

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 523.98 551.521:523.9 551.590.21

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ПРОГНОЗЕ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2011 г.

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

Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород

Alfiyaren@rambler.ru, rfj@nirfi.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 17.05.2011

Проанализированы данные более 100 геомагнитных станций для 6 вспышечных событий различной интенсивности с целью исследования характеристик долгопериодных (с периодами 30–60 минут) пульсаций H -компоненты магнитного поля Земли накануне мощных протонных вспышек на Солнце. Выдвинуто предположение о механизме генерации таких пульсаций. На примере события 22 марта 1991 года исследована возможность использования эффекта возрастания долгопериодных пульсаций геомагнитного поля в прогностических целях, предложен алгоритм прогноза протонных вспышек на Солнце по геомагнитным измерениям.

Ключевые слова: долгопериодные пульсации, геомагнитное поле, рентгеновское излучение, прогнозирование, солнечная активность.

Введение

В настоящее время не существует методов, обеспечивающих с высокой вероятностью своевременный и точный прогноз геоэффективных явлений солнечной активности. Это объясняется тем, что создание методов прогноза осложнено индивидуальными особенностями процессов и явлений практически во всех областях системы Солнце–Земля. Поэтому важен поиск и привлечение новых факторов, которые позволят улучшить качество таких прогнозов. Анализ вариаций геомагнитной активности и исследование корреляции между солнечной и геомагнитной активностью способствуют лучшему пониманию физической природы солнечно-земных связей и позволяют приблизиться к разработке методов прогноза геоэффективных явлений солнечной активности. Такие явления проявляются в нарушении радиосвязи, магнитной навигации, работы космических аппаратов и в негативном влиянии на здоровье людей. Солнечные вспышки, сопровождающиеся потоками протонов на орбите Земли, так называемые протонные вспышки, относятся как раз к таким геоэффективным явлениям.

Долгопериодные колебания геомагнитного поля в периоды времени, примыкающие к крупным протонным вспышкам на Солнце

В исследованиях [1–3] сообщалось об эффекте усиления долгопериодных (с периодами 30–60 минут) колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля накануне протонных солнечных вспышек. В данной работе приведены результаты исследований шести единичных солнечных протонных событий различной интенсивности. Обнаружено, что для всех рассмотренных событий за 2–3 дня до начала непосредственного развития вспышки наблюдается рост пульсаций H -компоненты магнитного поля Земли с периодами 30–60 мин по сравнению с магнитоспокойными значениями. Это явление носит глобальный характер. Будем называть этот эффект – увеличение мощности долгопериодных колебаний – геомагнитными предвестниками протонных солнечных вспышек. В таблице представлены характеристики таких пульсаций-предвестников для станций различных широт и долгот. Из третьей строки таблицы видно, что существует зависимость мощности долгопериодных колебаний горизон-

Таблица

Характеристики долгопериодных пульсаций геомагнитного поля накануне вспышечных событий

Дата вспышечного события	22.03.1991 г.	4.11.2001 г.	17.11.2001 г.	15.01.2005 г.	5.12.2006 г.	13.12.2006 г.
Возрастание мощности долгопериодных колебаний	100% станций	95% станций	100% станций	100% станций	40% станций	100% станций
Средняя мощность предвспышечных колебаний с периодами 30–60 минут	Высокоширотные станции					
	5700 нТ ²	2000 нТ ²	2500 нТ ²	15500 нТ ²	500 нТ ²	16500 нТ ²
	Среднеширотные станции					
	900 нТ ²	300 нТ ²	100 нТ ²	500 нТ ²	20 нТ ²	450 нТ ²
Отношение мощностей долгопериодных колебаний в предвспышечные и магнитоспокойные дни	Низкоширотные станции					
	80 нТ ²	20 нТ ²	20 нТ ²	80 нТ ²	10 нТ ²	50 нТ ²
	Высокоширотные станции					
	25	15	10	50	3	55
	Среднеширотные станции					
	50	15	10	45	6	40
	Низкоширотные станции					
	25	5	5	30	4	20

тальной компоненты геомагнитного поля от величины потока протонов, которым сопровождалось солнечное событие: для событий с большим потоком протонов наблюдаемая мощность предвспышечных колебаний выше.

Для событий 22.03.1991 г., 15.01.2005 г. и 13.12.2006 г. наблюдалось значительное (в среднем в 35–40 раз) увеличение мощности долгопериодных колебаний на всех рассматриваемых станциях независимо от широты. Эти события сопровождались высоким потоком протонов с энергиями >10 MeV (43000, 5040 и 698 pfu соответственно) по данным сайта о солнечной активности <http://sec.noaa.gov/ftppdir/indices/SPE.txt>.

Для событий 4.11.2001 г. и 17.11.2001 г. зафиксировано небольшое (в среднем в 10 раз) увеличение мощности предвспышечных колебаний с периодами 30–60 минут на 95–100% станций. Эти события характеризуются невысоким потоком протонов (31.7 и 34 pfu).

Для события 5.12.2006 г., несмотря на высокий поток протонов (1980 pfu), небольшое (в среднем в 5 раз) увеличение мощности долгопериодных колебаний наблюдается только на 40% из рассмотренных станций. Это объясняется тем, что активная область, в которой произошла вспышка, была расположена на восточном крае диска Солнца.

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

Колебания физических параметров солнечной атмосферы, таких, как плотность, темпера-

тура, магнитное поле, должны модулировать радиоизлучение и излучение электромагнитных волн в диапазоне ультрафиолета и рентгена. Известно, что электромагнитное излучение прямо пропорционально зависит от изменения плотности и еще более сильно – от изменения температуры излучающей плазмы [4]. Изменение излучения в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах влечет за собой изменение электронной концентрации в земной ионосфере. Следовательно, можно ожидать причинно-следственных связей между колебательными процессами в солнечной атмосфере и атмосфере Земли. В свою очередь, изменения электронной концентрации в атмосфере Земли на высотах от 90 до 130 км приводят к флуктуациям ионосферных токов и, соответственно, геомагнитного поля. В особых условиях неустойчивостей солнечной атмосферы, характерных для предвспышечных ситуаций, величина флуктуаций возрастает, а их характерные периоды являются отражением динамики процессов, определяющих неустойчивости. Механизм усиления долгопериодных колебаний на станциях высоких широт может вызываться тем же механизмом, если токовая система охватывает различные широты.

С целью выяснения возможных причин усиления долгопериодных колебаний в горизонтальной компоненте геомагнитного поля было проведено исследование спектрального состава потока рентгеновского излучения.

Накануне события 22.03.1991 г. в спектре потока рентгеновского излучения присутствуют долгопериодные компоненты, причем их мощность значительно превышает значения, зафиксированные для спокойных интервалов, и

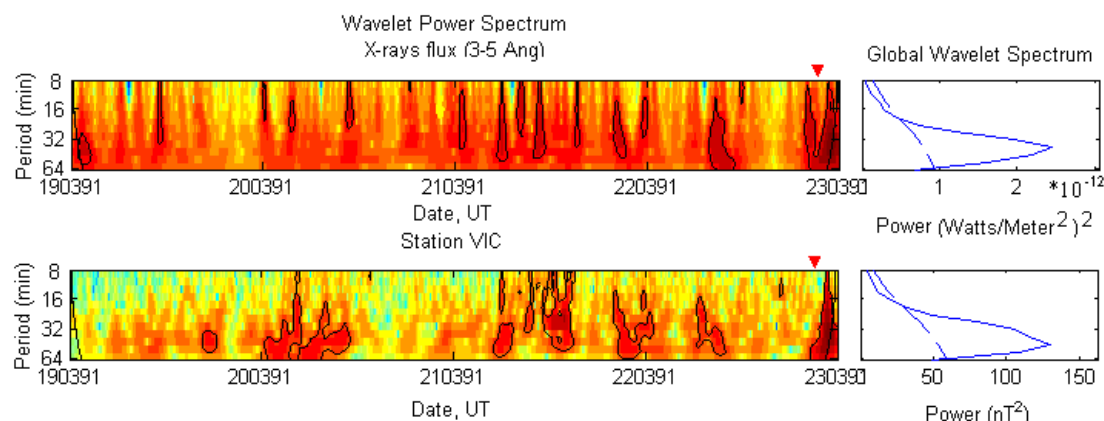


Рис. 1. Пример вейвлет-анализа потока рентгеновского излучения (верхняя панель) и H -компоненты геомагнитного поля на станции Victoria (48,52 N 123,42 W) (нижняя панель) для события 22.03.1991 г (момент вспышки отмечен красным флажком)

