том числе с искусственно созданным длинным пропуском данных) и параметрическим методом на основе авторегрессионной модели. В результате тестирования было установлено, что спектры, полученные разными методами, практически совпадают.

Остановимся подробнее на спектрах временных вариаций критической частоты F2-слоя ( $f_oF2$ ), полученных с применением метода Ломба—Скаргла.

На рисунке приведены фрагменты спектров вариаций критической частоты F2-слоя для зимних периодов 2018–2019 гг. и 2014–2015 гг.

Спектральный анализ цифрового ряда значений  $f_oF2$  за зимний период 2018–2019 гг. выявил следующие спектральные пики: пик (~30 сут), соответствующий 27-суточной периодичности; пики с периодами ~13.8 и 9 сут, обусловленные 27-суточными гармониками; пики с периодами ~18 и 11.2 сут, соответствующие квази-16-дневной и квази-10-дневной планетарным волнам. Аналогичные результаты были получены при спектральном анализе временных вариаций  $f_oF2$  за период с декабря 2014 г. по февраль 2015 г.



Периодограммы вариаций  $f_oF2$ , определенных по ионограммам, полученным с помощью ионозонда VISRC2 в Варшаве во время зим 2014–2015 и 2018–2019 гг., в диапазоне периодов от 8 до 40 сут

В отличие от спектра за зимний период 2018–2019 гг. в спектре за зимний период 2014–2015 гг. пики, соответствующие 27-суточной периодичности и ее гармоникам, проявляются ярче. Как и в случае спектров вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля, интенсивность спектральных пиков квази-16-дневной и квази-10-дневной планетарных волн не зависит от солнечной активности.

В целом результаты спектрального анализа, выполненного на основе непрерывного вейвлет-преобразования и фурье-преобразования, показали, что временные вариации  $f_oF2$  демонстрируют наличие волновых процессов с периодом порядка 5–6 сут, а также более длительных — с периодом ~10–13 и 23–30 сут. В спектрах присутствуют как гармоники, связанные с солнечной активностью, так и гармоники, соответствующие планетарным волнам Россби.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании представленных результатов можно сделать следующие выводы. Помимо гармоник, обусловленных воздействием Солнца, во временном поведении  $f_oF2$  проявляются периоды вариаций длительностью примерно 15–16, 10–11 и 5–6 сут. Эти результаты подтверждают аналогичные выводы в работах других авторов [Тимченко и др. 2021; Apostolov, Altadill, 1996]. Отметим также, что такие периоды вариаций соответствуют периодам планетарных волн Россби, которые возбуждаются в нижней атмосфере.

Появление вариаций плотности плазмы с периодом 5-, 10- и 16-суточных волн в верхней ионосфере представляется необъяснимым, если учесть, что моделирование распространения планетарных волн в верхнюю атмосферу [Hagan et al., 1993] и эксперимент [Deng et al., 1997] показывают невозможность проникновения этих возмущений существенно выше 100 км. Однако можно предположить, что проявление этих волн обусловлено модуляцией планетарными волнами распространяющихся в верхнюю ионосферу приливов. Стоит отметить, что подобный механизм был предложен для объяснения модуляции приливов 10-суточной планетарной волной [Lawrence, Jarvis, 2001].

Экспериментальные исследования выполнены в рамках государственного задания ИДГ РАН № 1220329000185-5 «Проявление процессов природного и техногенного происхождения в геофизических полях», интерпретация результатов выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А. *Геомагнитные эффекты природных и техногенных процессов*. М.: ГЕОС, 2021. 264 с.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / Под редакцией П.В. Медниковой. М.: Наука. 1977. 342 с.
- Рябова С.А., Шалимов С.Л. О геомагнитных вариациях, наблюдаемых на поверхности Земли в диапазоне периодов планетарных волн. *Физика Земли*. 2021а. № 1. С. 51–60.
- Рябова С.А., Шалимов С.Л. О вариациях параметров плазмы ионосферы, наблюдаемых посредством ионозонда и на магнитной станции в диапазоне периодов планетарных волн. *Физика Земли*. 2021б. № 6. С. 122–130.
- Тимченко А.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю. Н. и др. Особенности вариаций критической частоты F2-слоя во время внезапных стратосферных потеплений 1966–2009 гг. по данным станций Калининград и Иркутск. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2021. Т. 61, № 1. С. 94–102.
- Шалимов С.Л. *Атмосферные волны в плазме ионосферы*. М.: ИФЗ РАН. 2018. 390 с.
- Apostolov E.M., Altadill D. Ten periodic bands of  $f_oF_2$  quasi-periodic oscillations from 2 to 35 days. *Bulgarian Geophys. J.* 1996. Vol. 21, no. 3. P. 20–24.
- Deng W., Salah J.E., Clar R.R., et al. Coordinated global radar observations of tidal and planetary waves in the mesosphere and lower thermosphere during January 20–30, 1993. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, no. A4. P. 7307–7318.
- Enell C-F., Kozlovsky A., Turunen T., et al. Comparison between manual scaling and Autoscala automatic scaling applied to Sodankylä Geophysical Observatory ionograms. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*. 2016. Vol. 5. P. 53–64. DOI: [10.5194/gi-5-53-2016](https://doi.org/10.5194/gi-5-53-2016).
- Forbes J.M., Leveroni S. Quasi 16-day oscillation of the ionosphere. *Geophys. Res. Lett.* 1992. Vol. 19. P. 981–984.
- Forbes J.M., Zhang X. Quasi 2-day oscillation of the ionosphere: a statistical study. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. Vol. 59. P. 1025–1034.
- Fraser G. The 5-day wave and ionospheric absorption. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1977. Vol. 39. P. 121–124.
- Hagan M.E., Forbes J.M., Vial F. Numerical investigation of the propagation of the quasi-two-day wave into the lower thermosphere. *J. Geophys. Res.* 1993. Vol. 98. P. 23193–23205.
- Lomb N.R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophys. Space Sci.* 1976. Vol. 39. P. 447–462.
- Riabova S. Application of wavelet analysis to the analysis of geomagnetic field variations. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. Vol. 1141. 012146. DOI: [10.1088/1742-6596/1141/1/012146](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1141/1/012146).
- Riabova S.A., Shalimov S.L. Features of geomagnetic variations in the period range from 12 to 17 days according to the Mikhnevo Observatory. *Proc. SPIE. Vol. 11560: 26<sup>th</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 115607J (12 November 2020)*. DOI: [10.1117/12.2575699](https://doi.org/10.1117/12.2575699).
- Rishbeth H., Garriott O.K. *Introduction to Ionospheric Physics*. Academic press. 1969. 304 p.
- Scargle J.D. Studies in astronomical time series analysis II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly sampled data. *Astrophys. J.* 1982. Vol. 263. P. 835–853.
- Wakai N., Ohya H., Koizumi T. *Manual of ionogram scaling: 3rd edition*. Japan: Radio Research Laboratory, Ministry of Posts and Telecommunications, 1987. 119 p.
- URL: <http://www.rwc.cbk.waw.pl> (дата обращения 10 мая 2022 г.).