

УДК 523.98 551.521:523.9 551.590.21

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ КАК ПРЕДВЕСТНИКИ КРУПНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

А.С. Смирнова, С.Д. Снегирев, О.А. Шейнер

LONG-TERM PULSATIONS OF THE GEOMAGNETIC FIELD AS PRECURSORS OF LARGE SOLAR FLARES

A.S. Smirnova, S.D. Snegirev, O.A. Sheiner

Метод вейвлет-анализа использован для исследования долгопериодных пульсаций H -компоненты магнитного поля Земли за четыре дня до солнечных протонных вспышек разной интенсивности. Рассмотрены особенности поведения спектральных компонент для станций различной широты. Выдвинуты предположения о причине усиления долгопериодных пульсаций геомагнитного поля накануне вспышечных событий.

The wavelet-analysis method was used to study long-term pulsations of the H -component of the Earth's magnetic field 4 days before solar proton flares having different intensity. We examined peculiarities of spectral components for data from stations situated at various latitudes. We also made assumptions about the reason of intensification of long-term pulsations of the geomagnetic field before flares.

Тестовое исследование

Перед началом основного исследования было проведено тестовое исследование с целью получения опорных образцов вейвлет-спектров для геомагнитных станций различных широт в период отсутствия геоэффективных явлений солнечной активности. Данные с разрешением 1 мин взяты на сайтах <http://swdcd.db.kugi.kyoto-u.ac.jp/cgi-bin/caplot.cgi> и <http://www.izmiran.rssi.ru>. Пульсации с периодами 30–60 мин наблюдаются в послеполуденные и вечерние часы. Их мощность составляет для высокоширотных ($\varphi > \pm 65^\circ$) станций 1000–2500 нТл², для среднеширотных ($\pm 40^\circ < \varphi < \pm 65^\circ$) – 10–20 нТл², для низкоширотных ($\varphi < \pm 40^\circ$) – 5–10 нТл².

Основное исследование

Были выбраны три вспышечных события, имеющих различную интенсивность в рентгеновском диапазоне и отличающихся величиной потока протонов (с энергиями > 10 МэВ). Первое событие (максимум в рентгеновском диапазоне отмечен 22.03.1991 г. в 22:47 UT) сопровождалось необычайно интенсивным потоком протонов – 43000 pfu. В оптическом диапазоне наблюдалась вспышка класса 3B, в рентгеновском – X9. Второе событие (максимум в рентгеновском диапазоне отмечен 4.11.2001 г. в 16:20 UT) сопровождалось потоком протонов низкого уровня – 31.7 pfu. В оптическом диапазоне наблюдалась вспышка класса 3B, в рентгеновском – X1. Третье событие также сопровождалось потоком протонов низкого уровня – 34 pfu. В оптическом диапазоне наблюдалась вспышка класса 1N, в рентгеновском – M2, максимум вспышечного события в рентгеновском диапазоне отмечен 17.11.2001 г. в 05:25 UT. Выбранные случаи можно считать уединенными, так как в рассматриваемый нами период не было зафиксировано других протонных вспышек, и можно с уверенностью говорить о воздействии на Землю именно этих вспышечных событий.

22.03.1991 г. Протестированы 52 геомагнитные станции на различных широтах. Рассматривался интервал времени 19–22.03.1991 г. Возрастание мощности долгопериодных колебаний наблюдается

на всех протестированных станциях 19 и 20 марта, за 3–2 дня до вспышки. Интенсивность предвспышечных колебаний с периодами 30–60 мин на высокоширотных станциях колеблется от 1400 до 13 000 нТл², на среднеширотных – от 70 до 8000 нТл², на низкоширотных – от 15 до 270 нТл². Максимальная продолжительность зарегистрированных колебаний составляет 12 ч.

4.11.2001 г. Протестированы 102 геомагнитные на станции различных широтах. Рассматривался интервал времени 01–4.11.2001 г. Возрастание мощности долгопериодных колебаний наблюдается на 77 % протестированных станций 1 и 2 ноября, за 3.5–2.5 дня до вспышки. Интенсивность предвспышечных колебаний с периодами 30–60 мин на высокоширотных станциях колеблется от 1300 до 6000 нТл², на среднеширотных от – 16 до 2500 нТл², на низкоширотных – от 10 до 350 нТл². Максимальная продолжительность зарегистрированных колебаний составляет 16 ч.