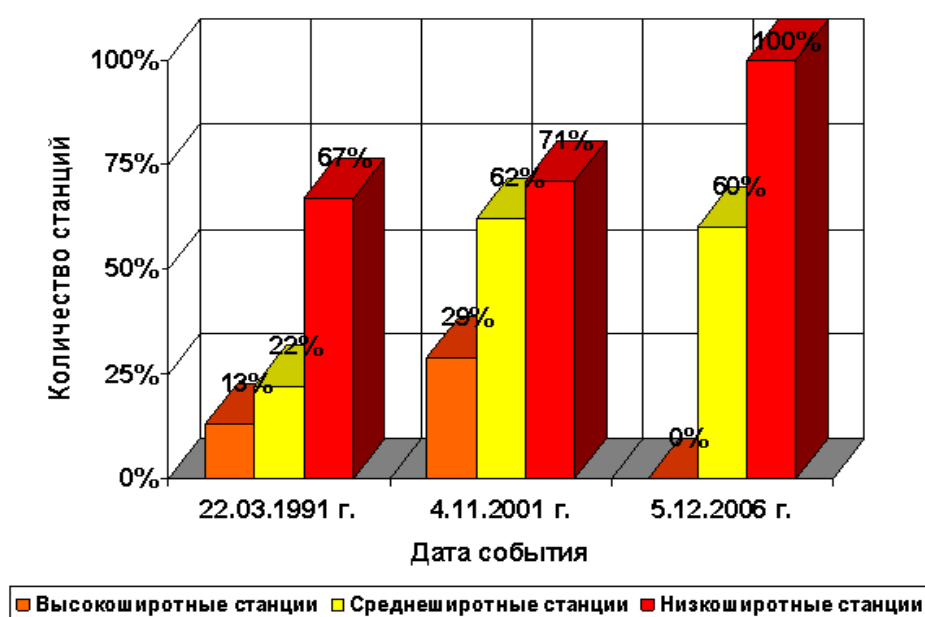


Рис. 2. Корреляция спектральных мощностей, усредненных по периодам 30–60 минут, потока рентгеновского излучения и H -компоненты магнитного поля Земли

составляет 2.5×10^{-12} (Вт/м²)². Корреляция спектральных мощностей, усредненных по периодам 30–60 мин, рентгеновского излучения и H -компоненты магнитного поля Земли наблюдается на 13% высокоширотных, 22% среднеширотных и на 67% низкоширотных станций. Корреляция рассматривалась с учетом положения спутника GOES. Коэффициент корреляции достигает 0.92 для низкоширотных станций, 0.84 – для среднеширотных и 0.51 – для высокоширотных станций.

Для события 4.11.2001 г. мощность спектральных компонент с периодами 30–60 минут составляет 1.5×10^{-13} (Вт/м²)². Коэффициент корреляции спектральных мощностей, усредненных по периодам 30–60 мин, рентгеновского излучения и H -компоненты магнитного поля

Земли достигает 0.68 для низкоширотных станций, 0.93 – для среднеширотных и 0.76 – для высокоширотных. Корреляция (с учетом положения спутника) наблюдается на 29% высокоширотных, 62% среднеширотных и на 71% низкоширотных станций.

Для события 5.12.2006 г. увеличение мощности не столь велико (3×10^{-14} (Вт/м²)²) и не является достаточным для возбуждения ионосферы и возникновения колебаний с соответствующими периодами. Это объясняет тот факт, что увеличение мощности долгопериодных колебаний наблюдается для этого события лишь на 40% станций. Максимальное значение коэффициента корреляции составляет для этого события 0.99 как для среднеширотных, так и для низкоширотных станций, корреляция наблюдается на

60% среднеширотных и на 100% низкоширотных станций (рассматривались только те станции, на которых наблюдается увеличение мощности долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля).

Для всех трех событий корреляция в высоких широтах наблюдается реже. Можно предположить, что это связано с большим количеством возмущений местного характера в ионосфере высоких широт.

Для событий 17.11.2001 г. и 15.01.2005 г. в отличие от рассмотренных ранее случаев корреляция спектральных мощностей, усредненных по периодам 30–60 минут, рентгеновского излучения и H -компоненты магнитного поля Земли не была обнаружена. Для события 13.12.2006 г. максимальный зафиксированный коэффициент корреляции составил всего лишь 0.52. Возможно, что в этих случаях реализуется другой механизм превспышечного возрастания мощности долгопериодных пульсаций, связанный с колебаниями протонной плотности солнечного ветра [1].

Вариации характеристик геомагнитных пульсаций на земной поверхности как диагностический инструмент слежения за состоянием ионосферных токовых систем

Изменения горизонтальной компоненты геомагнитного поля можно рассматривать как следствие магнитосферных токов, обусловленных высыпанием частиц в области дневного выступа плазмосферы [5]. Тогда существует возможность использования вариаций характеристик геомагнитных пульсаций на земной поверхности как диагностического инструмента слежения за состоянием ионосферных токовых систем. Так, к примеру, корреляция спектральных плотностей, усредненных по периодам 30–60 мин, для станций St. Johns (STJ) и Belsk (BEL), расположенных на различных материках, составляет 93%, тогда как для станций STJ и Fredericksburg (FRD), находящихся на небольшом расстоянии – всего 26% (событие 22.03.1991 г.). Это объясняется тем, что станции FRD и BEL попадают под влияние одной и той же токовой системы, которая может простираться на несколько тысяч километров, а станции FRD и BOU – под влияние различных токовых систем.

На основе корреляций спектральных плотностей, усредненных по периодам 30–60 мин, для различных станций построены предположительные границы токовых систем, влияющих на распределение долгопериодных колебаний го-

ризонтальной компоненты геомагнитного поля накануне 6 вспышечных событий различной интенсивности. Для трех из шести вспышечных событий возможно выделение предположительного географического местоположения двух токовых систем, влияющих на распределение долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля накануне вспышечных событий. Их границы нестабильны и зависят от параметров рассматриваемого вспышечного события. Так, для вспышки 13.12.2006 г. таких токовых систем определяется три. Для событий 4.11.2001 г. и 17.11.2001 г. – только одна (см. рис. 3).

Рассмотрим подробно случай 13.12.2006 г., где обнаружено влияние на распределение долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля трех токовых систем. Станция Valentia (VAL) является пограничной. При движении восточнее или западнее от данной станции корреляция уменьшается с расстоянием. Анализ осуществлялся за период времени с 9.12.2006 г. по 12.12.2006 г. Однако известно, что токовые системы динамичны и могут меняться во времени [6]. В связи с этим был проведен аналогичный корреляционный анализ отдельно для каждого дня перед вспышкой и выявлена предположительная динамика границ токовых систем, влияющих на распределение долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля за четыре дня до события 13.12.2006 г. Токовая система, охватывающая семь из восьми рассмотренных станций, 9.12.2006 г. разделяется. Правая (обозначена синим на рис. 4) в течение последующих трех дней не изменяется. Левая (обозначена красным на рис. 4) разделяется на две, одна из которых к 12.12.2006 г. исчезает.

Таким образом, показана возможность применения вариаций характеристик геомагнитных пульсаций на земной поверхности для диагностики состояния ионосферных токовых систем.

О возможности краткосрочного прогноза солнечной вспышечной деятельности на основе мониторинга магнитного поля Земли

С целью изучения возможности использования наблюдений геомагнитного поля для краткосрочного прогнозирования вспышечной активности на Солнце была исследована динамика мощности долгопериодных колебаний H -компоненты поля за март 1991 года для трех станций различных широт. Для всех рассмотренных станций 21 марта видно существенное

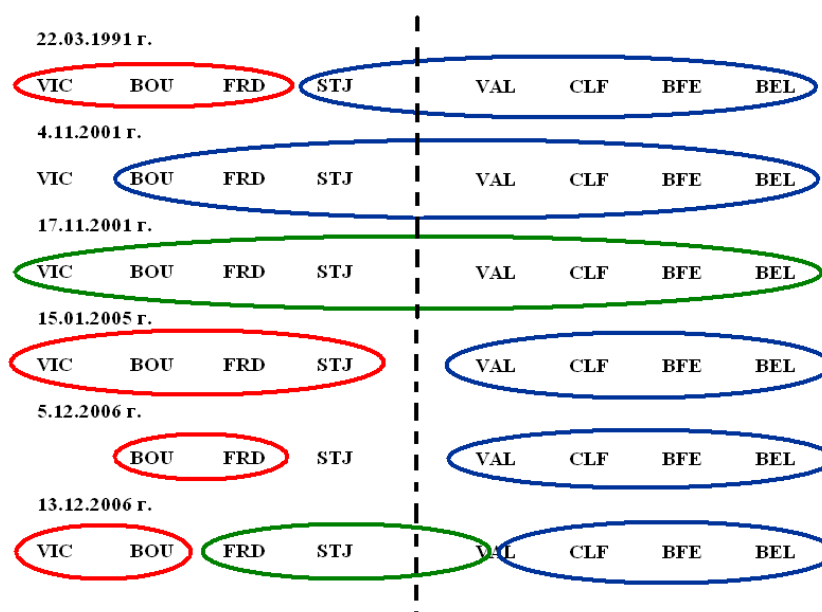


Рис. 3. Предположительные границы токовых систем, влияющих на распределение долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля накануне 6 вспышечных событий различной интенсивности. Пунктирная линия обозначает границу двух материков и проходит через океан

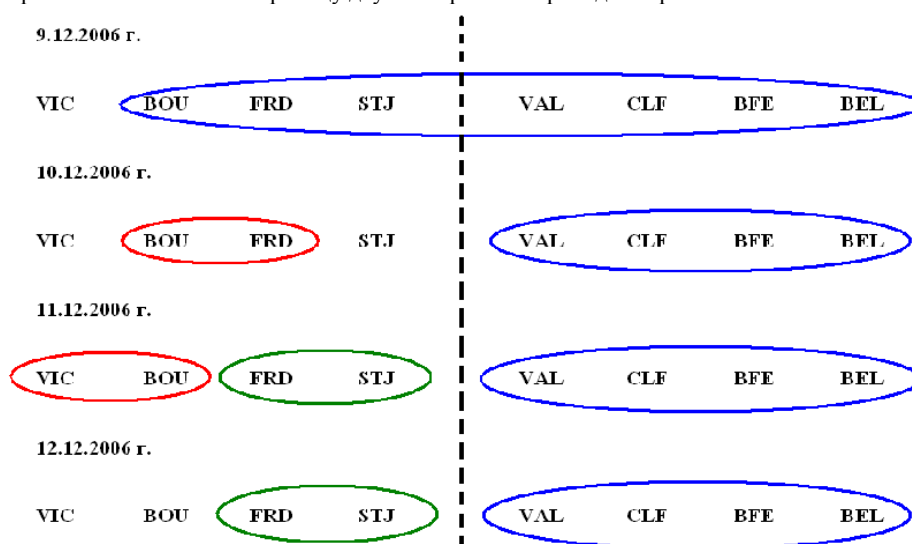


Рис. 4. Предположительные границы токовых систем, влияющих на распределение долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля за четыре дня до события 13.12.2006 г.

увеличение мощности, которое фиксируется накануне вспышки (22 марта) и может служить ее геомагнитным предвестником (см. рис. 5). Причем для среднеширотной и низкоширотной станции значение мощности накануне вспышки заметно (в 2–3 раза) превышает средний уровень мощности за предыдущие двадцать дней. Для высокоширотной станции вследствие более возмущенной даже в магнитоспокойные дни ионосферы предвспышечный рост мощности долгопериодных колебаний H -компоненты магнитного поля Земли на фоне общей активности не так заметен (~ на 50%). В связи с этим можно предположить, что в прогностических целях

достовернее использовать станции средних и низких широт, где эффект возрастания долгопериодных пульсаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля, вызванный ионизирующим солнечным излучением, выражен заметнее. В подтверждение вышевысказанных соображений о влиянии рентгеновского излучения в спектре потока рентгеновского излучения для этого вспышечного периода также обнаружено аналогичное постепенное усиление мощности колебаний больших периодов (см. рис. 6).

Таким образом, полученный результат указывает на возможность создания алгоритма

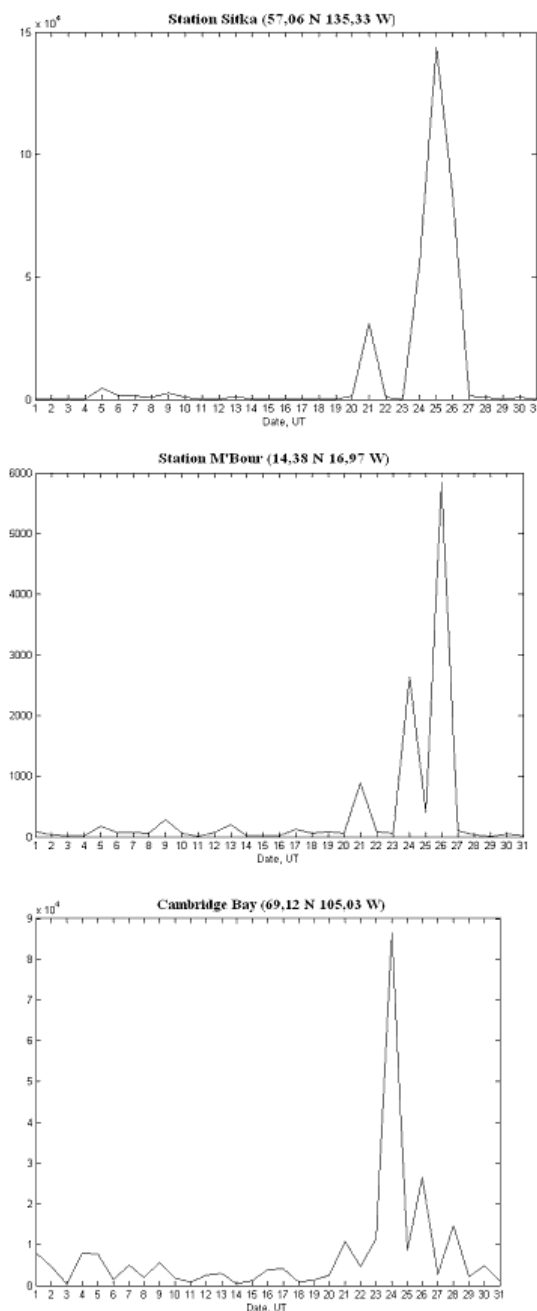


Рис. 5. Динамика мощности долгопериодных колебаний для среднеширотной (первая панель), низкоширотной (вторая панель) и высокоширотной (третья панель) станций (март 1991 года)

краткосрочного прогноза солнечной вспышечной деятельности по наземным наблюдениям.

Алгоритм прогноза геоэффективных солнечных вспышек

Имеющаяся база цифровых данных с высоким (1 мин) разрешением дает основания для прикладного прогностического применения описанных эффектов. Магнитные данные доступны в режиме реального времени на сайте

крупнейшей международной сети геомагнитных обсерваторий INTERMAGNET [7]. Прогноз должен осуществляться по данным не менее 3 среднеширотных геомагнитных обсерваторий, разнесенных по широте не менее чем на тысячу километров. Выбор именно среднеширотных станций объясняется тем, что на этих станциях усиление колебаний регистрируется с опережением в несколько часов. Использование станций низких широт, где колебания-предвестники фиксируются еще раньше, нежелательно, т.к. рост мощности на этих станциях не так велик по сравнению с магнитоспокойными значениями, что повышает вероятность возникновения так называемой «ложной тревоги». Для высокоширотных станций вследствие более возмущенной ионосферы предвспышечный рост мощности долгопериодных колебаний H -компоненты магнитного поля Земли на фоне общей активности не так заметен, что может привести к так называемому «пропуску цели».

Использование данных геомагнитных станций, разнесенных по широте на значительное расстояние, необходимо для оценки скорости распространения пульсаций. Синхронность геомагнитных пульсаций в разных пунктах говорит в пользу солнечного происхождения колебаний и может служить геомагнитным предвестником солнечной вспышки. Известно также о существовании колебаний ионосферного происхождения с близкими периодами, однако они должны распространяться со значительно меньшей скоростью [8].

В связи с вышесказанным, предлагается следующий алгоритм прогноза геоэффективных солнечных вспышек.

Если среднесуточное значение мощности колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля с периодами 30–60 минут на всех трех тестируемых станциях более чем в 2 раза превышает среднесуточное значение мощности колебаний за предыдущий день, то проводится оценка синхронности возникновения колебаний. При одновременном (с точностью 50% периода) росте мощности долгопериодных колебаний на всех станциях возможно наступление вспышечного события в течение двух–трех ближайших суток.

Заключение

В данной работе на большом экспериментальном материале, включающем данные более 100 станций различных широт и долгот для 6 вспышечных событий различной интенсивности, подтверждено существование эффекта воз-

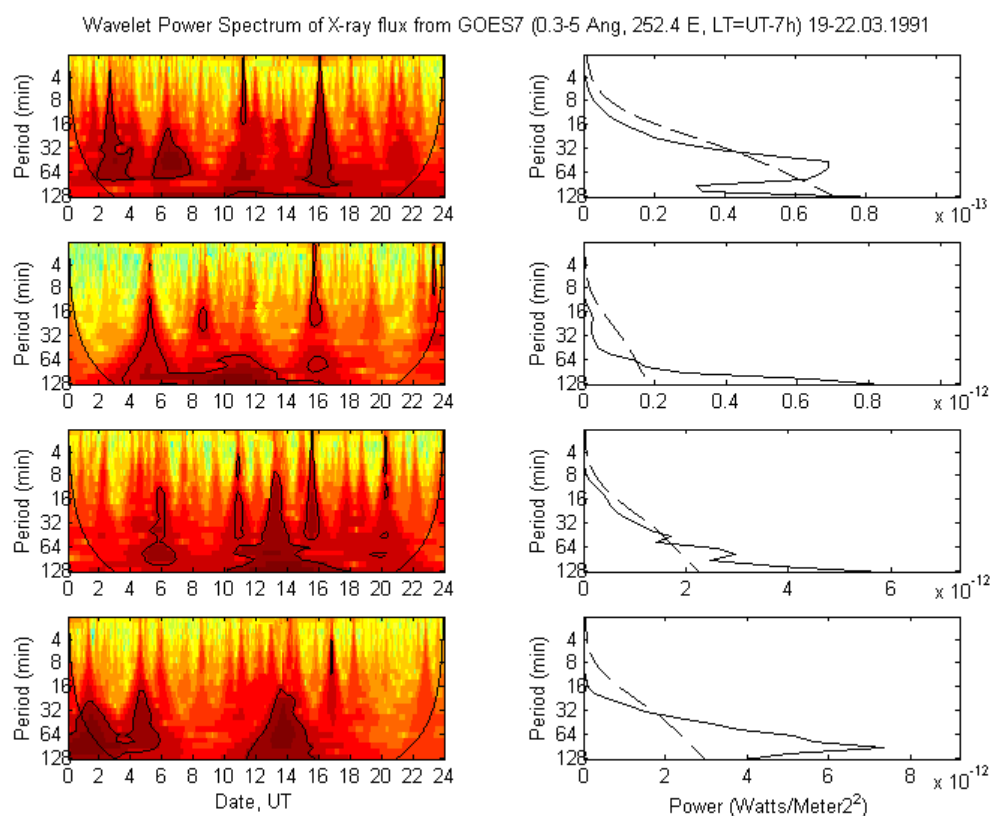


Рис. 6. Результат вейвлет-анализа потока рентгеновского излучения за период времени 19–22.03.1991 года

растания долгопериодных (30–60 мин) колебаний H -компоненты магнитного поля Земли – геомагнитных предвестников геоэффективных солнечных вспышек, изучены их характеристики.

Обнаружена зависимость мощности таких долгопериодных колебаний горизонтальной компоненты геомагнитного поля от величины потока протонов, которым сопровождалось солнечное событие: для событий с большим потоком протонов наблюдаемая мощность предвспышечных колебаний выше.

Причиной усиления долгопериодных пульсаций-предвестников является связь между колебательными процессами в солнечной атмосфере накануне вспышечных событий и в атмосфере Земли. Коэффициент корреляции спектральной плотности рентгеновского излучения и горизонтальной компоненты магнитного поля достигает высоких значений (например, для среднеширотных станций 0.93–0.99). Это позволяет говорить о влиянии спектрального состава ионизирующего предвспышечного излучения Солнца на спектр усиливающихся геомагнитных колебаний.

В работе показана возможность использования вариаций характеристик геомагнитных пульсаций на земной поверхности как диагно-

стического инструмента слежения за состоянием ионосферных токовых систем.

Кроме того, исследована возможность использования исследуемого эффекта возрастания долгопериодных пульсаций H -компоненты магнитного поля Земли для краткосрочного прогнозирования вспышечной активности на примере события 22 марта 1991 года. Изучена динамика мощности долгопериодных колебаний за трехнедельный период, примыкающий непосредственно к вспышечному событию. Обнаружено существенное увеличение мощности, которое фиксируется накануне вспышки и может служить ее геомагнитным предвестником. Предложен алгоритм краткосрочного прогноза геоэффективных солнечных вспышек.

Использование регистрируемых на земной поверхности долгопериодных колебаний H -компоненты геомагнитного поля может как значительно дополнять существующие прогностические методы, так и применяться как самостоятельный метод прогноза солнечной активности. В ряде ситуаций этот метод может служить единственным источником сведений о процессах, происходящих на Солнце, так как не зависит от условий космической погоды. Кроме того, использование исключительно наземных наблюдений может позволить существенно уменьшить матери-

альные затраты на проведение наблюдений и осуществление прогностических процедур.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-02-01078).

Список литературы

1. Смирнова А.С., Снегирев С.Д., Шейнер О.А. Долгопериодные пульсации геомагнитного поля как предвестники крупных солнечных вспышек / Труды XI Конференции молодых ученых «Гелио- и геофизические исследования», БШФФ-2009. Изд-во ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2009. С. 290–292.
2. Смирнова А.С. Об усилении долгопериодных пульсаций *H*-компоненты магнитного поля Земли перед мощными солнечными вспышками // Вестник ННГУ. 2010. № 1.
3. Смирнова А.С., Снегирев С.Д., Шейнер О.А. Об усилении долгопериодных пульсаций геомагнитного поля накануне геоэффективных солнечных вспышек / Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2010», ГАО РАН, Пулково, Санкт-Петербург, 3–9 октября 2010.
4. Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука, 1964.
5. Бархатова О.М., Бархатов Н.А. Выступы плазмосферы и вариации горизонтальной компоненты геомагнитного поля // Геомагнетизм и аэронавтика. 2011. Т. 51. № 2. С. 214–223.
6. http://ccmc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/display/RT_t.cgi?page=potential
7. <http://www.intermagnet.org/>
8. Дробжев В.И. Экспериментальное доказательство теории внутренних гравитационных волн / В кн.: Волновые возмущения в атмосфере. Алма-Ата. 1980.

ON THE POSSIBILITY OF USING EARTH'S MAGNETIC FIELD OBSERVATIONS TO FORECAST SOLAR FLARE ACTIVITY

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

The data of more than 100 geomagnetic stations for 6 solar flare events of different intensity have been analyzed to study long-period (30-60 minutes) pulsations of the *H*-component of geomagnetic field before large solar proton flares. Some assumptions on the mechanism of such pulsations have been made. The possibility to use the growth of long-period geomagnetic pulsations to forecast the solar flare activity has been studied by the example of the event on 22 March 1991. An algorithm of solar proton flare forecasting using geomagnetic data has been proposed.

Keywords: long-period pulsations, geomagnetic field, X-ray emission, forecasting, solar activity.