

СПЕКТР ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ СЕРПЕНТИННОЙ ЭМИССИИ КАК ОТРАЖЕНИЕ СПЕКТРА СОЛНЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ

SPECTRUM OF FREQUENCY MODULATION OF SERPENTINE EMISSION AS A REFLECTION OF THE SOLAR FLUCTUATION SPECTRUM

Б.В. Довбня

*Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН,
Борок, Россия, dovbnya@inbox.ru*

Б.И. Клайн

*Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН,
Борок, Россия, klain@borok.yar.ru*

А.В. Гульельми

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, guglielmi@mail.ru*

А.С. Потапов

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru*

B.V. Dovbnya

*Borok Geophysical Observatory of IPE RAS,
Borok, Russia, dovbnya@inbox.ru*

B.I. Klain

*Borok Geophysical Observatory of IPE RAS
Borok, Russia, klain@borok.yar.ru*

A.V. Guglielmi

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS,
Moscow, Russia, guglielmi@mail.ru*

A.S. Potapov

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, potapov@iszf.irk.ru*

Аннотация. По данным антарктической станции Восток исследуется частотная модуляция серпентинной эмиссии (SE). Показано, что обнаруженная ранее 5-минутная модуляция несущей частоты является наиболее характерной и устойчивой в спектре эмиссии. Колебания частоты с таким периодом присутствуют при умеренно-спокойной геомагнитной возмущенности ($K_p=0-2$) примерно в 70 % от общего времени наблюдения SE. В спектре мощности модуляции SE, полученном после попиксельной оцифровки исходной сонограммы сигнала, отчетливо выделяется пик на периодах, близких к 5 мин. При детальном изучении найдено соответствие спектра эмиссии спектру короткопериодных колебаний Солнца. По результатам проведенного анализа делается вывод, что модуляцию несущей частоты серпентинной эмиссии с периодом 5 мин можно рассматривать как отражение колебаний в фотосфере с тем же периодом, характерным для собственных колебаний Солнца.

Ключевые слова: серпентинная эмиссия, частотная модуляция, спектр мощности, колебания солнечной фотосферы.

Abstract. We study frequency modulation of serpentine emission (SE), using data from the Vostok Antarctic station. It is shown that the previously observed 5-minute modulation of the SE carrier frequency is the most prominent and stable in the emission spectrum. Frequency fluctuations of this period are present in about 70 % of the total SE observation time under moderately quiet geomagnetic conditions ($K_p=0-2$). We performed a per-pixel processing of SE dynamic spectra and found that the power spectrum of the signal frequency modulation contains a clearly visible peak at periods close to 5 minutes. A detailed study shows the emission spectrum matching the frequency range of the solar photospheric oscillations. The results of the analysis allow us to conclude that the 5-minute modulation of the SE carrier frequency can be viewed as a reflection of photospheric fluctuations with the same period that is typical for the solar eigenoscillations.

Keywords: serpentine emission, frequency modulation, power spectrum, photospheric oscillations.

ВВЕДЕНИЕ

Серпентинная эмиссия — квазинепрерывные геомагнитные пульсации, которые часами, а иногда и сутками наблюдаются в области полярной шапки в спокойной и умеренной геомагнитной обстановке. Основное свойство этого излучения определяется глубокой модуляцией несущей частоты, изменяющейся на 1–2 октавы в диапазоне частот от 0.01 до 5 Гц. Излучение было обнаружено в 70-е годы прошлого

столетия в Антарктиде на ст. Восток [Гульельми, Довбня, 1973, 1974; Guglielmi, Dovbnya, 1974]. Характерные свойства SE позволили предположить, что частотно-модулированные колебания проникают в полярные шапки из межпланетной среды, где они возбуждаются в виде ионно-циклотронных волн в результате неустойчивости плазмы с анизотропным распределением ионов по скоростям [Гульельми, Довбня, 1973, 1974; Guglielmi, Dovbnya, 1974]. В дальнейшем эмиссия была также зарегистрирована на

станции «Дэвис» [Morris, Cole, 1987] и в Северном полушарии на арктической станции «Нью-Олесунн», Шпицберген [Asheim, 1983]. Свойства SE обсуждались и уточнялись в работах [Гульельми, Довбня, 1973, 1974; Guglielmi, Dovbnya, 1974; Гульельми, 1979; Troitskaya, 1979; Fraser-Smith, 1982; Asheim, 1983; Morris, Cole, 1986, 1987; Guglielmi, Pokhotelov, 1996]. Одна из недавно обнаруженных особенностей серпентинной эмиссии состоит в том, что в спектре SE присутствует устойчивая, длящаяся несколько часов 5-минутная модуляция несущей частоты [Guglielmi et al., 2015]. Подобный пример показан на рис. 1.

Факт совпадения периода обнаруженной в спектре SE частотной модуляции с 5-минутным периодом, характерным для колебаний фотосферы Солнца, представляет несомненный интерес, так как, по всей видимости, свидетельствует о существовании генетической связи частотной модуляции эмиссии с пульсациями солнечной поверхности.

В настоящей работе более детально исследуются спектральные особенности SE по наблюдениям на обсерватории Восток за 1966–1971 гг.

МАТЕРИАЛЫ АНАЛИЗА

Материалом для анализа послужили архивные данные с записями УНЧ-колебаний на магнитную ленту. Наблюдения выполнялись на антарктической станции Восток (геомагнитные координаты станции: $\Phi = -89.3^\circ$; долгота $\Lambda = 139.5^\circ$) с 1966 по 1971 г. Для последующего анализа магнитные записи оцифровывались и строились спектрограммы, на которых в координатах частота–время отражалась информация о динамике спектрального состава сигнала в интервале 0–5 Гц. Были также использованы K_p - и A_p -индексы для анализа геомагнитной возмущенности.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

В спектре серпентинной эмиссии 5-минутная модуляция прослеживается наиболее ярко. Колебания с таким периодом присутствуют примерно в 70 % от общего времени наблюдения SE. Они могут наблюдаться как в «чистом» виде, так и одновременно с другими периодами. На рис. 2 приведен фрагмент записи SE длительностью 12 ч с периодом частотной модуляции, близким к 5 мин.

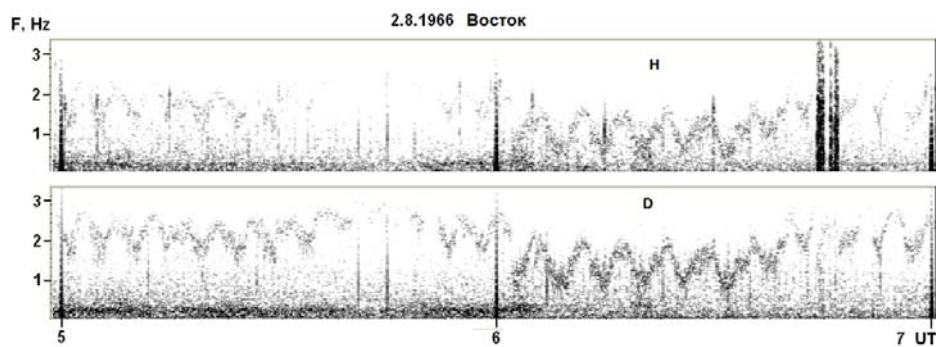


Рис. 1. Пример динамического спектра H- и D-компонент SE с 5-минутной модуляцией несущей частоты

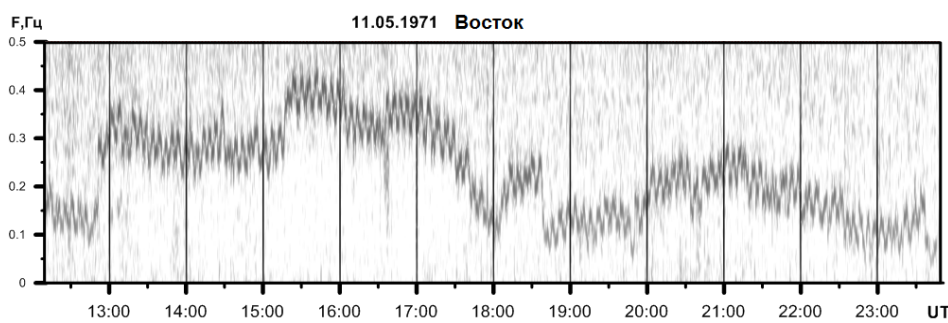


Рис. 2. Серпентинная эмиссия с 5-минутной частотной модуляцией

Попиксельная обработка изображений спектрограмм позволяет получить дискретный ряд значений кривой, описывающей вариацию частоты серпентинной эмиссии, по которой затем находится относительная спектральная плотность сигнала. Пример полученного спектра показан на рис. 3. Для сравнения мы на рис. 4 приводим спектр колебаний солнечной поверхности, полученный при доплеровском анализе интенсивности проинтегрированного по

поверхности Солнца светового потока. Видно, что максимумы спектральных плотностей совпадают и, более того, ширины полос спектров SE и колебаний поверхности Солнца отличаются незначительно.

Следует обратить внимание на одно обстоятельство. Для достижения требуемой разрешающей способности спектра солнечных колебаний по частоте и подавления солнечного шума в наблюдениях, как правило, сигналы анализируются когерентно в течение

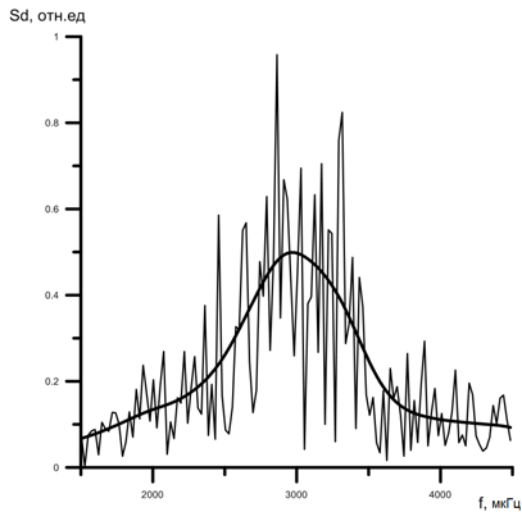


Рис. 3. Спектр мощности колебаний частоты серпентинной эмиссии для события 11.05.1971 г.

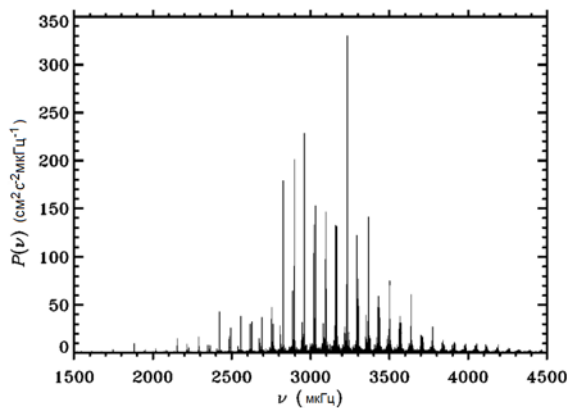


Рис. 4. Спектр мощности солнечных колебаний, зарегистрированных по доплеровским наблюдениям интенсивности света, проинтегрированного по диску Солнца. Данные получены по шести станциям и охватывают примерно четыре месяца наблюдений (см. [Elsworth et al., 1995; Christensen-Dalsgaard, 2002])

ние нескольких месяцев [Christensen-Dalsgaard, 2002], в то время как наблюдения SE позволили бы отслеживать осцилляции поверхности Солнца почти в реальном времени.

Представляется интересным выяснить, как возмущенность магнитосферы влияет на вероятность наблюдения пульсаций SE. Для этого нами проанализировано три месяца непрерывных записей магнитного поля обсерватории Восток с апреля по июнь 1971 г. При этом в 1284 часовых интервалах наблюдается серпентинная эмиссия с 5-минутной модуляцией несущей частоты. На рис. 5 приведена гистограмма распределения часовых интервалов с излучением SE в зависимости от A_p -индекса, который линейно зависит от уровня возмущенности магнитосферы.

В большинстве случаев SE с 5-минутной модуляцией наблюдается при умеренно-спокойной геомагнитной возмущенности ($A_p=0-6$, соответственно $K_p=0-2$) примерно в 70 % от общего времени наблюдения.

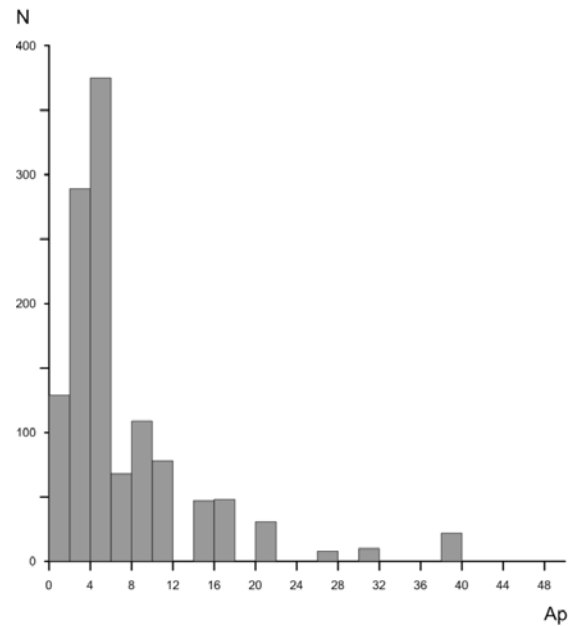


Рис. 5. Гистограмма распределения числа часовых интервалов с излучением SE в зависимости от величины A_p -индекса

Особенности спектра колебаний поверхности Солнца содержат информацию о процессах в дифференциально вращающейся конвективной зоне Солнца выше тахоклина и другие особенности, которые, быть может, не отражены в пульсациях частоты SE, но тем не менее, существует тесная связь между процессами на Солнце, такими как протонные вспышки, и изменением динамического спектра эмиссии [Довбня и др., 1994]. Кроме того, как показали экспериментальные наблюдения волн Альфвена в межпланетной среде в окрестности Земли, в их спектре присутствуют 5-минутные колебания, которые очевидно связаны с 5-минутными колебаниями Солнца [Potapov et al., 2013]. Вопрос о трансформации 5-минутных осцилляций солнечной поверхности в энергию альфвеновских волн и их возможном вкладе в спектр частотной модуляции серпентинной эмиссии подробно обсуждался в работе [Guglielmi et al., 2015].

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показал следующее.

1. Пятиминутная модуляция частоты доминирует в спектре вариаций частоты серпентинной эмиссии.
2. Колебания с таким периодом модуляции частоты регистрируются при умеренно-спокойных условиях в геомагнитном поле ($K_p=0-2$) примерно в 70 % от общего времени наблюдения эмиссии.
3. Спектр мощности частотной модуляции серпентинной эмиссии с пиком вблизи 5 мин подобен спектру мощности 5-минутных колебаний Солнца.

Таким образом, очевидно, что колебания типа SE отражают динамику крупномасштабных структур на солнечной поверхности и могут оказаться действенным инструментом для исследования проблем гелиосейсмологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 16-05-00631 и № 16-05-00056.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979. 139 с.
- Гульельми А.В., Довбня Б.В. Гидромагнитное излучение межпланетной плазмы // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18, вып. 10. С. 601–604.
- Гульельми А.В., Довбня Б.В. Наблюдение геомагнитных пульсаций в диапазоне 0–2 Гц с глубокой модуляцией несущей частоты в полярной шапке // Геомагнетизм и аэронаука. 1974. Т. 14, № 5. С. 868–870.
- Довбня Б.В., Зотов О.Д., Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Динамика излучения типа SE перед мощными протонными вспышками на Солнце // Геомагнетизм и аэронаука. 1994. Т. 34, № 3. С. 188–191.
- Asheim S. Serpentine emissions in the polar magnetic field. Oslo, 1983. 8 p. (Rep. ser. No. 83–38, Inst. of Physics).
- Christensen-Dalsgaard J. Helioseismology // Rev. Mod. Phys. 2002. V. 74. P. 1073–1129. DOI: 10.1103/RevModPhys.74.1073.
- Elsworth Y., Howe R., Isaak G.R., McLeod C.P., Miller B.A., van der Raay H.B., Wheeler S.J., New R. Performance of the BISON network 1981-present // Helio- and Astero-Seismology from Earth and Space (GONG'94): Proc. San Francisco, 1995. P. 392–397. (ASP Conference Ser. No. 76 / Eds. R.K. Ulrich, E.J. Rhodes, Jr., and W. Dappen).
- Fraser-Smith A.C. ULF/lower-ELF electromagnetic field measurements in the polar caps // Rev. Geophys. Space Phys. 1982. V. 20. P. 497–512. DOI: 10.1029/RG020i003p00497.
- Guglielmi A.V., Dovbnaya B.V. Hydromagnetic emission of the interplanetary plasma // Astrophys. Space Sci. 1974. V. 31. P. 11–29.
- Guglielmi A.V., Pokhotelov O.A. Geoelectromagnetic Waves. Bristol; Philadelphia: IOP Publ. Ltd., 1996. 402 p.
- Guglielmi A., Potapov A., Dovbnaya B. Five-minute solar oscillations and ion-cyclotron waves in the solar wind // Solar Phys. 2015. V. 290, N. 10. P. 3023–3032. DOI: 10.1007/s11207-015-0772-2.
- Morris R.J., Cole K.D. “Serpentine emission” at the high latitude station Davis (17–23 September 1981) // Exploration Geophys. 1986. V. 17. P. 15. DOI: 10.1071/EG986015.
- Morris R.J., Cole K.D. “Serpentine emission” at the high latitude Antarctic station Davis // Planet. Space Sci. 1987. V. 35. P. 313–328. DOI: 10.1016/0032-0633(87)90158-9.
- Potapov A.S., Polyushkina T.N., Pulyaev V.A. Observations of ULF waves in the solar corona and in the solar wind at the Earth's orbit // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2013. V. 102. P. 235–242. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.06.001.
- Troitskaya V.A. Geomagnetic pulsations in the polar cap // International Workshop on Selected Topics of Magnetospheric Physics. Magnetospheric Study: Proc. Tokyo: Japanese IMS Comm., 1979. P. 121–123.

REFERENCES

- Asheim S. Serpentine emissions in the polar magnetic field. Oslo, 1983, 8 p. (Rep. Ser. No. 83–38, Inst. of Physics).
- Christensen-Dalsgaard J. Helioseismology. Rev. Mod. Phys. 2002, vol. 74, pp. 1073–1129. DOI: 10.1103/RevModPhys.74.1073.
- Dovbnaya B.V., Zotov O.D., Klain B.I., Kurazhovskaya N.A. Dynamics of the SE-type emission before intense proton flares on the Sun. Geomagnetism and Aeronomy. 1994, vol. 34, no. 3, pp. 419–421.
- Elsworth Y., Howe R., Isaak G.R., McLeod C.P., Miller B.A., van der Raay H.B., Wheeler S.J., New R. Performance of the BISON network 1981-present. Helio- and Astero-Seismology from Earth and Space (GONG'94): Proc. San Francisco, 1995. pp. 392–397. (ASP Conference Ser. No. 76 / Eds. R.K. Ulrich, E.J. Rhodes, Jr., and W. Dappen).
- Fraser-Smith A.C. ULF/lower-ELF electromagnetic field measurements in the polar caps. Rev. Geophys. Space Phys. 1982, vol. 20, pp. 497–512. DOI: 10.1029/RG020i003p00497.
- Guglielmi A.V. MGD-volny v okolozemnoi plazme [MHD Waves in the Near-Earth Plasma]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 139 p. (In Russian).
- Guglielmi A.V., Dovbnaya B.V. Hydromagnetic emission of the interplanetary plasma. Pis'ma v ZhETF [JETP Letters]. 1973, vol. 18, iss. 10, pp. 601–604. (In Russian).
- Guglielmi A.V., Dovbnaya B.V. Hydromagnetic emission of the interplanetary plasma. Astrophys. Space Sci. 1974, vol. 31, pp. 11–29.
- Guglielmi A.V., Dovbnaya B.V. Observations of geomagnetic pulsations in the range of 0–2 Hz with deep modulation of the carrying frequency. Geomagnetizm i aeronomiya [Geomagnetism and Aeronomy]. 1974, vol. 14, no. 5, pp. 868–870. (In Russian).
- Guglielmi A.V., Pokhotelov O.A. Geoelectromagnetic Waves. Bristol, Philadelphia, IOP Publ. Ltd., 1996. 402 p.
- Guglielmi A., Potapov A., Dovbnaya B. Five-minute solar oscillations and ion-cyclotron waves in the solar wind. Solar Phys. 2015, vol. 290, no. 10, pp. 3023–3032. DOI: 10.1007/s11207-015-0772-2.
- Morris R.J., Cole K.D. “Serpentine emission” at the high latitude station Davis (17–23 September 1981). Exploration Geophys. 1986, vol. 17, p. 15. DOI: 10.1071/EG986015.
- Morris R.J., Cole K.D. “Serpentine emission” at the high latitude Antarctic station Davis. Planet. Space Sci. 1987, vol. 35, pp. 313–328. DOI: 10.1016/0032-0633(87)90158-9.
- Potapov A.S., Polyushkina T.N., Pulyaev V.A. Observations of ULF waves in the solar corona and in the solar wind at the Earth's orbit. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2013, vol. 102, pp. 235–242. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.06.001.
- Troitskaya V.A. Geomagnetic pulsations in the polar cap. International Workshop on Selected Topics of Magnetospheric Physics. Magnetospheric Study: Proc. Tokyo, Japanese IMS Comm., 1979, pp. 121–123.