17.11.2001 г. Протестированы 104 геомагнитные станции. Рассматривался интервал времени 14–17.11.2001 г. Возрастание мощности долгопериодных колебаний наблюдается на 90 % протестированных станций 15 и 16 ноября, за 1.5–0.5 дня до вспышки. Интенсивность предвспышечных колебаний с периодами 30–60 мин на высокоширотных станциях колеблется от 1300 до 7000 нТл², на среднеширотных – от 20 до 2600 нТл², на низкоширотных – от 10 до 900 нТл². Максимальная продолжительность зарегистрированных колебаний составляет 10 ч.

Возможные причины возникновения долгопериодных пульсаций-предвестников в горизонтальной компоненте магнитного поля Земли

В работе [1] выдвигалась гипотеза, что причиной усиления долгопериодных пульсаций-предвестников является связь между колебательными процессами в солнечной атмосфере накануне вспышечных событий и в атмосфере Земли. Предвспышечные колебания физических характеристик солнечной атмосферы вызывают колебания подобных периодов как в радиодиапазоне, так и в других диапазонах электромагнит-

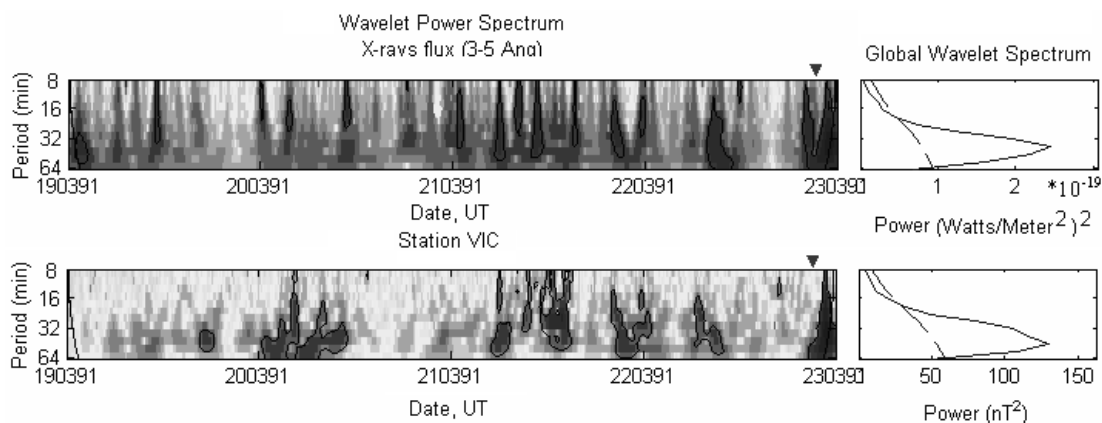


Рис. 1. Пример вейвлет-анализа потока рентгеновского излучения (верхняя панель) и H -компоненты геомагнитного поля на станции Victoria (48.52 N 123.42 W) (нижняя панель) для события 22.03.1991 г. Момент вспышки отмечен флажком.

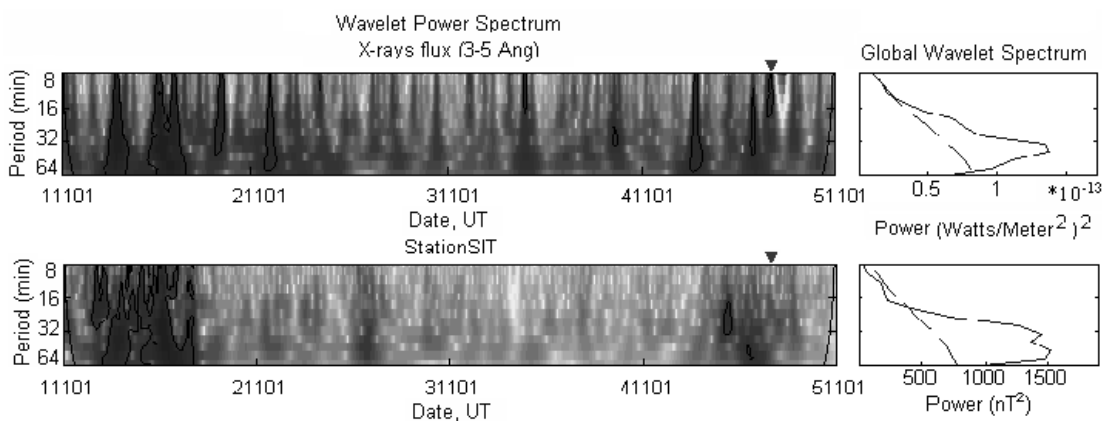


Рис. 2. Пример вейвлет-анализа потока рентгеновского излучения (верхняя панель) и H -компоненты геомагнитного поля на станции Sitka (57.06 N 135.33 W) (нижняя панель) для события 04.11.2001 г. Момент вспышки отмечен флажком.

магнитных волн [2]. Пульсации рентгеновского излучения, в свою очередь, посредством резонансного эффекта могут приводить к усилению колебаний ионосферных токовых систем и, как следствие, геомагнитного поля.

С целью выяснения возможных причин усиления долгопериодных колебаний в горизонтальной компоненте геомагнитного поля было проведено исследование спектрального состава потока рентгеновского излучения (данные с разрешением 1 мин со спутника GOES доступны на сайте <http://goes.ngdc.noaa.gov/data/avg>). Невозмущенный уровень мощности потока рентгеновского излучения (в интервале 3–5 Å) составляет 10^{-19} (Вт/м²)². Колебания наблюдаются как в дневные, так и в вечерние часы.

Накануне события 22.03.1991 г. в горизонтальной компоненте геомагнитного поля также присутствуют долгопериодные колебания, причем их мощность значительно превышает значения, зафиксированные для спокойных интервалов, и составляет $2 \cdot 10^{-12}$ (Вт/м²)² (см. рис. 1). Корреляция спектральных мощностей, усредненных по периодам 30–60 мин, рентгеновского излучения и H -компоненты магнитного поля Земли наблюдается на 38 % среднширотных и на 100 % низкоширотных станций, коэффициент корреляции достигает 0.92. Для события 04.11.2001 г. мощность спектральных компонент с периодами 30–60 мин составляет $1.5 \cdot 10^{-13}$ (Вт/м²)²

(см. рис. 2). Коэффициент корреляции спектральных мощностей, усредненных по периодам 30–60 мин, рентгеновского излучения и H -компоненты магнитного поля Земли достигает 0.93, корреляция наблюдается на 33 % высокоширотных, 64 % среднширотных и на 88 % низкоширотных станций. Для события 17.11.2001 г., в отличие от рассмотренных ранее случаев, подобная корреляция не была обнаружена. Возможно, это объясняется тем, что данное событие значительно менее мощное, чем ранее рассмотренные, и наблюдаемая мощность спектральных компонент рентгеновского излучения с периодами 30–60 мин ($1.5 \cdot 10^{-14}$ (Вт/м²)²) недостаточна для раскачки ионосферы и возбуждения колебаний с соответствующими периодами.

В качестве другого возможного источника, вызывающего усиление колебаний больших периодов в геомагнитном поле, может выступать плазма солнечного ветра (СВ) (данные о протонной плотности потока СВ со спутника ACE с разрешением 1 мин взяты на сайте http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/-sp_phys). Коэффициенты корреляции спектральных мощностей, усредненных по периодам 30–60 мин, протонной плотности СВ и горизонтальной компоненты геомагнитного поля для события 17.11.2001 г. вычислялись при учете соответствующего времени задержки. Эта задержка складывалась из времени, необходимого для движения СВ от спутника, распо-

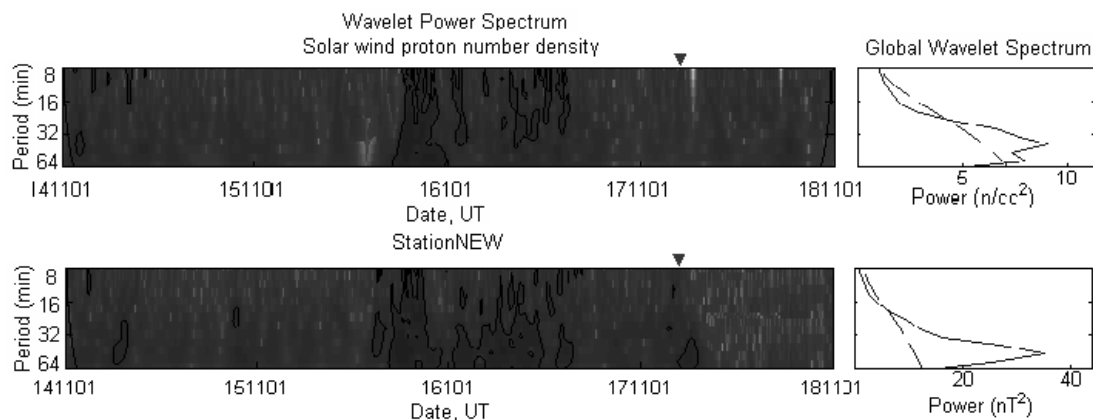


Рис. 3. Пример вейвлет-анализа протонной плотности солнечного ветра (верхняя панель) и H -компоненты геомагнитного поля на станции Newport (48.27 N 117.12 W) (нижняя панель) для события 17.11.2001 г. Момент вспышки отмечен флажком.

ложенного на орбите, до магнитосферы Земли, проникновения частиц в ионосферу и времени реакции ионосферы. Рассматривались различные времена задержки от 0 до 300 мин с целью выявления оптимального. Полученные оптимальные времена задержки для различных станций колеблются от 0 до 76 мин. Корреляция с протонной плотностью СВ наблюдается на 38 % высокоширотных, 95 % среднеширотных и на 77 % низкоширотных станций, коэффициент корреляции достигает 0.89 (см. рис. 3). Корреляция в высоких широтах наблюдается реже. Можно предположить, что на корреляцию влияет наложение множества побочных эффектов и возмущений, характерных для высокоширотной ионосферы. Корреляция спектральных мощностей протонной плотности СВ и горизонтальной компоненты геомагнитного поля, усредненных по периодам 30–60 мин, проверялась и для события 04.11.2001 г. Коэффициенты корреляции для различных станций не превышают 0.15. К сожалению, провести аналогичный анализ для события 22.03.1991 г. не представляется возможным ввиду отсутствия данных необходимой дискретности.

Источниками колебаний плотности СВ могут являться:

- 1) волны магнитогидродинамического (МГД) типа, связанные с неустойчивостью протонов, отраженных от сильной ударной волны перед вспышечными потоками;
- 2) МГД-волны, сгенерированные вблизи рекуррентных потоков вследствие неустойчивостей, связанных с градиентами параметров плазмы СВ;
- 3) крупномасштабные волны на секторной границе;
- 4) осцилляции плазмы солнечного происхождения [3].

Первое предположение не является подходящим в нашем случае, так как мы рассматриваем ситуацию перед вспышкой, а не после нее. Для выяснения природы обнаруженных колебаний протонной плотности СВ и возможного механизма их передачи геомагнитному полю предполагается проведение

дальнейших исследований на достаточном статистическом материале.

Таким образом, усиление долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля наблюдается для всех трех исследованных событий различной интенсивности. Это усиление, в зависимости от интенсивности последующего вспышечного события, возникает за разный интервал времени до него (за 3–2 дня, 3.5–2.5 дня и за 1.5–0.5 дня). Механизмы возбуждения предвспышечных колебаний для трех исследованных протонных вспышек разной мощности различны. Для мощных рентгеновских вспышек (класса X9 и X1) на спектр усиливающихся геомагнитных колебаний, по нашим предположениям, влияет спектральный состав ионизирующего предвспышечного излучения Солнца. Для менее интенсивной вспышки (M2) предвспышечные колебания, вероятно, передаются через плазму СВ. Практическая ценность работы заключается в возможности использования ее результатов для развития методик краткосрочного прогнозирования и диагностики геоэффективных солнечных явлений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снегирев С.Д., Фридман В.М., Шейнер О.А. О флуктуациях магнитного поля Земли, предшествующих крупным солнечным вспышкам // Солнечно-земная физика. 2005. Вып. 8. С. 27–29.
2. Kobrin M.M., Pakhomov V.V., Snegirev C.D., et al. An investigation of the relationship between long-period pulsations of cm radio emission and solar proton flares forecasts // Proc. STPW'96 Hiraiso, Japan, 23–27 January 1996. Tokyo: RCW, 1997. P. 200.
3. Хабарова О.В., Руденчик Е.А. О возможности прогноза магнитных бурь по результатам мониторинга осцилляционного режима солнечного ветра: Препринт № 11154 / ИЗМИРАН. 10 с.

Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород