

УДК 550.385

ГОД СПУСТЯ: СОЛНЕЧНЫЕ, ГЕЛИОСФЕРНЫЕ И МАГНИТОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В НОЯБРЕ 2004 г.

© 2005 г. Ю. И. Ермолаев¹, Л. М. Зеленый¹, Г. Н. Застенкер¹, А. А. Петрукович¹,
М. Ю. Ермолаев¹, Н. С. Николаева¹, М. И. Панасюк², С. Н. Кузнецов², И. Н. Мягкова²,
Е. А. Муравьева², Б. Ю. Юшков², И. С. Веселовский², А. В. Дмитриев^{2,15}, А. Н. Жуков^{2,16},
О. С. Яковчук², В. Д. Кузнецов³, И. М. Черток³, В. Н. Ишков³, А. В. Белов³, Е. А. Ерошенко³,
В. Г. Янке³, С. П. Гайдаш³, Х. Д. Канониди³, С. В. Кузин⁴, И. А. Житник⁴, А. П. Игнатъев⁴,
В. А. Слемзин⁴, Н. К. Суходрев⁴, С. А. Шестов⁴, М. В. Еселевич⁵, В. Г. Еселевич⁵,
Г. В. Руденко⁵, В. М. Дворников⁵, В. Е. Сдобнов⁵, М. В. Кравцова⁵, В. М. Богод⁶,
В. С. Котельников⁶, Л. А. Першаков⁷, М. И. Белоглазов⁷, В. И. Власов⁸, И. В. Чашей⁸,
Н. Г. Клейменова⁹, О. В. Козырева⁹, В. И. Козлов¹⁰, В. А. Пархомов¹¹, Ю. А. Кугаенко¹²,
Р. З. Хисамов¹³, В. Л. Янчуковский¹³, К. Кудела¹⁴

¹Институт космических исследований РАН, Москва

e-mail: yermol@iki.rssi.ru

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Троицк (Московской обл.)

⁴Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

⁵Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, Иркутск

⁶Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербургский филиал, Пулково

⁷Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты (Мурманской обл.)

⁸Пуцинская Радиоастрономическая обсерватория ФИАН, Пуцино (Московской обл.)

⁹Объединенный институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва

¹⁰Институт космофизических исследований и аэронауки СО РАН, Якутск

¹¹Байкальский государственный университет экономики и права, Иркутск

¹²Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский

¹³Станция космических лучей Новосибирской геофизической обсерватории ГС СО РАН, Новосибирск

¹⁴Институт экспериментальной физики САН, Кошице, Словакия

¹⁵Институт космической науки, Тайвань

¹⁶Королевская обсерватория Бельгии, Брюссель, Бельгия

Поступила в редакцию 18.05.2005 г.

После доработки 21.07.2005 г.

Спустя год после экстремальных событий на Солнце, в гелиосфере и на Земле в октябре–ноябре 2003 года [Веселовский и др., 2004; Панасюк и др., 2004; Ермолаев и др., 2005] похожая ситуация повторилась в ноябре 2004 года. В работе, подготовленной в основном участниками прошлой годней коллаборации отечественных исследователей экстремальных явлений, приводятся основные наблюдательные данные, относящиеся к периоду, когда на Земле наблюдалась сильная магнитная буря с $Dst = -373$ нТл. И хотя по силе возмущенности Солнца, солнечного ветра и магнитосферы рассматриваемый период по ряду параметров уступает аналогичному периоду 2003 года, приведенные данные свидетельствуют о том, что благодаря событиям осени 2003 и 2004 годов фаза спада 23-его цикла солнечной активности является одной из самых активных за весь период всесторонних исследований солнечно-земных связей.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование влияния солнечных и межпланетных (гелиосферных) явлений на околоземное пространство было и остается важнейшей составляющей солнечно-земной физики. Так как такое влияние, часто называемое “Космической пого-

дой”, оказывается важным во многих сферах человеческой деятельности, то исследования в этом направлении развиваются быстрыми темпами. Несмотря на то, что общая концепция такого влияния существенно не изменялась на протяжении многих лет, и к настоящему моменту накоплен большой объем экспериментальных и теоре-

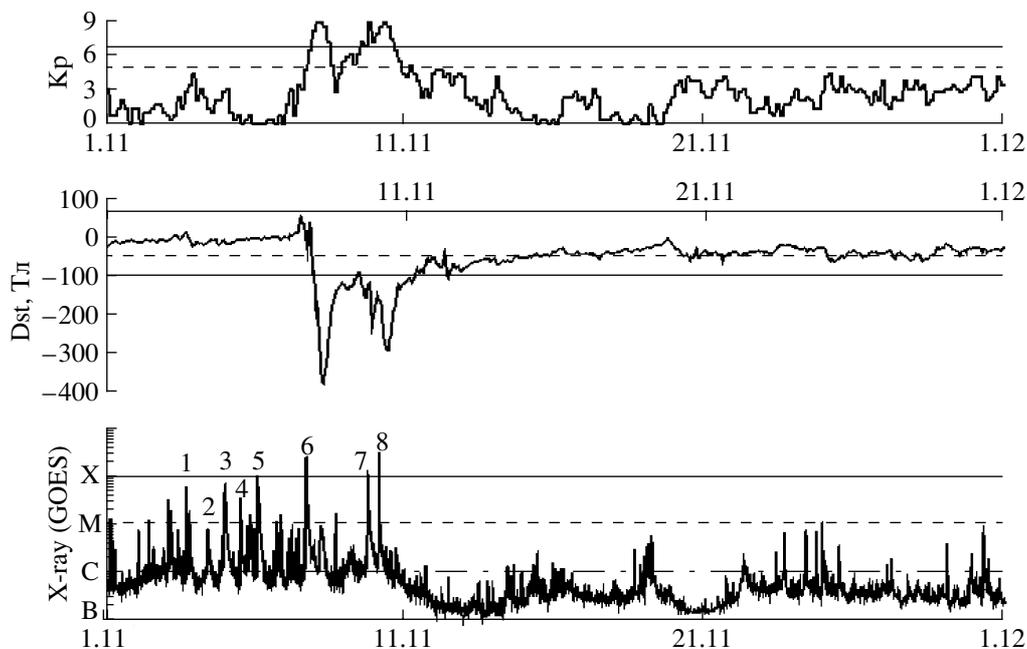


Рис. 1. Последовательность солнечных и наземных измерений в ноябре 2004 г. Верхняя и средняя панели: K_p и Dst индексы (штриховые и сплошные линии – границы умеренных и сильных магнитных бурь).

Нижняя панель: рентгеновское излучение по измерениям спутника GOES-12 (буквами X, M, B и C на оси и различными линиями показаны классы вспышек). Номерами 1–8 показаны вспышки, приведенные в табл. 1.

тических данных (см. например, сборники статей и обзоры [Gonzalez et al., 1999; Crooker, 2000; Richardson et al., 2001; Bothmer et al., 2002; Ермолаев и Ермолаев, 2003; Cole, 2003; Lyatsky and Tan, 2003; Daglis et al., 2003; Maltsev, 2004; Gonzalez et al., 2004; Echer and Gonzalez, 2004; Yermolaev et al., 2005; Dmitriev et al., 2005, Kane, 2005; Schwenn et al., 2005] и ссылки в них), существуют определенные сложности в прогнозировании эффектов “Космической погоды”. При этом, если на основании измерений параметров межпланетной среды вблизи магнитосферы Земли (в частности в либрационной точке L1) можно с высокой степенью точности предсказать отклик магнитосферы и нижележащих оболочек Земли, то степень “оправдываемости” подобного прогноза на основании наблюдений Солнца остается достаточно низкой [Ермолаев и Ермолаев, 2003; Капе, 2005; Schwenn et al., 2005; Yermolaev et al., 2005]. Это связано, с одной стороны, со сложностью изучаемой системы, включающей в себя множество отдельных звеньев, в каждой из которых действуют различные физические механизмы, а с другой стороны, с ограниченностью экспериментального материала, который в силу технических сложностей имеется лишь в некоторых точках пространства, доступных сегодняшним средствам измерения. Поэтому наиболее перспективными представляются исследования, которые имеют комплексный, междисциплинарный характер, и такие исследования ведутся как у нас в стране, так и за рубежом. Пре-

красным примером такого подхода может служить “мозговой штурм” коллаборации отечественных исследователей из более, чем 10 научных организаций страны, которую удалось собрать ИКИ РАН и НИИЯФ МГУ для изучения экстремальных событий на Солнце, в гелиосфере и на Земле в октябре-ноябре 2003 года. Тогда в сравнительно короткий срок удалось собрать обширный материал по этим событиям, провести международную конференцию “International Symposium on Solar Extreme Events of 2003: Fundamental Science and Applied Aspects” (Москва, 12–14 июля 2004 г.) и опубликовать ряд статей, как обзорного характера [Веселовский и др., 2004; Панасюк и др., 2004; Ермолаев и др., 2005], так и посвященных некоторым специфическим аспектам (“Космические исследования”, № 6, 2004 г. и “Геомагнетизм и аэрномия”, № 1, 2005 г.). В совокупности с зарубежными исследованиями этих событий (см. статьи в специальном выпуске журнала *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, No. 12, 2005 и ссылки в них) эти результаты позволили существенно продвинуться в понимании закономерностей солнечно-земной физики на примере экстремальных событий октября-ноября 2003 г.

Ровно через год, в конце октября–начале ноября 2004 года, Солнце снова проявило большую активность и породило ряд сильных межпланетных и магнитосферных возмущений (рис. 1, табл. 1), и хотя эта активность немного не “дотягивает” по ряду параметров до экстремальных значений, на-

Таблица 1. Вспышечные события в АО 10696 в ноябре 2004 г. и их проявления в околоземном пространстве

| NN | Дата, время, длительность в мин. | Координаты | Балл | ВКМ | МУВ, дата, время | Магнитная буря, дата, Dst |
|----|----------------------------------|------------|---------|--------|------------------|-----------------------------|
| 1 | 03.11, 15:35, 59 | N11 E40 | M5.0/SN | NE | | |
| 2 | 04.11, 08:45, >79 | N08 E28 | C6.3/SN | P.Halo | 07/02:00 | |
| 3 | 04.11, 21:42, >131 | N11 E19 | M2.5/1N | P.Halo | | |
| | 04.11, 22:34 | | M5.4/1N | P.Halo | 07/10:00 | |
| 4 | 05.11, 11:23, >10 | N08 E15 | M4.0/1F | – | | |
| | 05.11, 19.10 | N09 E07 | M1.2/SF | – | | |
| 5 | 06.11, 00:11, 157 | N10 E08 | M9.3/2N | Halo | | |
| | 06.11, 00:44 | | M5.9 | Halo | 07/17:55 | |
| | 06.11, 01:40 | | M3.6 | Halo | | 08.11 –373 нТл |
| 6 | 07.11, 15:42, >33 | N09 W17 | X2.0/2B | Halo | 09/18:18 | |
| 7 | 09.11, 16:59, 90 | N07 W51 | M8.9/2N | Halo | | |
| 8 | 10.11, 01:59, 76 | N09 W49 | X2.5/3B | Halo | | 10.11 –289 нТл |

блюдаемых в 2003 году (3 солнечных вспышки класса X по сравнению с 11 вспышками этого класса и магнитная буря с $Dst = -373$ нТл по сравнению с бурей с $Dst = -401$ нТл), тем не менее ее можно отнести к разряду сильнейших не только в текущем 23-ем цикле солнечной активности, но и за весь период космических наблюдений. Коллектив исследователей, в основном сложившийся в период анализа предшествующего активного периода, провел сбор и анализ новых данных, и вашему вниманию представляется наблюдательный материал по Солнцу и гелиосфере, предшествующий магнитной буре 8–10 ноября 2004 года, а также по состоянию магнитосферы Земли в этот период. Настоящая работа носит предварительный характер и ставит своей задачей дать общее описание состояния различных областей пространства в этот период и ознакомить читателя с описанием основных, как отечественных, так и зарубежных, экспериментальных данных, которые могут быть полезны для дальнейшего анализа.

2. СОЛНЕЧНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

2.1. Общее описание солнечных явлений

Всплеск солнечной вспышечной и эруптивной активности на фазе спада текущего 23-его солнечного цикла наблюдался в конце октября–начале ноября 2004 г. Он связан с прохождением по видимому диску Солнца двух групп пятен: активные области АО 10691 и АОj 10696. В первой из них (АО 10691) за 38 часов 30 октября–1 ноября произошли одна вспышка балла X и семь вспышек балла M. Последствия этой активности в околоземном космическом пространстве были достаточно слабыми: два протонных события малой интенсивности и ряд внезапных ионосферных возмущений средней мощности, однако, геомагнитных возмущений не наблюдалось. Это, воз-

можно, было связано с положением активной области относительно линии Солнце–Земля, так как ее гелиодолгота за этот период изменилась от W20 до W60, и потенциально эффективные возмущения могли пройти мимо Земли. Поэтому для анализа передачи воздействия от Солнца до Земли более интересным является солнечная активность в другой активной области (АО 10696).

Рассматриваемая активность была связана с быстрым развитием на диске области LAO 10696 (каррингтоновские координаты N09, $L = 026$) (рис. 2). По данным, приведенным в Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data (см. сайт <http://www.sel.noaa.gov/weekly/pdf/prfl523.pdf> и 1524.pdf), в период с 1-ого (гелиодолгота E63) по 6-ое (W08) ноября площадь пятен в этой области возросла от 60 до 910 м.д.п. (миллионные доли полусферы), число пятен в ней увеличилось с 6 до 33, а магнитная конфигурация, соответственно, усложнилась от простой (β) до вспышечно продуктивной ($\beta\delta$). После 6 ноября число и площадь пятен начали уменьшаться с повторным возрастанием 8 ноября до 48 по числу пятен и 9 ноября до 730 м.д.п. по их площади, соответственно. Бурная эволюция области АО 10696 сопровождалась высокой вспышечной активностью: за время прохождения области по диску произошло 13 вспышек рентгеновского балла M и 2 вспышки балла X (рис. 1).

Высокая вспышечная активность сочеталась с весьма значительной эруптивной активностью. В период с 3 по 10 ноября на коронографе белого света SOHO/LASCO было зарегистрировано большое число крупных выбросов корональной массы (ВКМ), в том числе 9 ВКМ типа гало со свечением вокруг значительной части или всего затмевающего диска коронографа. На рис. 3, представлены разностные изображения этих ВКМ. Для каждо-

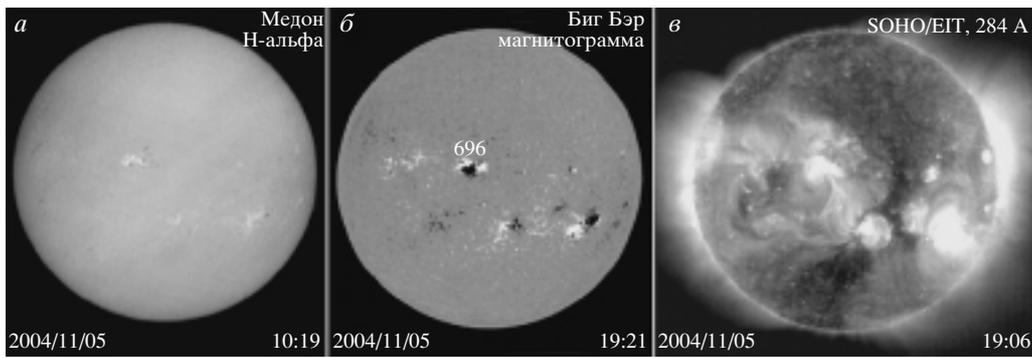


Рис. 2. Гелиограммы в линии H_{α} (а) и в УФ канале 284 \AA (в) за 5 ноября 2004 г. На магнитограмме (б) светлым показано поле северной, а темным — южной полярности. Обозначена локализации активной области AR 10696 — основной источник вспышечной активности.

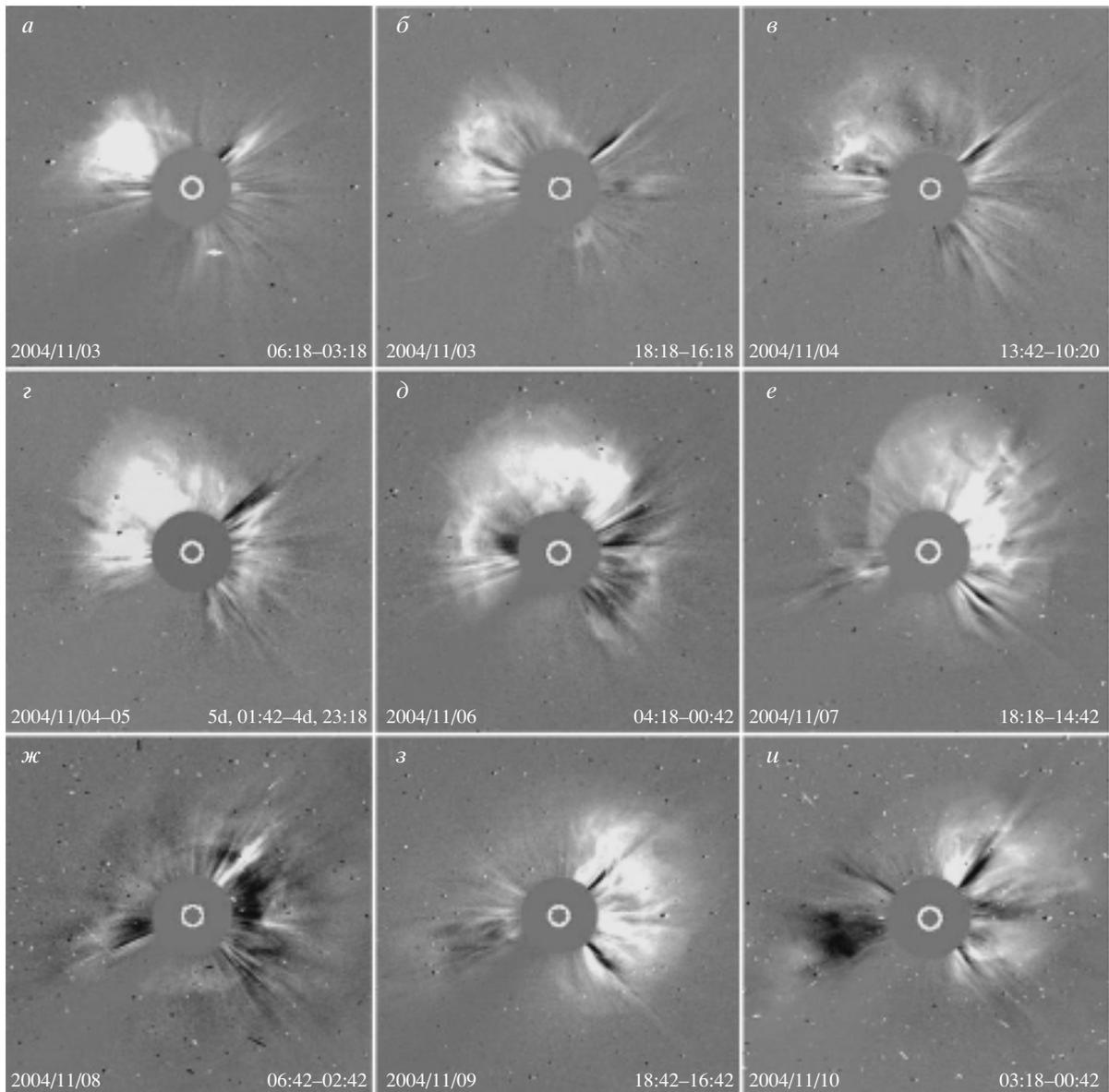


Рис. 3. Разностные изображения крупнейших корональных выбросов массы типа гало, зарегистрированных на коронографе белого света SOHO/LASCO/C3 в период 3–10 ноября 2004 г. Внизу каждого кадра указаны даты и времена основного и фонового кадров.

Таблица 2. Вспышки и ВКМ, зарегистрированные телескопом СПИРИТ с 1 по 9 ноября 2004 г.

| Дата | Класс вспышки | Начало/маж/конец вспышки (GOES) | № АО | Начало ВКМ* | Направление* | Раствор ВКМ | V, км/с (линейная аппрокс.)* |
|----------|---------------|---------------------------------|------|-------------|--------------|-------------|------------------------------|
| 03/11-04 | M5.0 | 1535-1547-1555 | 696 | 16:06 | 342 | 316(H) | 781 |
| 06/11-04 | M3.6 | 0140-0157-0208 | 696 | 01:31 | 036 | 196 | 612 |
| | | | | 15:54 | 120 | 20 | 1953 |
| 07/11-04 | X2.0 | 1542-1606-1615 | 696 | 15:54(?) | | | |
| 08/11-04 | M2.3 | 1543-1549-1552 | 696 | 14:30 | 313 | 26 | 558 |
| | | | | 16:30 | 325 | 10 | 220 |

* По данным коронографа LASCO на обл. SOHO, обработанным по программе CACTUS Королевской обл. Бельгии [см. <http://sidc.oma.be/cactus/out/latestCMEs.html>].

го события они получены по данным коронографа LASCO/C3 путем вычитания фонового изображения перед эрупцией из изображений на развитой фазе соответствующего ВКМ. Вид ВКМ в картинной плоскости указывает на их крупномасштабный и даже глобальный характер: уже на расстояниях 10–20R_☉ (радиусов Солнца) от Солнца линейные размеры ВКМ превышали диаметр видимого диска в десятки раз. При этом наиболее яркие структуры ВКМ по мере прохождения области АО 10696 по диску сдвигались с северо-восточного к северному, а затем к северо-западному сектору околосолнечного пространства. Наблюдавшееся свечение вокруг других секторов лимба свидетельствует о значительных угловых размерах ВКМ и о возможной существенной составляющей их распространения в направлении, перпендикулярном картинной плоскости, в данном случае в направлении Земли.

Хронологически вспышечные и эруптивные события рассматриваемой группы пятен развивались следующим образом: первое вспышечное событие балла M1.6/1N. произошло в середине суток 3 ноября (максимум излучения в 13:35 UT), которое сопровождалось динамическими радио всплесками II и IV типа и ярким ВКМ в северо-восточном направлении. В 15:35 UT осуществилось большое вспышечное событие балла M5.0/SN с радио всплесками II и IV типа и большим асимметричным ВКМ (первое появление 16:06 UT по данным прибора коронографа C3 на SOHO) на северо-восточном лимбе со скоростью в картинной плоскости около 900 км/с. Последним событием этого дня стала вспышка балла M1.0/SF в 18:03 UT тоже сопровождавшаяся асимметричным ВКМ слабой интенсивности. Через 14 ч в 08:45 UT 14 ноября наблюдалось продолжительное вспышечное событие балла C6.3/SF, сопровождавшееся значимым динамическим радио всплеском IV типа и достаточно большим ВКМ (10:42 UT) типа частичного гало с основным выбросом в северо-восточном направлении со скоростью ~635 км/с в картинной плоскости. В конце суток 4 ноября в активной об-

ласти произошло довольно редкое событие: за время оптической вспышки балла 1N, длительностью более 2 ч, наблюдалось два рентгеновских всплеска балла M2.5 (21:42 UT) и M5.4 (22:53 UT) с радио всплесками II и IV типов. Начальная фаза развития данной вспышки, соответствующая первому рентгеновскому всплеску, проходила в восточной части группы пятен. С началом второго всплеска эмиссия захватила центральную часть, и одна эмиссионная лента достигла полутени ведущего пятна. Данное вспышечное событие породило сложный ВКМ (23:42 UT) типа “частичного гало” с двумя фронтами распространения возмущения [LASCO CME List 2004, ftp://lasco6.nascom.gov/pub/lasco/status/LASCO_CME_List_2004]. Первый фронт развивался в основном у северо-восточного (NE) лимба, тогда как второй фронт захватил западную полусферу (по данным прибора C3 охватил около 290°). Средняя скорость распространения ВКМ в картинной плоскости составила ~1050 км/с. День 5 ноября был относительно “спокойным”, так как обе вспышки балла M4.0/1F (11:23 UT) и M1.2/SF (19:10 UT) не сопровождались ВКМ.

Вспышки и ВКМ, произошедшие 3–5 ноября, во время нахождения области АО 10696 на восточной половине диска, не привели к значительным возмущениям в околоземном космическом пространстве. Энергичные частицы, которые, распространяясь вдоль спиральных силовых линий межпланетного магнитного поля, видимо, прошли восточнее и северо-восточнее Земли. Возмущения межпланетной среды и магнитосферы этими и последующими солнечными явлениями подробно рассматриваются в следующих разделах настоящей статьи (см. рис. 11 и 12 и табл. 4).

В начале 6 ноября в активной области, расположенной вблизи центрального меридиана (N09 E05), произошло достаточно редкое вспышечное событие – оптическая вспышка балла 2N “объединила” три значительных рентгеновских всплеска M9.3 (00:11 UT) с динамическими радио всплесками II и IV типов, M5.9 (00:44 UT) и M1.4 (01:40 UT).

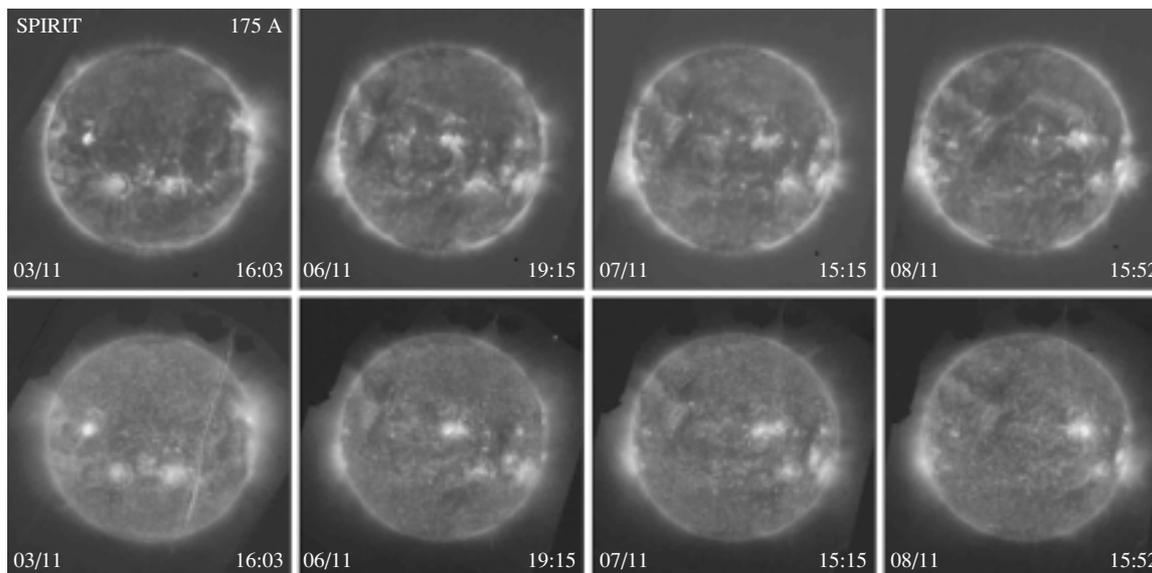


Рис. 4. Изображения Солнца в каналах 175 и 304 Å, полученные 3–8 ноября 2004 г. телескопом СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф.

Однако эта активность так же, как и 3–5 ноября, не привела к возрастанию потока энергичных протонов у Земли. Результатом этого всплещного события явился сложный ВКМ типа “полное гало” с ярко выраженными тремя компонентами с началами 01:31 UT, 02:06 UT и 02:42 UT (по данным коронографа СЗ, рис. 3). Средняя скорость распространения возмущения в картинной плоскости была порядка 960 км/с. Сильнейшей геомагнитной бури с минимальной величиной индекса $Dst \approx 373$ нТл 8 ноября в 07 UT (рис. 1) предшествовали три импульса внезапного начала (SC), зарегистрированные 7 ноября в 02:57, 10:52 и 18:27 UT, что указывает на сложный характер соответствующего межпланетного возмущения и на возможный вклад в это возмущение предшествующих эруптивных событий, произошедших на

Таблица 3. Спектральные линии ионов, наблюдавшиеся во время вспышки 8 ноября 2003 г.

| Ион | Длина волны, Å | $\log_{10}(T_{\max})$ |
|----------|------------------------|-----------------------|
| He II | 303.78 | 4.9 |
| Si VIII | 314.36, 316.22, 319.84 | 5.9 |
| Mg VIII | 313.74, 315.02, 317.03 | 6.0 |
| Al X | 332.79 | 6.1 |
| Si IX | 292.81, 296.16 | 6.1 |
| Si XI | 303.33 | 6.2 |
| Fe XV | 284.16 | 6.4 |
| Ni XVIII | 291.98 | 6.7 |
| Fe XVII | 323.47 | 6.9 |
| Ca XVIII | 302.19 | 7.0 |

Солнце в середине дня 4 ноября (рис. 3в), в ночь с 4 на 5 ноября (рис. 3з), а также в течение 5 ноября (рис. 2) (см. табл. 4).

И, наконец, 7 ноября активная область произвела самую большую вспышку балла X2.0/2B (15:42 UT) первого периода всплещного энерговыделения. Эта вспышка сопровождалась наиболее интенсивным радио сигналом на всех наблюдаемых частотах, динамическими радио всплесками II и IV типов и ВКМ типа полного гало. Яркий и очень широкий петлевой фронт по данным коронографа СЗ на “SOHO” развивался главным образом на WNW, со слабым распространением к югу, образуя полное гало [см. ftp://lascob.nascom.gov/pub/lasco/status/LASCO_CME_List_2004]. Первое появление выброса на СЗ зарегистрировано в 17:18 UT. Средняя скорость распространения возмущения в картинной плоскости составила 1460 км/с. Поскольку область АО 10696 в это время располагалась уже на западной половине диска (координаты N09W17), данное событие сопровождалось значительным возрастанием потока протонов у Земли, максимум которого в диапазоне энергий $E > 10$ Мэв достиг $4.6 \times 10^2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ (рис. 11). Именно с этим событием, вероятно, связано SC, зарегистрированное 9 ноября в 09:30 UT, что соответствует оценочной скорости межпланетной ударной волны порядка 1000 км/с. Второе эруптивное событие, которое могло внести вклад в геомагнитную бурю 10 ноября с $Dst \approx 289$ нТл, наблюдалось 8 ноября в 03:30 UT как менее интенсивная (балл SF/C7.9; координаты, N08W28), но более продолжительная вспышка (рис. 1) и относительно слабо светящийся, диффузный и медленный ($V \approx 430\text{--}520$ км/с) ВКМ типа полного га-

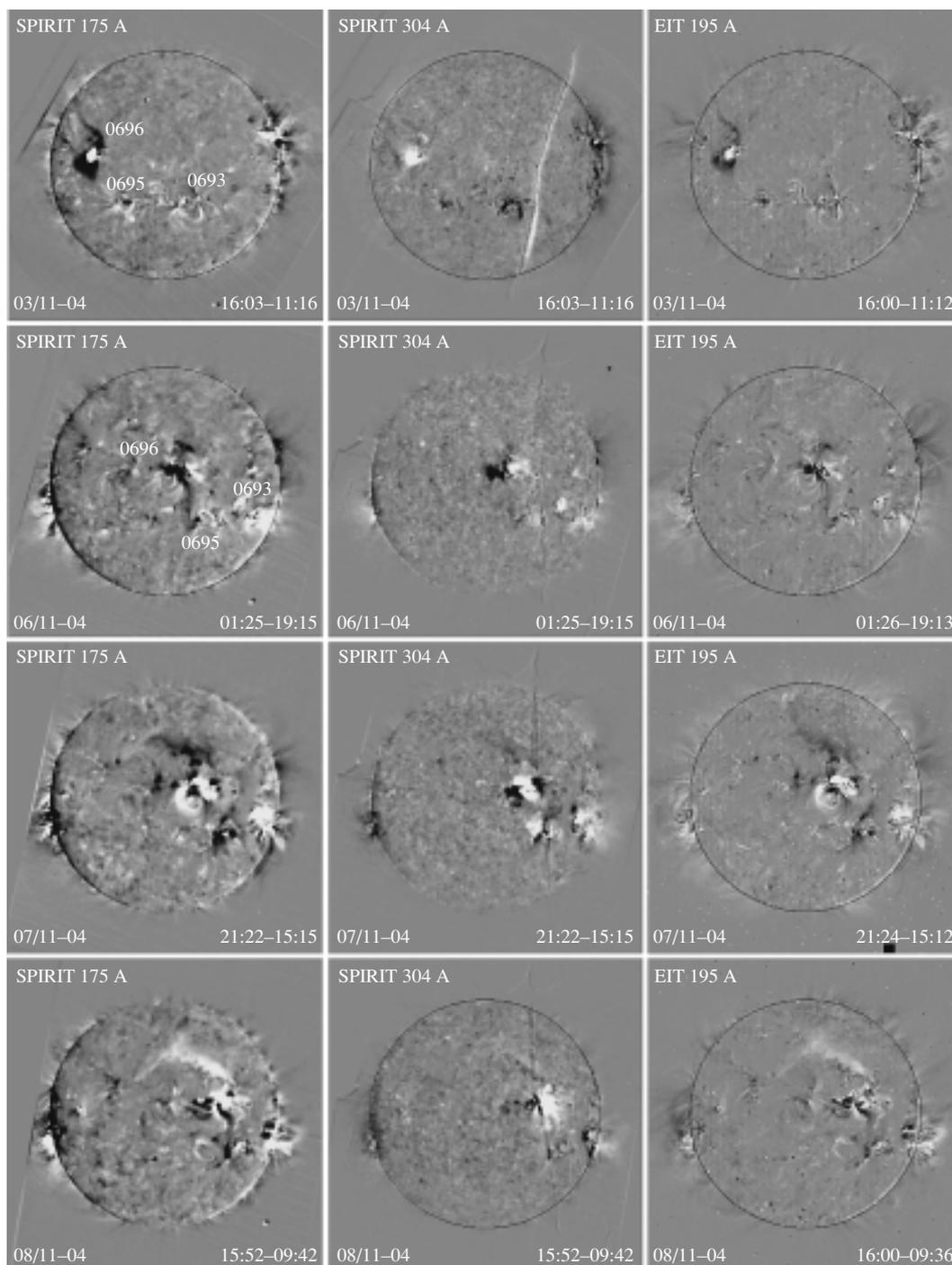


Рис. 5. Фиксированные разностные изображения в каналах телескопа СПИРИТ 175 и 304 Å и аналогичные изображения в канале 195 Å телескопа SOHO/EIT, полученные 3, 6, 7 и 8 ноября 2004 г. В нижнем правом углу приведены времена регистрации текущего и базового изображений.

ло (рис. 3ж). Следующую вспышку балла M2.3/1N эта активная область генерировала 8 ноября в 15:43 UT, с очень слабо выраженным ВКМ, отмеченным в 17:30 UT.

9 ноября начался второй период вспышечной активности, которая была обеспечена всплытием

нового потока 6–7 ноября в ведомой и центральной части группы пятен. За 9 ч в активной области произошло 2 большие вспышки (9 ноября, 17:19 UT, вспышка 2N/M8.9, координаты N07W51 и 10 ноября, 02:13 UT, вспышка 3N/X2.5, координаты N09W49) и два с ВКМ (09 ноября в 17:48 UT

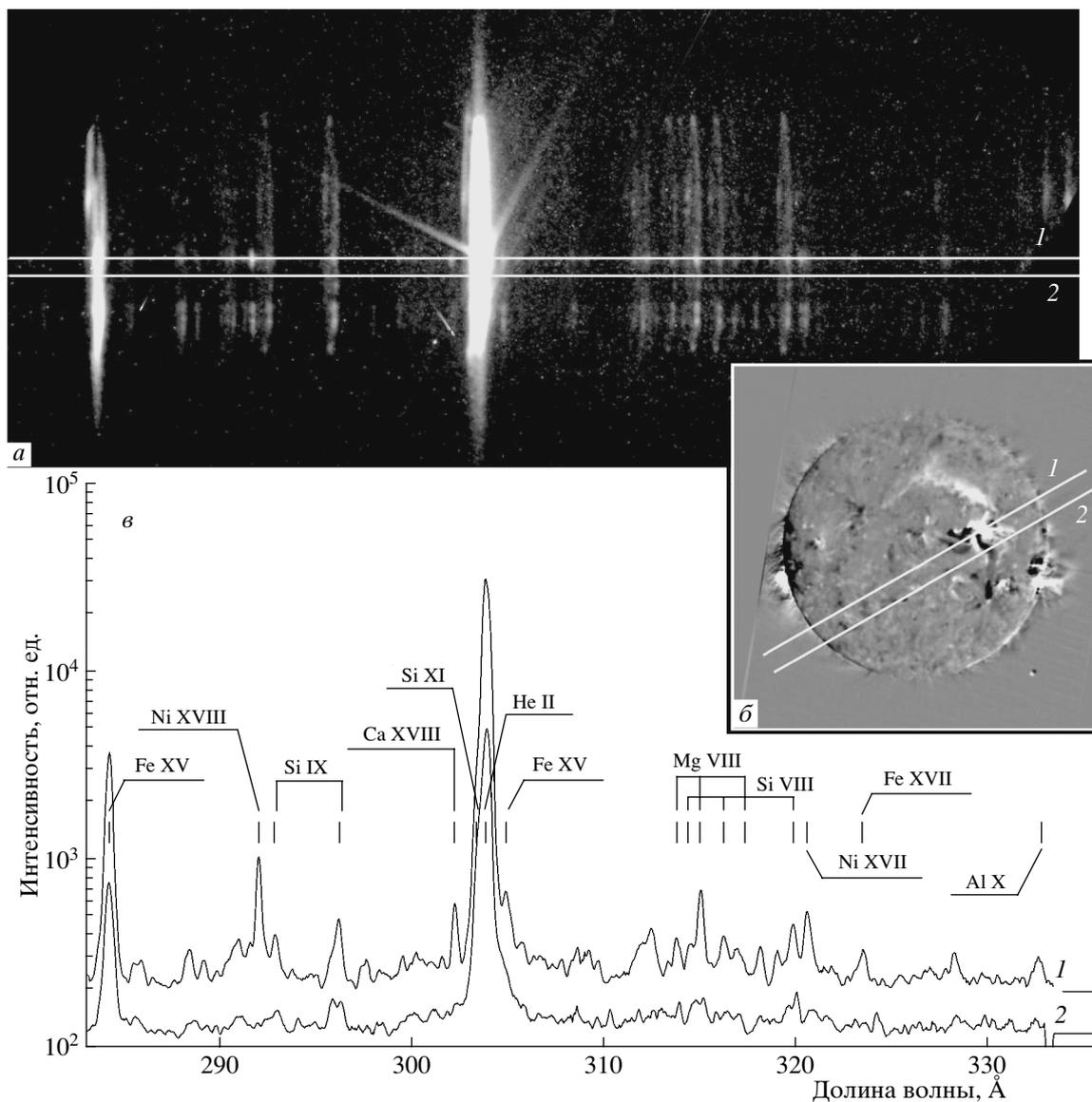


Рис. 6. *a* – спектрогелиограмма Солнца в участке спектра 285–335 Å, полученная во время вспышки 8 ноября 2004 г. (15:49:28 UT); *б* – расположение направления дисперсии и сканов на диске Солнца; *в* – спектры вдоль сканов 1 (область вспышки) и 2 (область димминга и спокойные участки).

типа “полного гало” со скоростью 1800 км/с в картинной плоскости и 10 ноября в 02:42 UT типа “асимметричного полного гало” со средней скоростью распространения возмущения в картинной плоскости около 2000 км/с), в которых яркое свечение наблюдалось над всем западным лимбом (рис. 1 и 3з, 3и). В силу локализации источников в западном секторе диска эти явления не привели к существенным геомагнитным возмущениям, но сопровождалась еще одним возрастанием потока протонов с пиковой интенсивностью $(3-4) \times 10^2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ (рис. 11).

К сказанному следует добавить, что существенным фактором, определившим интенсивность геомагнитных бурь 8 и 10 ноября, было распреде-

ление полярностей магнитного поля в активной области AO 10696. Как видно из магнитограммы на рис. 2б, в северной части области доминировала положительная полярность, а в южной – отрицательная. Если предположить, следуя [Пудовкин и др., 1977], что при эрупции магнитное поле так или иначе переносится межпланетным возмущением с сохранением полярности поля в источнике, то указанное распределение полярностей на Солнце должно было приводить у Земли к существенной отрицательной B_z -компоненте, что и наблюдалось во время геомагнитных бурь 8 и 10 ноября (см. раздел 3.1 и рис. 12).

Результатом описанных эруптивных событий, в частности, крупных ВКМ 6-10 ноября и соответ-

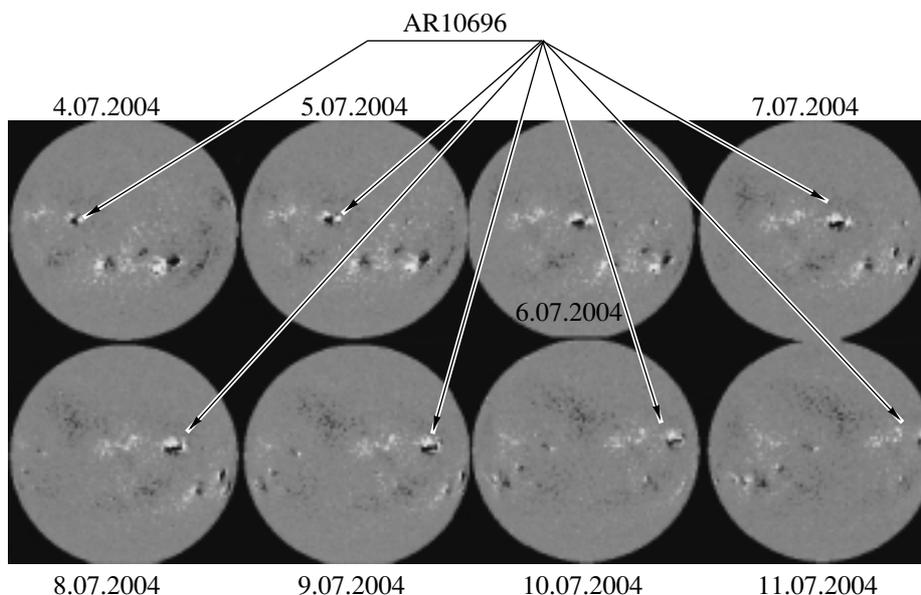


Рис. 7. Магнитограммы диска Солнца по данным спутника JSOHO MDf. Виден монотонный характер изменения магнитной структуры АО 10696 в течение всего периода.

ствующих межпланетных возмущений, явилось также сложное, глубокое и продолжительное Форбуш-понижение интенсивности галактических космических лучей. Оно началось 7 ноября одновременно с первой геомагнитной бурей, достигло максимальной амплитуды 10 ноября, а его фаза восстановления длилась вплоть до середины ноября (см. подробнее раздел 3.4 и таблицу 5).

2.2. Динамика солнечной активности по данным наблюдений комплекса СПИРИТ на ИСЗ КОРОНАС-Ф

В период с 1 по 8 ноября 2004 г. проводились наблюдения с телескопом СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф [Ораевский и др., 2002]. При этом регистрировались изображения полного диска в каналах 175 и 304 Å 4 раза в сутки с интервалами 4–8 ч и полные спектрогелиограммы 2 раза в сутки. Несколько из полученных телескопических изображений показаны на рис. 4. В табл. 2 приведены времена вспышек и ВКМ, произошедших в указанный период, и для которых имеются данные СПИРИТ.

2.2.7. Димминги

Для исследования структуры диммингов (локальных вариаций интенсивности излучения на солнечном диске) были построены фиксированные разностные изображения, которые отражают суммарные изменения активности, произошедшие между двумя последовательными кадрами. В качестве опорных выбирались изображения,

соответствующие моментам времени до вспышек. Последующие изображения в обоих каналах были повернуты против вращения Солнца ко времени базовых кадров, и затем из них были вычтены базовые изображения. Для повышения контраста диммингов яркости в разностных изображениях были приведены к нелинейной шкале.

Фиксированные разностные изображения, полученные телескопом СПИРИТ, и для сравнения – аналогичные изображения телескопа SOHO/EIT, представлены на рис. 5. Все перечисленные в табл. 2 явления произошли в большом комплексе, объединяющем активные области АО 10693, 10695 и 10696.

В результате вспышки и эруптивного события 3 ноября в районе АО 10696 образовалась классическая пара компактных диммингов, соответствующих подножиям эруптивной магнитной петли. Эти димминги видны с большим контрастом в каналах 175 и 195 Å и значительно слабее – в канале 304 Å, что может быть связано с задержкой развития димминга в переходном слое [Черток и др., 2004].

6 ноября регистрировалось несколько диммингов. Во всех каналах наблюдался контрастный компактный димминг на восток от АО 10696 и узкий димминг в северозападном направлении. В корональных каналах 175 и 195 Å наблюдался также протяженный димминг в юго-западном направлении в сторону области АО 10695. В канале переходного слоя 304 Å этот димминг не просматривается. Возможно, он образовался на месте ранее существовавшей высокой трансэкваториальной

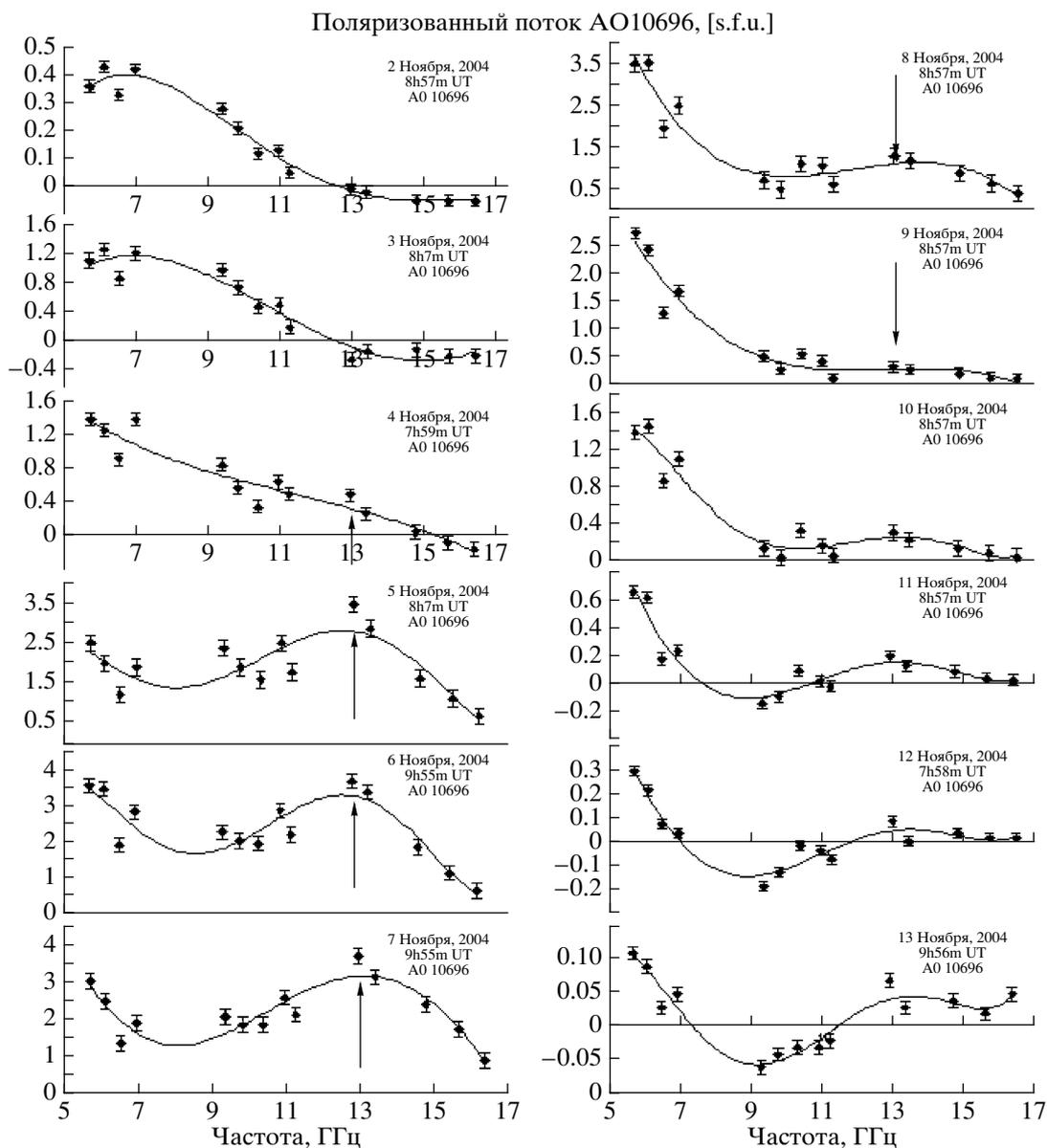


Рис. 8. Динамика спектра полного потока поляризованного излучения АО 10696 с 2 ноября по 11 ноября по данным на РАТАН-600. 4–7 ноября заметен рост спектра на высоких частотах 11–16 ГГц (показан стрелкой вверх). 8 и 9 ноября отмечено резкое уменьшение потока излучения (стрелкой вниз), которое связано с эффектом потемнения (см. также рис.10).

петли с температурой порядка 1–2 МК, не видимой в канале 304 Å.

Эруптивные явления 7 ноября привели к образованию нескольких крупномасштабных диммингов вблизи АО 10696, 10695 и 10693, что свидетельствует о тесной связи магнитных структур этих областей. Кроме компактных диммингов вблизи всех трех АО 10696, 10695 и 10693 образовался диффузный протяженный димминг на север от АО 10696 на месте ранее просматривавшейся в исходных изображениях области уярчения на границе с низкоширотной корональной дырой.

8 ноября картина диммингов в целом повторила наблюдавшуюся днем ранее, однако кроме компактных диммингов вблизи всех трех АО в корональных линиях возник протяженный димминг между АО 10696 и 10695, подобный такому же диммингу от 6 ноября. Это свидетельствует о том, что трансэкваториальная петля масштаба $R/2 \sim 300$ тыс. км восстановилась за двое суток. Кроме диммингов, в разностных изображениях обращает на себя внимание восстановление яркости в области диффузного димминга в северном направлении от АО 10696 и появление высокой арочной системы в районе АО 10693, уходящей за

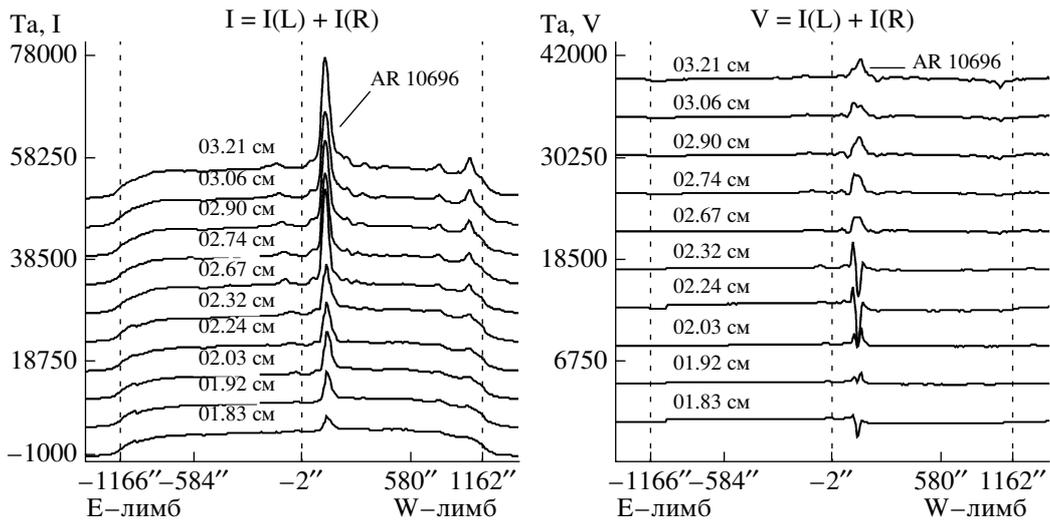


Рис. 9. Сканы радиоизлучения в интенсивности (слева) и круговой поляризации (справа) для 7 ноября 2004 г. в 07:58 UT по данным РАТАН-600. В каналах круговой поляризации отмечаются резкие изменения и инверсии.

лимб, однако связь этих событий с произошедшими в этот промежуток времени вспышками и выбросами корональных масс неочевидна.

Подробный анализ крупномасштабной солнечной активности, связанной с рассматриваемой серией вспышек и ВКМ, по данным УФ телескопа SOHO/EIT представлен также в работе [Черток, 2005] (см. также разнообразные гелиограммы и фильмы на сайте http://helios.izmiran.troitsk.ru/lars/Chertoky04_11/index.html).

2.2.2. Спектр области вспышки 8 ноября 2004 г. в участке 285–335 Å

На рис. 6а приведена спектрогелиограмма Солнца, полученная спектрогелиографом комплекса СПИРИТ в участке 285–335 Å в 15:49:28 UT при экспозиции 150 с, то есть практически в максимуме рентгеновской вспышки по данным ИСЗ GOES. Изображения Солнца в отдельных спектральных линиях имеют вид эллипсоидов, сжатых в направлении дисперсии [Бейгман и др., 2005]. Линейный скан спектрогелиограммы вдоль направления дисперсии дает свертку спектральных линий с распределением яркости вдоль данного сечения диска. Скан 1 на спектрогелиограмме пересекает область вспышки, а скан 2, для сравнения, смещен так, что проходит через область димминга и спокойные участки на диске. Ориентация сканов по отношению к диску показана на рис. 6б, а полученные спектры и их расшифровка – на рис. 6в. Наиболее яркие линии ионов, выделенные в спектрах, приведены в табл. 3 [Бейгман и др., 2005].

В спектре 1, полученном в скане 1, отчетливо выделяются горячие линии вспышечной области

с температурой возбуждения $\log_{10}(T) > 6.4$ (Ca XVIII, Ni XVIII, Fe XVII), которые практически отсутствуют в спектре 2. Остальные линии с температурой возбуждения $\log_{10}(T) = 5.9–6.2$ видны в обоих спектрах, однако их максимальная яркость в районе вспышки превосходит яркость на спокойных участках примерно в 2–3 раза. Таким образом, можно утверждать, что в области вспышки в момент получения спектрогелиограммы температура составляла не менее 10 МК, а мера эмиссии в области температур 0.8–1.5 МК была в 2–3 раза

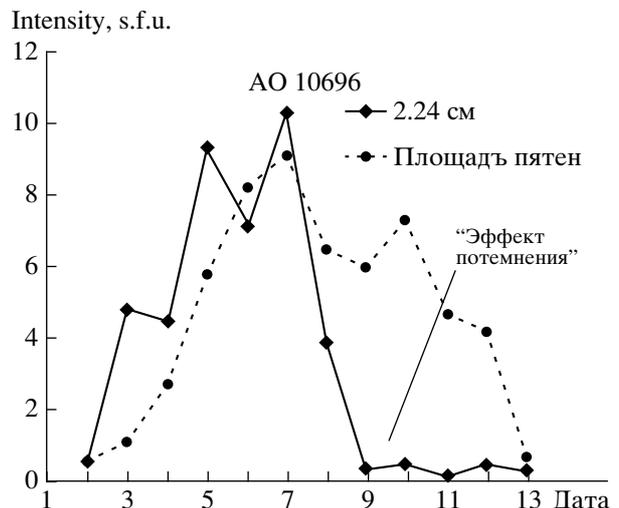


Рис. 10. Проявление эффекта потемнения в активной области AO 10696 перед вспышкой M 2.5 10 ноября 2004 г. Пунктиром показано изменение площади пятен в группе пятен на уровне фотосферы. Сплошной линией полный поток в интенсивности излучения AO 10696 на волне 2.24 см.

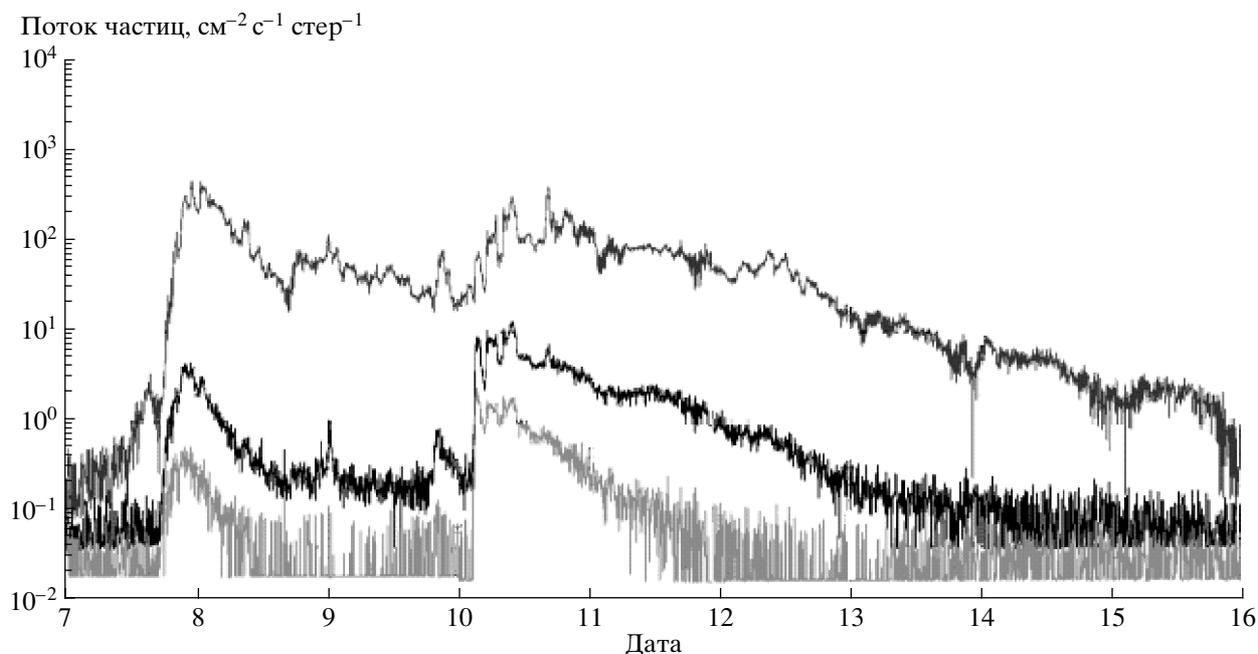


Рис. 11. Потоки протонов с энергией >100 , >50 , >10 МэВ (кривые снизу вверх) по наблюдениям на ИСЗ GOES-11 в период 7–15 ноября 2004 г.

выше, чем в окружающих областях. Методика определения дифференциальной меры эмиссии по данным XUV спектрогелиометра СПИРИТ подробно описана в статье [Kuzin et al., 2005].

Отметим, что в спектре 2 на некоторых линиях с температурой возбуждения порядка 1 МК (SiIX 296 Å, SiVIII 315 Å и др.) видны небольшие провалы, которые могут быть связаны с пониженной мерой эмиссии в области димминга. Точные количественные оценки требуют статистической обработки сигнала.

2.3. Динамика солнечной активности по данным наблюдений РАТ АН-600

2–11 ноября 2004 г. на радиотелескопе РАТАН-600 ежедневно проводились наблюдения в интервале 07:00 UT–11:00 UT в диапазоне волн 1.83–15 см. Весь этот период определялся активностью вспышечно-продуктивной активной области (ВПАО) АО 10696, которая произвела 2 вспышки уровня X в рентгеновском диапазоне. В радио диапазоне ее излучение было относительно стабильным. С 2 по 7 ноября существовала нарастающая активность на уровне нескольких вспышек класса M, которая завершилась 7 ноября генерацией вспышки уровня X 2.0 в 15:40 UT. Второй период активности завершился 10 ноября генерацией вспышки уровня X 2.5 в 02:04 UT.

В линии H_{α} пятенная структура области была сложной, а магнитная структура (рис. 7) несмотря на сложность, менялась монотонно в течение все-

го времени нахождения на диске. Активность первого периода вызвала большую геомагнитную активность на Земле в течение времени с 8 по 11 ноября, причем спад активности, как по Kp , так и по Dst индексам 9 ноября связан с интервалом между вспышками 6 ноября M9.3 и M5.9 в 00:11 и 00:43 UT соответственно и вспышкой X2.0 в 15:40 UT 7 ноября. Вспышка X 2.5, произошедшая 10 ноября в 01:59 UT, проявилась в незначительном увеличении геомагнитной активности 13 ноября.

Как было недавно показано [Bogod, Tokhchukova, 2003 и Bogod, et al. 2003], проявления предвспышечной плазмы в спектре микроволнового радиоизлучения ВПАО многообразны. Особенно явно наблюдаются различные эффекты в спектре потока поляризованного излучения. В данной ВПАО 10696, несмотря на ее стабильность, эти эффекты также проявились заблаговременно и четко за трое суток до мощной вспышки. На рис. 8 представлены спектры поляризованного потока этой области за период со 2 по 11 ноября 2004 г. Видно, что, начиная с 4 ноября поляризованный поток начал увеличиваться в коротковолновой части сантиметрового диапазона (стрелка дана на частоте 13 ГГц). Как известно, это связывается с выходом нового магнитного потока в активную область, что обычно приводит к генерации мощных вспышек. Рост поляризованного потока на этих частотах продолжался вплоть до мощной вспышки X 2.0, происшедшей 7 ноября в 15:40 UT, и который начал спадать после этого события.

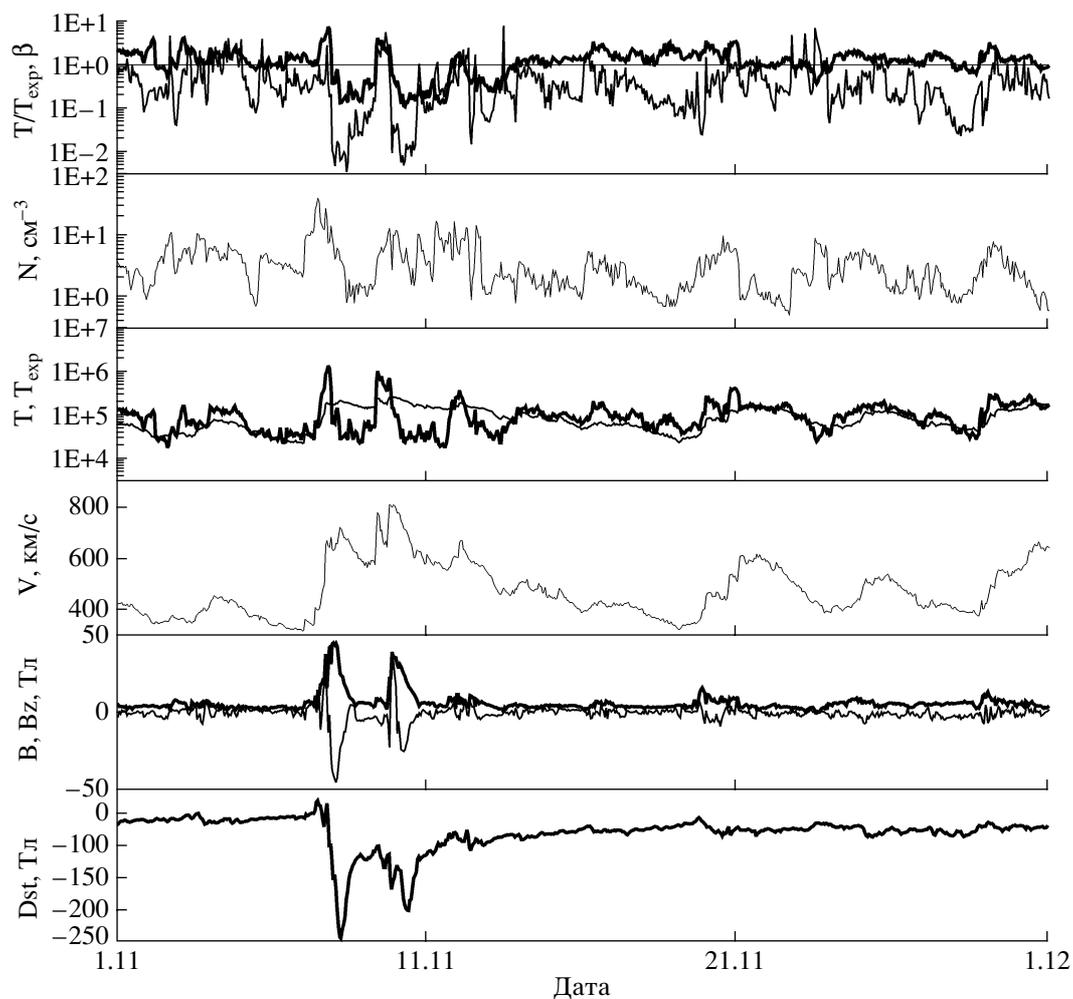


Рис. 12. Параметры межпланетной среды по измерениям в ноябре 2003 г. на КА, дополняющие геомагнитные индексы и рентгеновские измерения на рис. 1.

Панель 1: параметр β (отношение теплового и магнитного давлений – тонкая линия) и отношение температуры протонов к их температуре, вычисленной из средней зависимости температуры от скорости, T/T_{exp} (жирная линия).

Панель 2: плотность N .

Панель 3: температуры протонов T (жирная линия) и T_{exp} (тонкая линия).

Панель 4: скорость солнечного ветра V .

Панель 5: модуль B (жирная линия) и B_z -компонента (тонкая линия) ММП.

В наблюдениях 7 ноября были отмечены резкие смены знака круговой поляризации по спектру микроволнового излучения (см. рис. 9) за несколько часов перед вспышкой X 2.0. Эти изменения указывают на возникновение процессов первичного энерговыделения, происходящих в ВПАО непосредственно перед мощной вспышкой.

Во втором периоде активности, сценарий подготовки вспышки был иным. Резкое уменьшение потока излучения 8 и 9 ноября, приведенное на рис. 8, по-видимому, связано с возникновением эффекта “потемнения”. На рис. 10 показано изменение полного потока интенсивности радиоизлучения на волне 2.24 см за весь период наблюдений с 1 по 13 ноября 2004 г., которое сопоставле-

но с площадью, занимаемой пятнами данной активной области. Видно, что после 7 ноября поток радиоизлучения стал падать значительно резче, чем суммарная площадь пятен.

Подобные эффекты “потемнения” исследовались ранее в [Tokhchukova and Bogod, 2003] при изучении мощной вспышки “Бастилия”, происшедшей 14 июля 2000 г. Природа этого эффекта еще до конца не установлена и, возможно, связана с прохождением радиоизлучения через плотную вышележащую плазму [Злотник, 2001]. Приведенные данные по эффекту “потемнения” и модельные расчеты указывают на вероятное возникновение горячих плазменных прослоек на пути проходящего излучения. Такими прослойками могут

Таблица 4. Связь солнечных явлений с межпланетными ударными волнами

| N | ВКМ | | | | ВСПЫШКА | | | | Дата, t , UT 2004 г. | Дата, t_p , UT 2004 г. | V_{\max} км/с | V_p км/с | Коммента- рии |
|----|-----------------------------|-----------|---------------------------------|--------------|--------------------|------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------|--|
| | Дата, t_c , UT 2004 г. | d° | Лимб, Λ_0 , град. | V_k , км/с | 195A t_b , UT | 195A 1-8A Пик | 195A Координаты | H -альфа Балл Вспышки | | | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1a | 03.11 03:54 | 90 | E, N30 | 800 | 03.11 03:36 | M1.5 | E45 N03 | 1N | – | 05.11 23:00 | – | 400 | $d/2 \leq L$ Импульсное |
| 1 | 03.11 15:54 | 110 | E, N32 | 800 | 03.11 15:24 | M4.7 | E37 N04 | SN | 07.11 02:57 | 06.11 13:24 | 365 | 400 | $d/2 > L$ Импульсное |
| 2 | 04.11 09:54 | – | – | 550 | 04.11 09:00 | C6.0 | E27 N03 | SF | 07.11 10:52 | 07.11 13:00 | 420 | 550 | ВКМ-полу Постепенно |
| 3 | 05.11 00:30 | – | E N00 N70 | 720–1100 | 04.11 21:42 | M5.5 | E18 N05 | 1N | 07.11 18:00 | 07.11 02:00– 08.11 00:03 | 570 | 360–550 | ВКМ-гало Импульсное |
| 4 | 06.11 01:31 | – | – | 650 | 06.11 00:00 | M9.3 | E04 N04 | 2N | 09.11 09:00 | 09.11 08:00 | 800 | 650 | ВКМ-гало Постепенно |
| 5 | 07.11 13:31 | – | – | 1800 | 07.11 15:10 | X2.0 | W13 N03 | – | 09.11 18:12 | 09.11 23:00 | 800 | 900 | ВКМ-гало Импульсное |
| 6 | 08.11 04:06 | – | – | 580 | 08.11 03:00 | C8.0 | W28 N03 | SF | 11.11 16:40 | 11.11 17:00 | 590 | 580 | ВКМ-гало Импульсное |
| 7 | 09.11 17:26 | – | – | 550 | 09.11 17:00 | M8.0 | W45 N05 | 2N | – | 13.11 09:00 | – | 560 | ВКМ-гало $d/2 \leq L$ Постепенно |

Примечание. Столбик 1 – момент времени первого появления ВКМ в поле зрения LASCO C2; столбик 2 – угловой размер ВКМ; столбик 3 – лимб наблюдения и видимая широта места возникновения ВКМ; столбик 4 – максимальная скорость ВКМ в плоскости неба; столбик 5 – время начала вспышки в рентгене; столбик 6 – рентгеновский балл вспышки; столбик 7 – балл вспышки в линии $H\alpha$; столбик 8 – координаты вспышки в линии 195А; столбик 9 – наблюдаемое время прихода фронта спорадического потока (или ударной волны) на орбиту Земли; столбик 10 – расчетное время прихода фронта спорадического потока (или ударной волны) на орбиту Земли; столбик 11 – наблюдаемая максимальная скорость непосредственно за ударным фронтом; столбик 12 – расчетная максимальная скорость непосредственно за ударным фронтом; столбик 13 – комментарии о ВКМ.

быть протуберанцы и волокна, которые формируют выбросы корональных масс.

3. НАБЛЮДЕНИЯ ГЕЛИОСФЕРЫ

3.1. Параметры и явления в солнечном ветре

В отличие от прошлогодней ситуации, когда большие потоки энергичных частиц 28–30 октября и 3 ноября 2003 года привели к серьезным нарушениям в работе приборов, измеряющих параметры межпланетной среды на космических аппаратах (см. например, [Веселовский и др., 2004; Ермолаев и др., 2005]), возрастания потоков энергичных частиц, наблюдавшиеся в конце 7 ноября и в начале 10 ноября 2004 года, не были столь же драматичными (см. рис. 11), и были получены полные наборы данных о солнечном ветре и межпланетном магнитном поле, представленные на рис. 12. Рисунок наглядно демонстрирует, что все

плазменные параметры (скорость V , температура T и концентрация N) в ноябре не отличались экстремальными значениями, в то же время величина B и B_z -компонента ММП достигали 8 ноября крайне высоких значений >45 и -45 нТ, соответственно, что и привело к генерации сильнейшей магнитной бури.

Анализ рис. 12 позволяет сделать предварительный вывод, что изучаемый интервал времени характеризовался сильно возмущенными условиями в солнечном ветре. Так за период 7–11 ноября наблюдалось 6 межпланетных ударных волн (см. табл. 4) и несколько магнитных облаков (межпланетных выбросов корональной массы – ICME, Ejecta). Начало первого магнитного облака было зарегистрировано в 23 UT 7 ноября, что видно, на пример, по провалу параметров β и T/T_{exp} . Перед ним наблюдались межпланетная ударная волна в 18 UT и область сжатия (Shear), характеризующаяся воз-

растанием температуры, концентрации и модуля магнитного поля, при этом отрицательная B_z -компонента появилась в 20 часов, т.е. магнитную бурю скорее всего спровоцировало не само облако, а область сжатия перед ним, содержащее большое отрицательное B_z . Так как южная компонента ММП сохранилась и в начале облака, то минимум Dst был достигнут в 06 UT 8 ноября. Продолжительность этого облака оказалась небольшой, так как его догнало другое облако или даже 2 облака: ударные волны в 9 и 17 (между ними идентификация типов течений солнечного ветра достаточно сложна и неоднозначна) и передний край облака в 21 UT 9 ноября, а начало возрастания южной компоненты поля в 01 UT 10 ноября, и в этом случае вторая магнитная буря была вызвана вариациями поля в самом магнитном облаке.

С целью определения связи межпланетных явлений с их источниками на Солнце нами был выполнен предварительный анализ, при котором мы использовали наблюдения ВКМ с помощью коронографа LASCO на КА SOHO для определения их скорости в поле зрения прибора. Для импульсных ВКМ, скорость V_k которых в плоскости лимба превышала 750 км/с, использовались следующие формулы для определения V_{max} – максимальной скорости спорадического потока непосредственно за ударным фронтом на орбите Земли и времени Δt движения ударной волны на участке Солнце–Земля [Еселевич и Еселевич, 2004]:

$$V_{max} \approx V_k/2 \quad (1)$$

$$\Delta t \approx 287R_{\odot}/V_k \approx 5.6 \times 10^4/V_k(\text{км/с}) \text{ [часы]}. \quad (2)$$

Для постепенных ВКМ, скорость которых постепенно нарастает при удалении от Солнца до значений $V_k \approx (400\text{--}750)$ км/с на $R \approx 30 R_{\odot}$ [Cane et al., 1986] и затем вплоть до орбиты Земли остается примерно постоянной, имеем [Sheeley et al., 1985a]:

$$V_k(R \approx 30R_{\odot}) \approx V_T \approx V_{max}. \quad (3)$$

Оценки транспортного времени Δt по формулам аналогичных работ (например, [Cane and Richardson, 2003; Dal Lago et al., 2004]) отличаются от приведенных в пределах $\pm 15\%$, что находится в пределах точности измерения скорости ВКМ по данным LASCO и точности аппроксимирующих кривых. Также принималось во внимание, что ВКМ, у которых скорость $V_k < 400$ км/с, ударной волны не возбуждают [Sheeley et al., 1985b].

На орбите Земли на интервале с 7 по 11 ноября 2004 г. зарегистрировано шесть ударных волн, обозначенных на Рис. 14 как S1, S2, S3, S4, S5, S6. Для пяти из них, кроме S5, на Земле наблюдались внезапные начала (SSC). На интервале с 3 по 8 ноября зарегистрировано восемь ВКМ (1a, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7), для которых на диске Солнца есть всплески рентгеновского излучения (обозначены, соответственно, цифрами 1a, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 на рис. 13)



Рис. 13. Рентгеновское излучение (1–8 Å) Солнца (GOES-12) с 3 по 9 ноября 2004 г. и номера вспышек, отождествленных с межпланетными ударными волнами на КА ACE (см. рис. 16)

и всплески ультрафиолетового излучения. Моменты времени t_B начала этих всплесков, рентгеновский балл X всплесков и координаты УФ всплесков показаны в табл. 4. Из 7 ВКМ три были постепенные, остальные – импульсные (столбец 13 таблицы). Номера связанных друг с другом всплесков, ВКМ и ударных волн S обозначены одинаковыми номерами 1, 2, 3, 4, 5, 6. Для ВКМ 1a, 7 ударных волн не было (см. ниже). Нахождение соответствия между ВКМ и ударными волнами на орбите Земли производилось с использованием формул (1)–(3) по измеренным величинам t_B и V_k . Для ударных волн 1, 2, 4, 5, 6 рассчитанное время t_p прибытия ударного фронта на орбиту Земли согласуется с наблюдаемым временем t с точностью не хуже, чем ± 12 часов (столбцы 9 и 10 таблицы), рассчитанная V_p и наблюдаемая V_{max} – с точностью не хуже, чем ± 130 км/с (столбцы 11 и 12 таблицы). Для гало ВКМ 3 указаны два значения V_k для двух различных направлений L_0 (столбец 4 таблицы). По ним рассчитаны минимальное и максимальное значения t_p (столбец 10). Наблюдаемое значение t (столбец 9) находится между этими значениями. Два ВКМ (1a и 7) не дали на орбите Земли ударных волн потому, что их полуширина была меньше длины их источника ($d/2 < |L|$), поэтому фронты связанных с ними ударных волн, по всей видимости, прошли мимо Земли.

Как известно, главным параметром межпланетной среды, ответственным за величину Dst , является значение минимальной южной $B_{z_{min}}$ компоненты межпланетного магнитного поля (см. например, [Akasofu et al., 1985;]). При этом важно отметить, что формула связи $\min Dst$ и $B_{z_{min}}$ зависит от того, является ли рассматриваемый поток изолированным или неизолированным. Неизолированным нужно рассматривать спорадический поток, которому предшествует на интервале времени менее 40 часов другой спорадический поток [Eselevich and Fainshtein, 1993]. Для изолированного спорадического течения солнечного ветра зна-

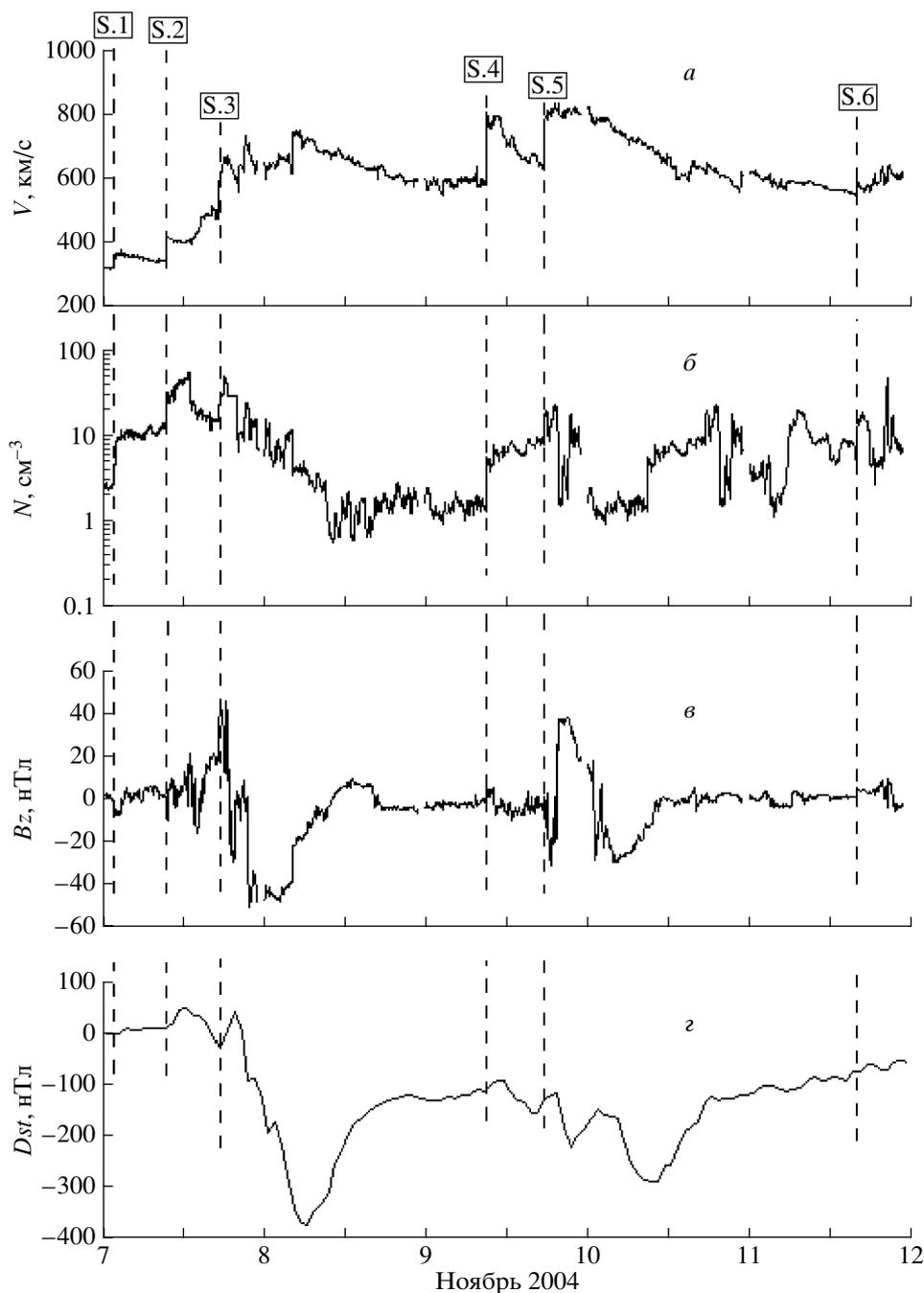


Рис. 14. Некоторые общие данные по солнечному ветру на 1 AE (ACE) и магнитосферной возмущенности за рассматриваемый период 7–11 ноября 2004 года: а) Скорость, б) Концентрация, в) B_z – компонента ММП; г) Dst индекс геомагнитной активности.

чения $\min Dst$ и $B_{z_{\min}}$ могут быть оценены из простого соотношения [Akasofu et al., 1985;]:

$$\min Dst \text{ (нТл)} \approx -7.81 |B_{z_{\min}} \text{ (нТл)}| + 10 \text{ (нТл)}. \quad (4)$$

Аналогичные зависимости для магнитных облаков были получены во многих работах (см. например [Wu and Lepping, 2002]). Для неизолированных (следующих друг за другом с малым временным интервалом) потоков эффективность воздействия

на магнитосферу Земли выше почти вдвое [Sheeley et al., 1985b]. Несмотря на то, что в нашем случае все потоки являются неизолированными, наблюдаемые значения $\min Dst \approx -373$ нТл и $\min Dst \approx -289$ нТл для 3 и 5 потоков удовлетворительно согласуются с оценками ≈ -340 нТл и ≈ -210 нТл, полученными по формуле (4) для изолированных потоков, но несколько их выше.

Зависимость $Dst(t)$ во время бурового периода 7–12 ноября носит немонотонный характер с целым рядом дополнительных максимумов и минимумов помимо двух основных минимумов, отвечающих двум крупным магнитным облакам. Четко прослеживается известная закономерность в развитии геомагнитной бури [Akasofu et al., 1985; Gonzalez et al., 1999; Gonzalez et al., 2004]: отрезки времени с отрицательным значением северо-южной составляющей межпланетного поля совпадают с усилением возмущения, а периоды времени с положительным значением этой составляющей – с ослаблением возмущения. Таких участков на временном профиле указанного индекса за рассматриваемый период насчитывается около десятка, и все они отвечают указанному условию “прерывания или приостановки развития геомагнитной бури” [Veselovsky et al., 2005].

Следует отметить, что приведенное выше описание возможных источников возмущений на Солнце следует давно сложившейся традиции и попыткам локализовать или “привязать” причины геомагнитных бурь исключительно к процессам в той или иной активной области. Такой же по сути анализ был выполнен в предварительных сообщениях и описаниях рассматриваемых здесь событий [Zhukov et al., 2004; Yurchyshyn, 2004]. В них также акцентируется внимание на вспышках и других процессах в активной области АО 10696. Такая априорная локализация, разумеется, носит несколько условный характер.

В действительности же нельзя исключить возможность того, что рассматриваемые самые крупные события в гелиосфере были связаны также и с более крупномасштабными структурами и процессами в атмосфере Солнца, носившими, в частности, трансэкваториальный характер, и были порождены именно ими [Веселовский и др., 2005]. Все они полностью обусловлены множественными выбросами коронального вещества с магнитными полями и электрическими токами в них. Эти выбросы хорошо прослеживаются в виде глобальных потемнения на диске и лимбе на разностных картинах, например, полученных 7 ноября в моменты времени 16:46:54–15:46:54 в поле зрения телескопа EIT/SOHO и в последующем развитии гало в поле зрения коронографов LASCO. Они охватывают большие участки на Солнце, включающие в себя несколько активных областей вблизи центрального меридиана и в юго-западной части диска. Не менее наглядным свидетельством этого является исчезновение трансэкваториального петельного протуберанца, что отчетливо прослеживается в последовательных изображениях, полученных в линии H -альфа на солнечной обсерватории Kanzelhöhe. Магнитное поле в короне, вычисленное по магнитограммам Солнца Г.В. Руденко в различных приближениях, также убедительно свидетельствует о существо-

вании крупных динамических петель и нелокальной динамической связи между различными активными областями в данном случае. Присутствие движущихся и быстро выбрасываемых наклонных трансэкваториальных магнитных петель, расположенных первоначально между областями 10696 и 10695 и имеющих первоначальный масштаб порядка радиуса Солнца, прослеживается и в кинофильмах, полученных телескопом EIT/SOHO.

Учитывая результаты прежних работ по исследованию экстремальных событий, наблюдавшихся на Солнце и в гелиосфере в 2003 г., когда эффективный комплекс на Солнце также охватывал по крайней мере три активных области на видимой стороне Солнца, можно более уверенно говорить об асимметрии Солнца (активные долготы) и глобальном характере рассматриваемых возрастных солнечных активности, ответственных за самые сильные и множественные возмущения в гелиосфере. Что же касается трансэкваториального характера выбросов, то это явление можно связать с тем, что активные области в конце солнечного цикла оказываются на низких широтах вблизи экватора.

В заключение этого раздела следует отметить, что уверенные и вполне оправдавшиеся предупреждения о возможности сильных геомагнитных бурь в рассматриваемый промежуток времени были сделаны прогностическими центрами лишь тогда, когда были уже зарегистрированы выбросы типа гало в поле зрения коронографов LASCO/SOHO и определены их параметры, в том числе, и с использованием специализированной весьма перспективной и совершенствующейся автоматизированной системы распознавания (<http://sidc.oma.be/cactus/scan/output/2004/11/latestC-MEs.html>). При появлении же активных областей из-за восточного лимба, то есть за несколько дней до рассматриваемых событий, ничего тревожного на Солнце в этом отношении не предвещалось, и в течение целого солнечного оборота с 3 по 29 ноября ожидалась низкая или умеренная активность. Более подробно об этом прогнозе сказано в сообщении SWO PRF 1522 от 2 ноября (<http://www.sec.noaa.gov/weekly/pdf/prf1522.pdf>).

3.2. Межпланетные мерцания

В обсуждаемый период наблюдения мерцаний проводились на частоте 111 МГц на рабочем макете 16-лучевой диаграммы антенны БСА (Большая Сканируемая Антенна) ФИАН, Пущине. Круглосуточно регистрировалось радиоизлучение в полосе неба 28° – 34° по склонению. Частота съема информации составляла 10 Гц при постоянной времени 075 с. Такие параметры приемной аппаратуры позволяли надежно регистрировать межпланетные мерцания радиоисточников и, наряду с ними, более медленные ионосферные мер-

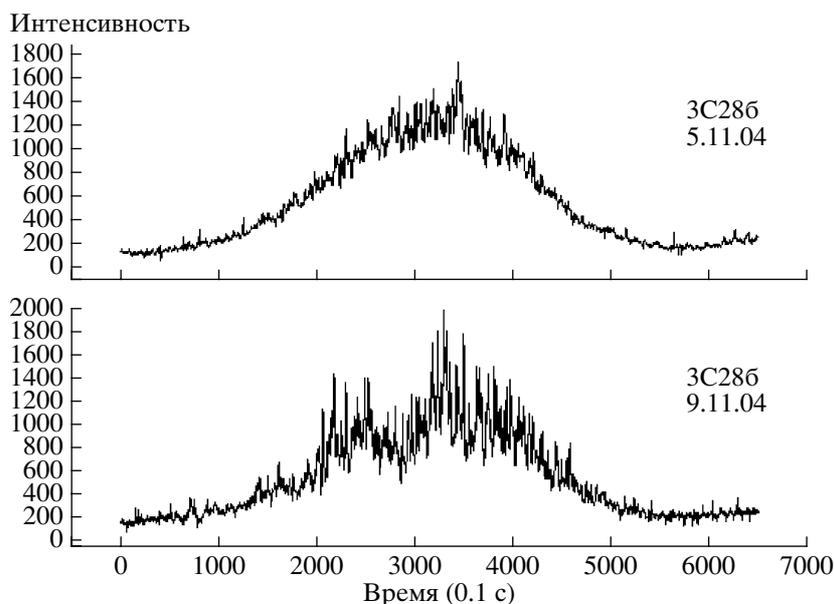


Рис. 15. Пример записей межпланетных мерцаний источника 3C286.

цания. В данное время года имеется возможность наблюдать межпланетные мерцания относительно небольшого числа источников, что связано с малой продолжительностью светового дня, большим уровнем фонового излучения от плоскости Галактики и низким расположением Солнца над горизонтом.

При наблюдениях мерцаний на антенне БСА ФИАН в межпланетной плазме и ионосфере были зафиксированы разнесенные во времени возмущения, которые связаны с активными процессами на Солнце 6–7 ноября 2004 г. По времени запаздывания эти возмущения могут быть отождествлены с двумя наиболее сильными вспышками, проявившимися в рентгеновском излучении как события балла M9.3, 6 ноября в 00:38 UT, и балла X2.0, 7 ноября в 15:40 UT.

Вспышка балла M9.3 привела к значительным повышениям уровня межпланетных и ионосферных мерцаний в вечерние часы 7 ноября и ночные часы 8 ноября. Было зарегистрировано усиление ночных мерцаний радиосточника 3C 48, который наблюдался 7 ноября около 19:30 UT. В это время угол между лучом зрения и направлением на Солнце был более 90° , и источник просвечивал примыкающую к Земле область солнечного ветра. Мерцания были достаточно быстрыми, характерное время около 2 с, что свидетельствует об их связи с неоднородностями солнечного ветра. Значение индекса мерцаний, характеризующего относительный уровень флуктуации интенсивности источника, в несколько раз превышало соответствующую величину для спокойных условий. В периоды, предшествующие 19:30 UT, для близких к 3C 48 компактных радиосточников повышен-

ные межпланетные мерцания не наблюдались. Через достаточно малый промежуток времени, не превышающий 2–3 ч, после 19:30 UT было зарегистрировано значительное усиление ионосферных мерцаний (характерные времена около 10 с), которое было видно практически для всех наблюдавшихся источников, в частности 3C 115, 3C 123, 3C 131 (для первого из них ионосферное происхождение мерцаний следует из медленности флуктуации, а два последних в силу больших угловых размеров на неоднородностях солнечного ветра не мерцают). Уровень ионосферных мерцаний был низким и перед 19:30 UT, о чем свидетельствует, например, запись радиосточника Cas.A около 18:00 UT. Суммируя приведенные данные, можно утверждать, что возмущение от вспышки балла M9.3 пришло к окрестности Земли около 19:30 UT. При этом время запаздывания по отношению к моменту вспышки составило около $t_0 \approx 43$ ч, а средняя скорость распространения от Солнца до Земли была не менее 970 км/с. Близкая оценка следует и из измерений протонного монитора SOHO, согласно которым время запаздывания возмущения примерно 42 ч.

Качественно аналогичные возмущения, связанные со вспышкой X2.0, наблюдались нами 9 ноября 2004 г., но, в отличие от вспышки M9.3, в силу специфики эксперимента нам не удалось достаточно точно определить время прихода возмущения в просвечиваемую область межпланетной среды. Повышенный уровень межпланетных мерцаний регистрировался вблизи 07 UT для радиосточников 3C 286, 3C 293, 4C+32.44, зондировавших межпланетную плазму на гелиоцентрическом расстоянии около 0.8 а.е. На рис. 15 приведен пример запи-

сей межпланетных мерцаний источника ЗС 286. Видно, что уровень мерцаний для возмущенного периода 9 ноября существенно выше, чем для спокойного периода 5 ноября. Усиление мерцаний 9 ноября было достаточно длительным и продолжалось по крайней мере до 11 UT, что фиксировалась по мерцаниям наблюдавшегося в это время источника ЗС 357 (зондируемая область на расстоянии 0.85 а.е. от Солнца). Из приведенных данных следует, что время распространения возмущения t_0 от Солнца до 0.8 а.е. было менее 39.5 ч, а средняя скорость превышала 850 км/с. В вечерние часы 9 ноября и в ночные часы 9/10 ноября наблюдались повышенные ионосферные мерцания. 10 ноября возмущенное состояние ионосферы еще сохранялось. Следует отметить, что 6–7 ноября радиоизлучение Солнца на частоте 111 МГц было повышенным, но не было столь мощным и продолжительным, как, например, во время событий конца октября–начала ноября 2003 г.

Полученные оценки времени распространения ударных волн от моментов вспышек до просвечиваемой области среды, с одной стороны, находят в хорошем соответствии с оценками времени распространения соответствующих ВКМ (табл. 4), а с другой стороны позволяют оценить начальные скорости ударных волн, генерируемых этими ВКМ. Зависимость скорости волны V от гелиоцентрического расстояния r может быть описана степенной функцией

$$V(r) = V_0(r/r_0)^{-n}, \quad (5)$$

где для r_0 может быть принято значение $r_0 \approx 0.2$ а.е., а величина показателя степени n изменяется в пределах $1/2 \leq n \leq 1$ [Parker, 1961; Dryer, 1984; Власов, 1988; Чашей и Шишов, 1995]. Вычисления показывают, что модельная максимальная скорость распространения для обеих ударных волн составила от 1000 (при $n = 1/2$) до 2000 км/с (при $n = 1$), т.е. начальные скорости ударных волн по модели оказываются немного выше измеренных с помощью коронографа LASCO на КА SOHO скоростей соответствующих ВКМ, при этом для вспышки 6 ноября лучшее соответствие достигается при $n = 1/2$, а для вспышки 7 ноября при $n = 1$ (табл. 4).

3.3. Солнечные космические лучи

Солнечные космические лучи (СКЛ), генерированные солнечными вспышками конца октября–начала ноября 2004 года, были зарегистрированы в околоземном космическом пространстве аппаратурой, установленной на ИСЗ “КОРОНАС-Ф”. “КОРОНАС-Ф” – российская космическая солнечная обсерватория, предназначенная для исследования нестационарных процессов на Солнце и их воздействия на межпланетную среду и магнитосферу Земли, второй ИСЗ серии КОРОНАС, представляет собой низковысотный искусствен-

ный спутник Земли (ИСЗ), начальная высота орбиты $h_{\text{орбиты}} \approx 500$ км (в период ноября 2004 года высота орбиты составляла примерно 400 км) наклонение $i = 82.5^\circ$, период обращения вокруг Земли $T_{\text{обр}} = 94.5$ мин [Кузнецов и др., 1995; Kuznetsov et al., 2002]. Результаты по регистрации излучения солнечных вспышек, полученные в течение периода высокой вспышечной активности в октябре–ноябре 2003 года подробно представлены в работах [Панасюк и др., 2004; Ермолаев и др., 2005].

Двигаясь по своей траектории, “КОРОНАС-Ф” проходит полярные шапки, силовые линии которых уходят в хвост магнитосферы и практически открыты для вхождения СКЛ, поэтому значительных отличий полученного временного хода СКЛ в полярных шапках и в солнечном ветре не наблюдается, в том числе и в зависимости от временного хода ММП.

На рис. 16 приведены временные зависимости потоков протонов и электронов солнечного происхождения в нескольких энергетических каналах детектора МКЛ [Kuznetsov et al., 2002], измеренных в северной и южной полярных шапках в исследуемый период. На данных рисунках хорошо видны три возрастания СКЛ с максимумами 30 октября, 1 ноября и 7 ноября. К сожалению, в данных прибора МКЛ имеется значительный перерыв в данных с 10 по 15 ноября из-за отсутствия телеметрии, но даже имеющийся данные представляют определенный интерес с точки зрения исследования динамики потоков СКЛ. Рассмотрим подробнее каждое из них.

По данным спутника GOES [<http://www.sec.noaa.gov/ftpd/indices/SPE.txt>] событие СКЛ 7 ноября было вызвано вспышкой класса X2, произошедшей на Солнце 7 ноября около 16 ч в активной области АО 10696, имевшей на тот момент координаты N09W17. Из рисунков видно, что за рассматриваемый период эта вспышка дала наибольшее по интенсивности возрастание СКЛ, с достаточно жестким спектром. Однако следует отметить, что интенсивность протонов СКЛ в нем примерно на полтора порядка меньше интенсивности СКЛ, наблюдавшейся после вспышек в октябре–ноябре 2003 года в интервале энергий 1–5 МэВ, и на два порядка для энергий 50–90 МэВ. Что касается электронов СКЛ, то максимальные интенсивности потоков в канале электронов СКЛ более чем на два порядка, а в канале 1.5–3 МэВ – на три порядка [Панасюк и др., 2004]. Следует также отметить, что значимых потоков электронов с энергиями выше 6 МэВ в рассматриваемый период 2004 года в эксперименте на ИСЗ “КОРОНАС-Ф” не наблюдалось.

Из рис. 16 также видно, что значительное (на порядок) возрастание потоков протонов в интер-

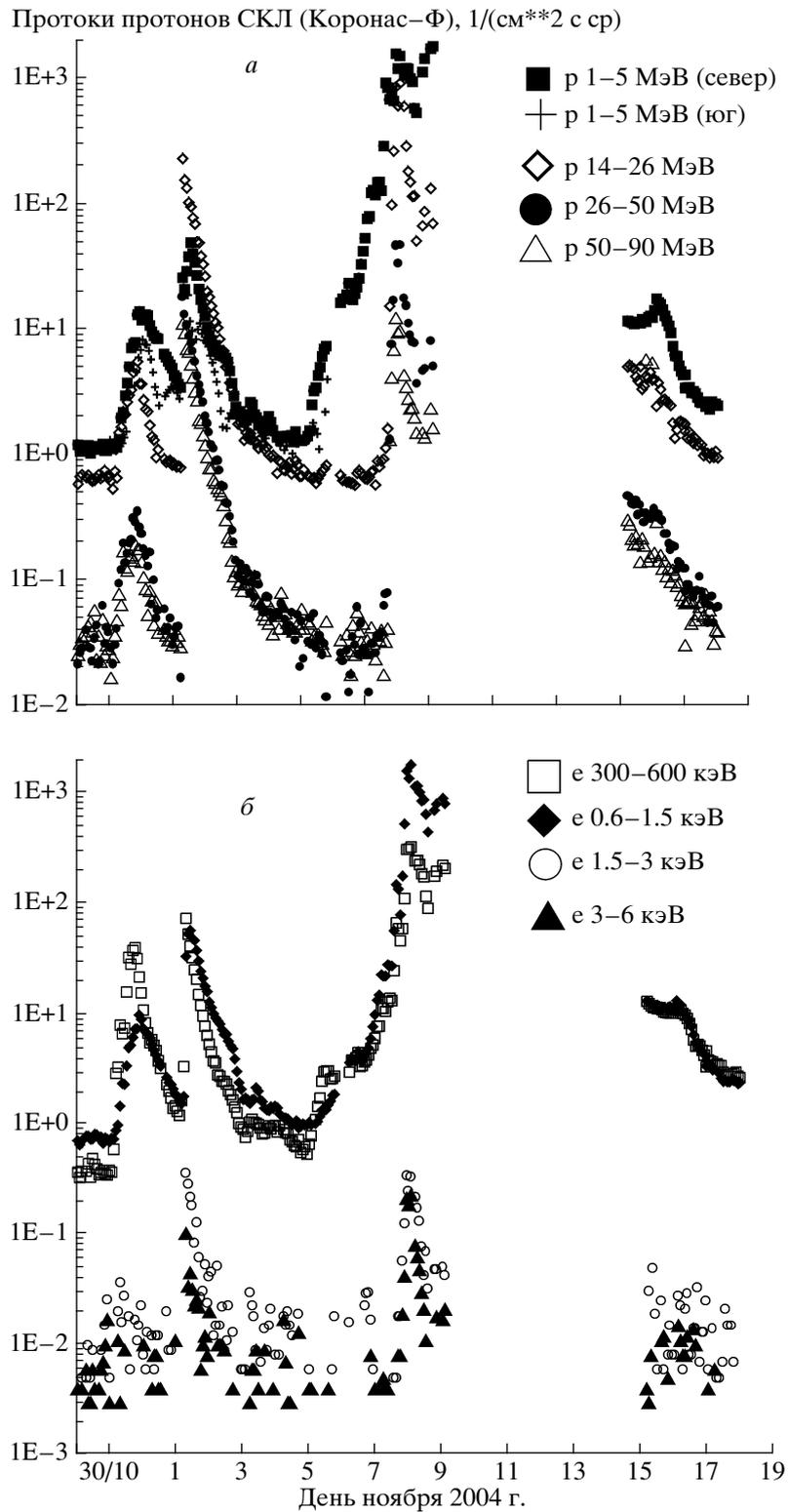


Рис. 16. Потоки протонов в обеих полярных шапках (*a*) и электронов в северной полярной шапке (*b*) с 29 октября по 18 ноября 2004 г по данным на ИСЗ “КОРОНАС-Ф”.

вале 1–5 МэВ было зарегистрировано на “КОРОНАС-Ф” еще 5–6 ноября, и, следовательно было вызвано вспышкой, произошедшей ранее 7 нояб-

ря. Из рис. 16*a* также видно, что возрастание потоков протонов с энергиями 14–26 МэВ и выше начало регистрироваться только 7 ноября после

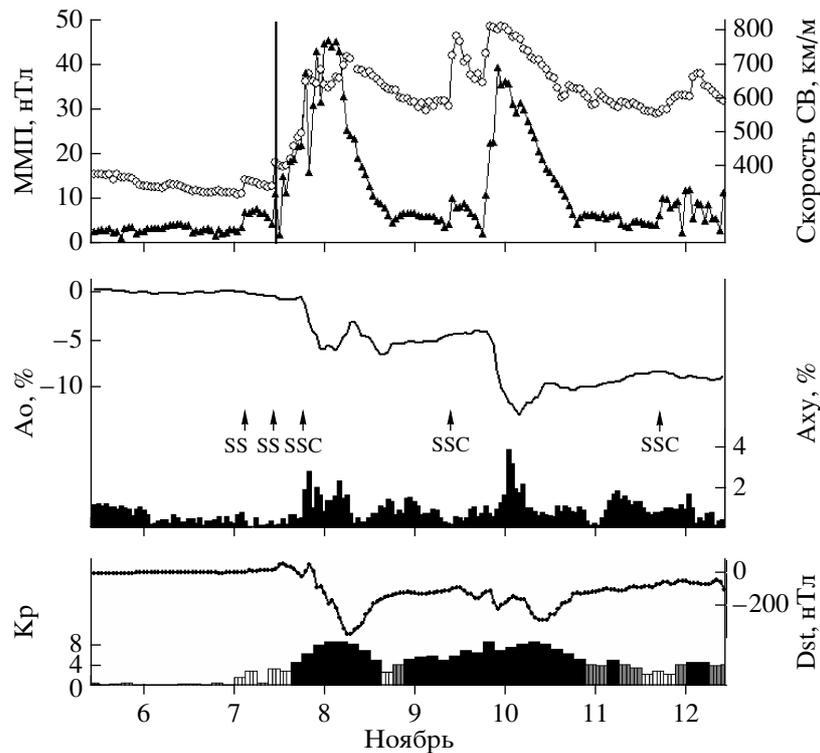


Рис. 17. Вариации параметров межпланетной среды, космических лучей и геомагнитной активности в возмущенный период ноября 2004 г.: АО-плотность КЛ, Аху-эклиптическая составляющая первой гармоники анизотропии КЛ с жесткостью 10 ГВ; K_p и Dst -индексы геомагнитной активности.

вспышки X2. Мы предполагаем, что данное возрастание СКЛ малых энергий может быть связано со вспышкой класса M9.3, произошедшей вблизи полуночи с 4 на 5 ноября в той же самой АО 10696 (N09E05). Как видно из рис. 16б, значимые потоки электронов с энергиями выше 3 МэВ появились тогда же, когда и протоны с энергиями выше 14 МэВ, а в предыдущие два дня наблюдалось небольшое (в 3–4 раза) возрастание потоков электронов в каналах 300–600 и 600–1500 кэВ, связанное, вероятно, с уже упоминавшейся более ранней вспышкой.

Возрастание потоков СКЛ, наблюдавшееся 1 ноября приписывается заливочной вспышке [http://www.sec.noaa.gov/ftpd/indices/SPE.txt]. Как видно из рис. 16а, данное событие СКЛ, имело очень жесткий спектр протонов: зарегистрированные во время него потоки протонов с энергиями 1–5 МэВ примерно на порядок-полтора меньше, чем в последующем событии, а поток протонов 26–50 и 50–90 МэВ почти одинаков, как и поток электронов с энергиями 1.5–3 МэВ, тогда как поток электронов 3–6 МэВ 1 ноября в 2–3 раза меньше, чем в последующем событии.

Небольшое возрастание СКЛ, зарегистрированное прибором 30 октября (начало около 05 UT), по нашему мнению связано со вспышкой M3.3, начавшейся 30 октября в АО 10691 (N13W20).

На рис. 16а видно, что во время данного события величины потоков протонов с энергией 1–5 МэВ северной (закрытые квадраты) и южной (кресты) полярных областях различны, что связано, как мы предполагаем, с асимметрией в заполнении северной и южной полярных шапок, что требует специального рассмотрения. Спектр электронов в данном возрастании значительно более мягкий – поток частиц с энергией 300–600 кэВ почти на порядок превышает поток электронов с энергией 600–1500 кэВ, тогда как в событии 1 ноября потоки практически одинаковы.

3.4. Галактические космические лучи

Форбуш-эффект 29 октября и геомагнитный эффект 20 ноября 2003 г. явились самыми большими не только для текущего 23-его цикла, но и для всей истории наземных наблюдений космических лучей [Веселовский и др., 2004; Панасюк и др., 2004; Белов и др., 2005а, б; Ермолаев и др., 2005]. В приближении к минимуму цикла Солнце должно было снизить свою активность, поэтому оказались достаточно неожиданными новые мощные всплески активности спустя год (в ноябре 2004 г., а также и в январе 2005 г.).

Всплеск активности в ноябре 2004 года вновь привел к значительным спорадическим вариаци-

Таблица 5. Некоторые параметры во время Форбуш-понижений 07–11 ноября 2004 года

| ФП | День | Часы (SSC) | Макс. А0 | Макс. Аху (экв.комп.) | Скорость СВ (V, км/с) | ММП (B, нТл) | VB | A _{ФЭ} | Kp | Dst-индекс, нТл |
|----|-------|------------|----------|-----------------------|-----------------------|--------------|-------|-----------------|----|-----------------|
| 1 | 07.11 | 02:57 | 0.6% | 0.86% | 366 | 7.2 | 1.32 | 0.5% | 3 | -5 |
| 2 | 07.11 | 10:52 | 0.4% | 0.74% | 414 | 11.3 | 2.34 | 0.7% | 5- | 10 |
| 3 | 07.11 | 18:27 | 7.3% | 2.91% | 726 | 45.7 | 16.58 | 7.5% | 9- | -373 |
| 4 | 09.11 | 09:30 | 8.1% | 3.98% | 813 | 39.7 | 16.13 | 7.3% | 9- | -289 |
| 5 | 11.11 | 17:10 | 1.1% | 1.93% | 673 | 12.2 | 4.11 | 1.5% | 5 | -113 |

ям космических лучей, хотя и меньшим по амплитуде по сравнению с событиями в 2003 г. или в марте–апреле 2001 г. На рис. 17 представлены некоторые характеристики межпланетной среды, а также поведение КЛ и геомагнитной активности в период с 6 по 12 ноября 2004 г. По данным NOAA (<ftp://ares.ml.navy.mil/pub/lasco/halo>) в это время выбросы солнечного вещества (ВКМ) с частичным или полным гало происходили почти ежедневно, в основном из области АО 10696, так что в межпланетном пространстве постоянно присутствовали 2–3 возмущения, как правило, создававшие ударные волны. Как видно из рис. 12, 14 и 17, в течение 5 дней к Земле пришло несколько ударных волн (зарегистрировано 5 SSC – средняя панель рис. 17). Последовавшие за ними возмущения сопровождалось резким повышением скорости солнечного ветра (до 700–800 км/с), усилением межпланетного магнитного поля (ММП) до 40–45 нТл и привели к значительным вариациям геомагнитной активности: Dst-индекс опускался до -373 и -289 нТл (см. табл. 4), а Kp-индекс достигал значения 9 – во время бурь 8 и 10 ноября.

Эта ситуация естественно отразилась и в поведении галактических космических лучей (ГКЛ) проявившись в серии Форбуш-эффектов (ФЭ). На рис. 17 (средняя панель) представлено поведение плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ и экваториальной (Аху) составляющей первой гармоники анизотропии, полученные методом глобальной съемки (GSM) по данным мировой сети нейтронных мониторов. В табл. 5 приведены максимальные значения Форбуш-понижений и экваториальной составляющей Аху для 5 Форбуш-эффектов, а также основные параметры межпланетной среды в этот период и индексы геомагнитной активности. Из представленной информации видно, что в этот период не произошло гигантских событий, подобных ФЭ 29 октября 2003 г. Тем не менее, серия ФЭ, величина и характер этих эффектов свидетельствуют об уровне возмущенности весьма высоком для фазы солнечного цикла вблизи минимума.

Наиболее значительными, с глубиной понижения 7.3% и 8.1%, оказались ФЭ после третьей и четвертой ударных волн (номера 3 и 4 в табл. 5).

В работе [Belov et al., 2001] было показано, что величина Форбуш-эффекта в общем случае определяется состоянием межпланетной среды через параметр VB (произведение максимальной скорости солнечного ветра и напряженности ММП в рассматриваемом событии относительно их значений в спокойном ветре). Этот параметр рассчитан для событий ноября 2004 и также представлен в табл. 5. В следующей колонке (A_{ФЭ}) приведены значения максимальной амплитуды Форбуш-понижения, полученные из найденной в работе [Belov et al., 2001] зависимости A_{ФЭ} от VB. Как видно, согласие между вычисленными и полученными непосредственно из данных величинами довольно хорошее. Наибольшее отклонение реальной амплитуды понижения для события 4, по-видимому, связано с западным источником возмущения и лучшими условиями обмена заряженными частицами между областью ФЭ и окружающим межпланетным пространством.

На рис. 18 те же события в КЛ представлены несколько в иной форме. Здесь векторная диаграмма показывает поведение экваториальной компоненты первой гармоники анизотропии КЛ. Тонкие линии через равные временные промежутки соединяют одни и те же моменты на векторной диаграмме и на временной развертке плотности КЛ, вертикальные стрелки соответствуют величине и направлению северо-южной анизотропии за каждый час рассматриваемых событий. Прежде всего, обращает на себя внимание тот факт, что анизотропия существенно меняется даже во время, казалось бы, незначительных Форбуш-эффектов (номера 1 и 2 в табл. 5) с амплитудой <1%: после нескольких спокойных дней вектор Аху стал резко менять направление с обычных ~18 на 12, 0, 6 ч после прихода первых ударных волн. В третьем событии и после него наблюдался сильный рост амплитуды анизотропии, как эклиптической, так и североюжной составляющей, сопровождавшийся резкими изменениями ее направления. Особенно резкие отклонения от поведения в спокойный период анизотропии претерпевала во время событий 3 и 4. Быстрые изменения солнечного ветра и ММП в возмущенный период приводят к сложным структурам, которые проходят мимо Земли и находят отражение

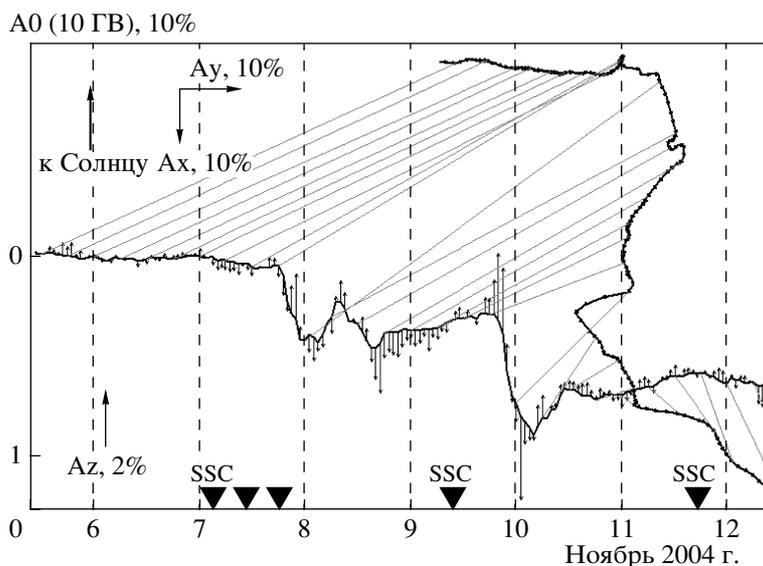


Рис. 18. Вариации плотности (АО) и анизотропии КЛ в серии Форбуш-эффектов в ноябре 2004 г. Векторная диаграмма представляет эклиптическую составляющую первой гармоники анизотропии (A_x), а вертикальные стрелки соответствуют северо-южной компоненте. Треугольниками показаны моменты прихода к Земле ударных волн.

в поведении КЛ, даже с энергиями, наблюдаемыми на нейтронных мониторах. Оценки ларморовского радиуса ρ для частиц с жесткостью 10 ГВ дают при наблюдавшихся параметрах солнечного ветра величину $\sim 8 \times 10^{10}$ см (а для 1 ГВ $\sim 8 \times 10^9$ см). При скорости ветра равной 730 км/с расстояние ρ возмущение пройдет примерно за 20 минут, а в часовых наблюдениях будут присутствовать изменения в КЛ на расстоянии до 3–4 ларморовских радиуса. Поэтому неудивительно, что в поведении анизотропии КЛ наблюдаются такие резкие изменения по направлению и амплитуде от часа к часу.

Необычная особенность проявилась в поведении плотности КЛ после появления четвертого SSC в 9:30 UT. В течение 10 ч после прихода ударной волны не наблюдалось понижения плотности КЛ, хотя в поведении анизотропии отклик нетрудно заметить. Отсутствие значительной модуляции КЛ может говорить о незакрытой структуре возмущения, проходящего в это время у Земли. Большой ФЭ, как и сильная магнитная буря, начались только в конце 9 ноября, после очередного скачка скорости солнечного ветра и напряженности ММП (не сопровождавшимися SSC).

Можно отметить также несколько необычное поведение плотности КЛ 8 ноября в минимуме Форбуш-эффекта (ФЭЗ). В течение примерно 12 ч здесь наблюдалось возрастание плотности (около 2%). Его пик совпадает, с одной стороны, со скачком скорости солнечного ветра, а с другой, с минимумом в Dst вариациях (-373 нТл). Казалось бы, это должно быть проявлением магнитосферного эффекта в КЛ. Однако дополнительный

анализ не позволяет однозначно принять такое объяснение. Магнитосферный эффект, как правило, проявляется на средне- и низкоширотных станциях, и практически не виден на станциях с жесткостью $< 2-2.5$ ГВ. В данном же случае возрастание интенсивности КЛ наблюдалось как на средне-, так и на высокоширотных нейтронных мониторах (за исключением самых восточных), и даже на полярных станциях (рис. 19). Исключение из обработки методом глобальной съемки станций с жесткостью геомагнитного обрезания > 1.2 ГВ (с наиболее ожидаемым магнитосферным эффектом) не изменило ситуацию. Таким образом, это возрастание плотности в минимуме ФЭ, по меньшей мере частично, могло быть результатом модуляции галактических КЛ определенными структурами в межпланетном пространстве. В данный момент времени последующая часть возмущения имела большую скорость распространения, чем предыдущая и в результате взаимодействия потоков солнечного ветра образовалась область сжатия с повышенной плотностью КЛ и довольно сложной структурой, которая проявилась в резких, хотя и кратковременных, изменениях анизотропии КЛ (рис. 18).

Обычно в периоды высокой возмущенности, подобные обсуждаемому, наряду с резкими изменениями плотности и анизотропии галактических КЛ наблюдается и заметное усиление их флуктуации. Рис. 20 содержит результаты мониторинга 30 галактических космических лучей за период с 15 октября по 10 декабря 2004 г. в Якутском Центре Космической Погоды ИКФИА (<http://ikfia.ysn.ru/fluctuations/index.php>). Приведены ре-

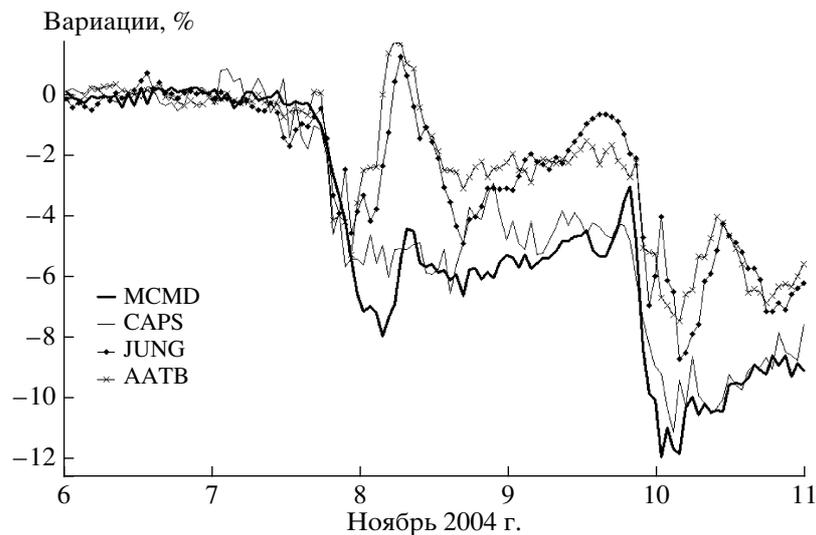


Рис. 19. Вариации скорости счета относительно базы 6 ноября на нейтронных мониторах станций: МакМердо (MCMD), $R_c = 0.01$ ГВ; Мыс Шмидта (CAPS), $R_c = 0.52$; Юнгфрауйох (JUNG), $R_c = 4.48$ ГВ; Алма-Ата 3300 м (AATB), $R_c = 6.69$ ГВ в ноябре 2004 г.

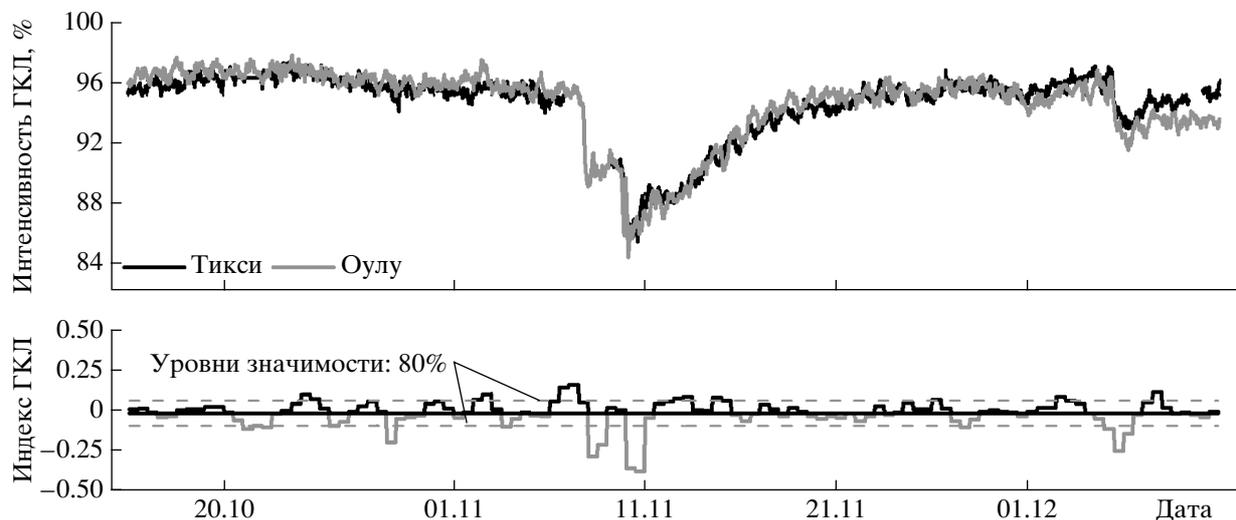


Рис. 20. Среднечасовые значения интенсивности ГКЛ (в процентах) полярных станций Тикси и Оулу (Финляндия). В нижней части рисунка – результаты оперативного прогноза экстремальных событий 7–9 ноября 2004 г. на базе наземного мониторинга галактических, космических лучей по 5-мин данным полярных станций космических лучей.

зультаты расчета индекса мерцаний ГКЛ в относительных единицах по 5-минутным значениям интенсивности ГКЛ (в процентах) двух полярных станций: Тикси и Оулу (Финляндия). Далее, 5-минутные значения индекса мерцаний ГКЛ были усреднены за 12 часов. Согласно данному в работах [Туголуков и Козлов, 1991; Козлов и Туголуков, 1992] определению, индекс мерцаний соответствует показателю частотного спектра флуктуации, обобщенному авторами на случай шумоподобных процессов. Показатель спектра определяется как тренд для амплитуд гармоник частотного

спектра по критерию, аналогичному критерию тренда Кендалла [Бендат и Пирсол, 1989].

Двумя пунктирными горизонтальными линиями нанесены уровни значимости (80%) для индекса мерцаний. Уровни значимости для индекса мерцаний определяются аналогично уровням значимости для тренда по критерию Кендалла. Значения индекса мерцаний ГКЛ превышающие верхний уровень значимости 0.075 (уровень 80%) – соответствуют регистрации предиктора. Значения индекса мерцаний лежащие ниже нижнего уровня значимости, т.е. -0.075 (также 80%) – означают диагностику события. По оси абсцисс – шкала миро-

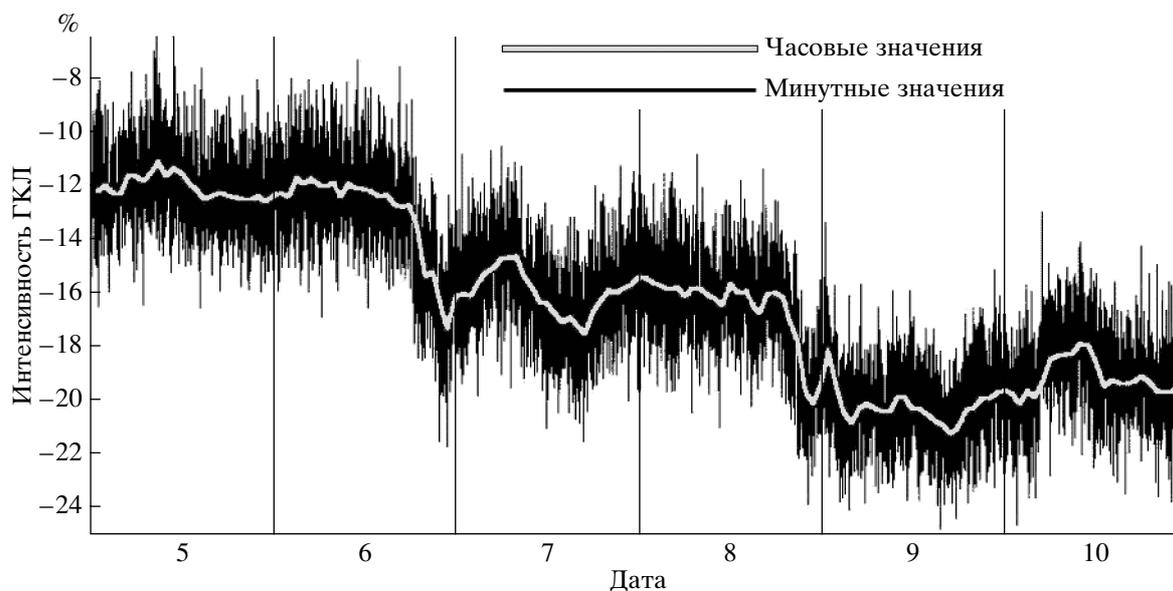


Рис. 21. Скорость счета монитора 24-NM-64 (минутные и часовые значения) на станции “Новосибирск” 5–10 ноября 2004 г.

вого времени в сутках. Максимальное значение индекса мерцаний достигает с 6 на 7 ноября 2004 г. – за 1 сутки до начала Форбуша-эффекта 7–9 ноября.

Поведение ГКЛ, аналогичное показанному на рис. 19–20 в период 7–10 ноября 2004 года, наблюдалось также на станции Апатиты (Рис. 32 в разделе IV. Магнитосфера) и в Новосибирске (Географическая широта $\lambda = 54.80N$; Географическая долгота $\varphi = 83.00N$; Высота над уровнем моря $h = 163$ м.; см. рис. 21).

4. МАГНИТОСФЕРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

4.1. Поведение геомагнитных индексов

В целом, магнитные бури ноября 2004 года были не только самые большие бури последнего года (рис. 22), но и входят в список самых больших магнитных бурь 23-го цикла (табл. 6). Примечательно, что ровно половину этого списка составляют бури октября 2003 – ноября 2004 г., т.е. за практически один год произошло столько же особо мощных бурь, сколько и за предыдущие 7 лет.

В разделе 3.1 было показано, что геомагнитное поле вблизи экватора, описываемое Dst -индексом, было сильно возмущенным и хорошо описывается наблюдаемыми значениями параметров межпланетной среды и, в частности южной компонентой межпланетного магнитного поля. Магнитные бури ноября 2004 года характеризовались также очень высокой геомагнитной активностью на авроральных и полярных широтах (более 2000 нТл по индексу AL), сравнимой по величине с событиями октября-ноября 2003 года. Детальный анализ динамики авроральных элект-

роджетов может быть проведен позднее, после получения уточненных результатов наблюдений различных параметров магнитосферы, однако, некоторые выводы можно сделать, используя уже

Таблица 6. Список самых больших ($ApD > 100$) магнитных бурь 23-го цикла

| Дата | ApD | Ap_{max} | Kp_{max} | Dst_{min} | SSN |
|------------|-------|------------|------------|-------------|-----|
| 2003.10.29 | 204 | 400 | 9.0 | -345 | 167 |
| 2001.03.31 | 192 | 300 | 8.7 | -387 | 205 |
| 2003.10.30 | 191 | 400 | 9.0 | -401 | 167 |
| 2004.07.27 | 186 | 300 | 8.7 | -182 | 55 |
| 2000.07.15 | 164 | 400 | 9.0 | -300 | 148 |
| 2004.11.10 | 161 | 300 | 8.7 | -289 | 36 |
| 2004.07.25 | 154 | 207 | 8.0 | -150 | 57 |
| 2003.11.20 | 150 | 300 | 8.7 | -472 | 90 |
| 1998.08.27 | 144 | 207 | 8.0 | -155 | 100 |
| 2001.11.06 | 142 | 300 | 8.7 | -292 | 140 |
| 2004.11.08 | 140 | 300 | 8.7 | -373 | 57 |
| 2000.08.12 | 123 | 179 | 7.7 | -237 | 170 |
| 2004.11.09 | 119 | 300 | 8.7 | -223 | 52 |
| 1998.09.25 | 117 | 236 | 8.3 | -207 | 105 |
| 2003.10.31 | 116 | 236 | 8.3 | -320 | 160 |
| 2000.10.05 | 116 | 179 | 7.7 | -192 | 128 |
| 2003.05.29 | 109 | 236 | 8.3 | -130 | 56 |
| 2003.08.18 | 108 | 154 | 7.3 | -168 | 67 |
| 2001.11.24 | 104 | 236 | 8.3 | -221 | 67 |
| 1998.05.04 | 101 | 300 | 8.7 | -205 | 73 |

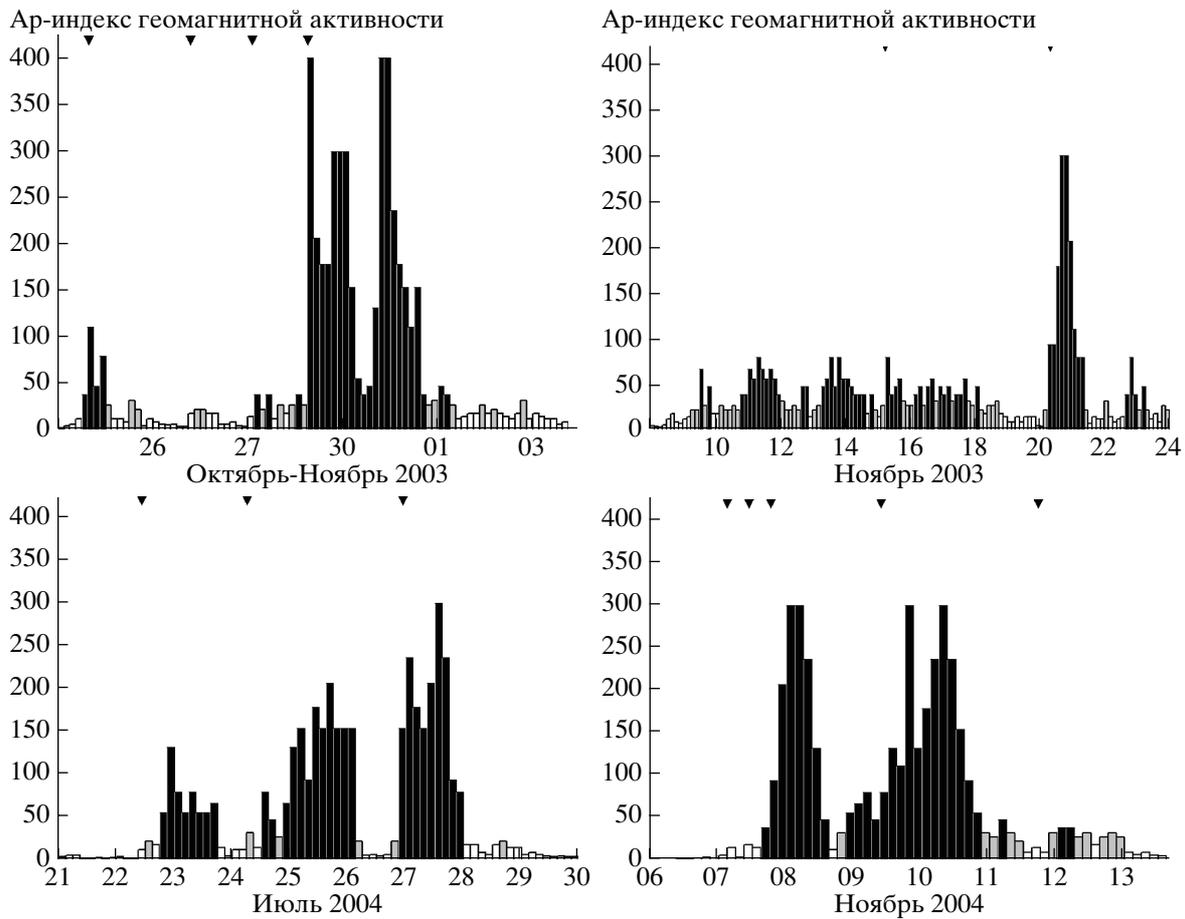


Рис. 22. Трехчасовые A_p -индексы во время наиболее выдающихся событий октября 2003 – ноября 2004 гг.

имеющиеся предварительные данные. На рис. 23 приведены следующие графики: (верхняя панель) B_z -компоненты межпланетного магнитного поля в системе координат GSM ; (средняя панель) электрического поля солнечного ветра, вычисленного по формуле

$$E = V \sqrt{B_z^2 + B_y^2} / 2 \sin(\theta/2)^4 + \alpha V^2,$$

$$\alpha = 4.4 \times 10^{-6} \text{ (мВ/м)/(км/с)}^2,$$

где θ – часовой угол ММП (как было показано ранее, эта комбинация параметров солнечного ветра наиболее хорошо коррелирует с индексом AL [см. Ермолаев и др., 2005]); (нижняя панель) AL индекса (оцифрованного по предварительному графику).

В отличие от магнитных бурь октября 2003 года скорость солнечного ветра около Земли во время рассматриваемого события была практически в два раза меньше и не превышала 1000 км/с. Поэтому, основной вклад в величину электрического поля дала вариация южной компоненты межпланетного магнитного поля. В свою очередь, амплитуда вариаций индекса AL также была примерно в

два раза ниже (~1500–2000 нТл). Отдельно необходимо отметить несколько кратковременных усилений авроральной геомагнитной активности до –4000 нТл. Эпизодические вариации подобной амплитуды не уникальны и регистрировались и во время менее сильных магнитных бурь. Например, 25 сентября 1998 г., в то время как значение электрического поля солнечного ветра было весьма умеренным и составляло около 12 мВ/м, станции сети магнитометров CANOPUS зарегистрировали отклонение горизонтальной компоненты до величин порядка –4000 нТл, что объяснялось, в частности, особенностями динамики геомагнитного хвоста Земли.

4.2. Геомагнитные возмущения на земной поверхности

Интенсивным магнитным бурям ноября 2004 г. предшествовал электромагнитный эффект солнечной вспышки (solar flare effect – sfe) или “кроше” 06 ноября 2004 г., который был вызван тремя рентгеновскими всплесками M9.3 (00:11 UT), M5.9 (00:44 UT) и M1.4 (01:40 UT) и всплесками

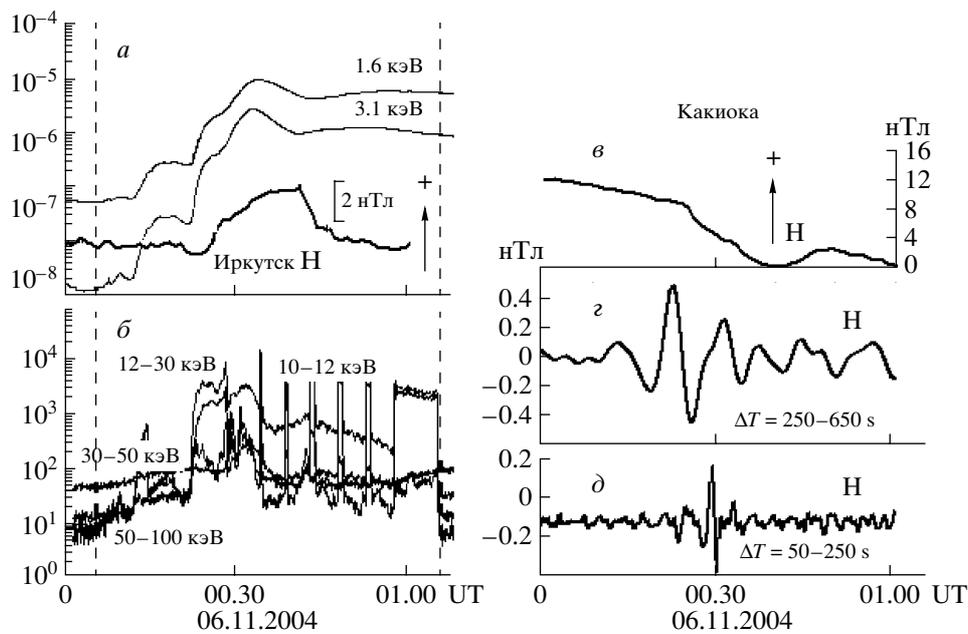


Рис. 24. а) Вариации потока рентгеновского излучения с энергией квантов 1.6 и 3.1 кэВ и фрагмент H - компонента геомагнитного поля на обсерватории Иркутск (IRT), сопровождающие вспышку 06.11.2004.
 б) Вариации скорости счета гамма – квантов в 4 энергетических каналах.
 в) Фрагмент H -компонента геомагнитного поля на obs. Какиока.
 з) Вариации Hx -компоненты геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов 250–650 с ($P3sfe$) на obs. Какиока.
 д) Вариации Hx - компоненты геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов 50–250 с ($P2sfe$) на obs. Какиока. Стрелки со знаком “+” указывают рост элемента.

Рассмотрим пространственное распределение токов эффекта SFE, которые сопровождаются геомагнитными пульсациями импульсного типа по материалам мировой сети станций. На рис. 25а, 25б приведены фрагменты стандартных магнитограмм нескольких низкоширотных и среднеширотных обсерваторий в различных секторах MLT для интервалов регистрации гамма всплесков 04 ноября 2003 г. (а) и 06 ноября 2004 г. (б). Интервал наблюдения гамма-излучения выделен на Рис. 25 светлыми прямоугольниками, а момент максимума стрелкой. Сплошные вертикальные линии на графиках соответствуют моментам регистрации максимумов гамма-излучения. Как видно на графике магнитный импульс с точностью ± 1 мин регистрируется глобально во всех представленных долготных секторах MLT.

Для вспышки 04 ноября 2003 г. максимум в H -компоненте, определенный непосредственно по текстовому файлу данных, на всех станциях дневного сектора наблюдался в 20:41 UT, и лишь на двух станциях послеполуночного сектора IRT (03.40 MLT), КАК (05.40 MLT) максимум регистрировался в 20:40 UT. Максимальная амплитуда импульса ~ 12 нТл наблюдалась на околополуденной низкоширотной obs. HUA.

Для вспышки 06 ноября 2004 г. на всех станциях максимум тока можно определить в 00:40 UT, за

исключением околополуденной ст. HON (13 MLT). Максимальная амплитуда импульса ~ 8 нТл наблюдалась на obs. КАК. Амплитуда импульса убывает в вечернюю и утреннюю стороны, но даже на полуночных станциях остается $\sim (0.5-1)$ нТл.

Для геомагнитных возмущений глобальность или одновременность регистрации на всем земном шаре детально изучена для магнитных бурь и ее структурных элементов, особенно предварительных импульсов (PRI) внезапного начала магнитной бури. Обнаружена глобальность проявления и для некоторых типов $Pc5$ колебаний, источником которых предполагаются крупномасштабные колебания магнитосферы, связанные с колебаниями продольных токов в авроральной зоне [см., например Motoba et.al. 2002]. В рассматриваемых нами случаях возбуждение магнитных импульсов связано с воздействием на ионосферу жесткой электромагнитной радиации и процессами ионизации. В обоих рассмотренных случаях в солнечном ветре не было зарегистрировано импульсов давления или резких скачков межпланетного магнитного поля, которые могли бы вызвать усиление авроральных токов или токов на магнитопаузе. В рассмотренные интервалы не наблюдались и суббури.

Для обсуждения результатов наблюдений уместно, на наш взгляд, предложить следующую ги-

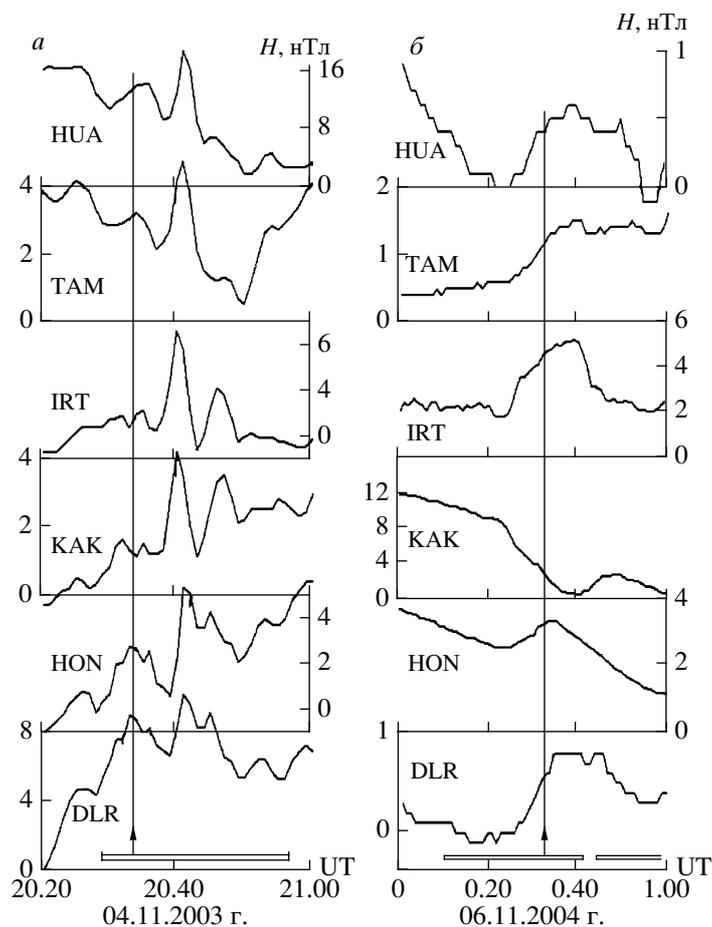


Рис. 25. Иллюстрация глобальности геомагнитного отклика на гамма – вспышки. Фрагменты магнитограмм (H -компонент) низкоширотных обсерваторий в разных долготных секторах (HUA: магнитная широта 21.03 и MLT = UT-5; TAM: 5,85 и, UT – 4; IRT: 47.10 и UT + 7; KAK: 29.04 и UT + 9; HON: 21,74 и ЦТ – 11; DLR: 38,92 и UT – 7) для события 04.11.2003 (а) и 06.11.2004 (б). Прямоугольником на рисунках обозначена длительность гамма – излучения, а стрелкой время максимума.

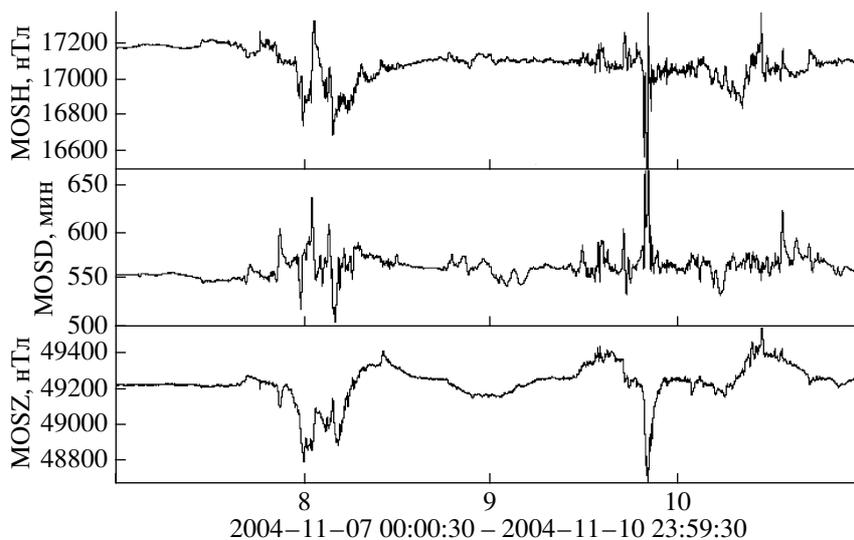


Рис. 26. Вариации компонент магнитного поля по данным магнитной обсерватории “Москва” (ИЗМИРАН)

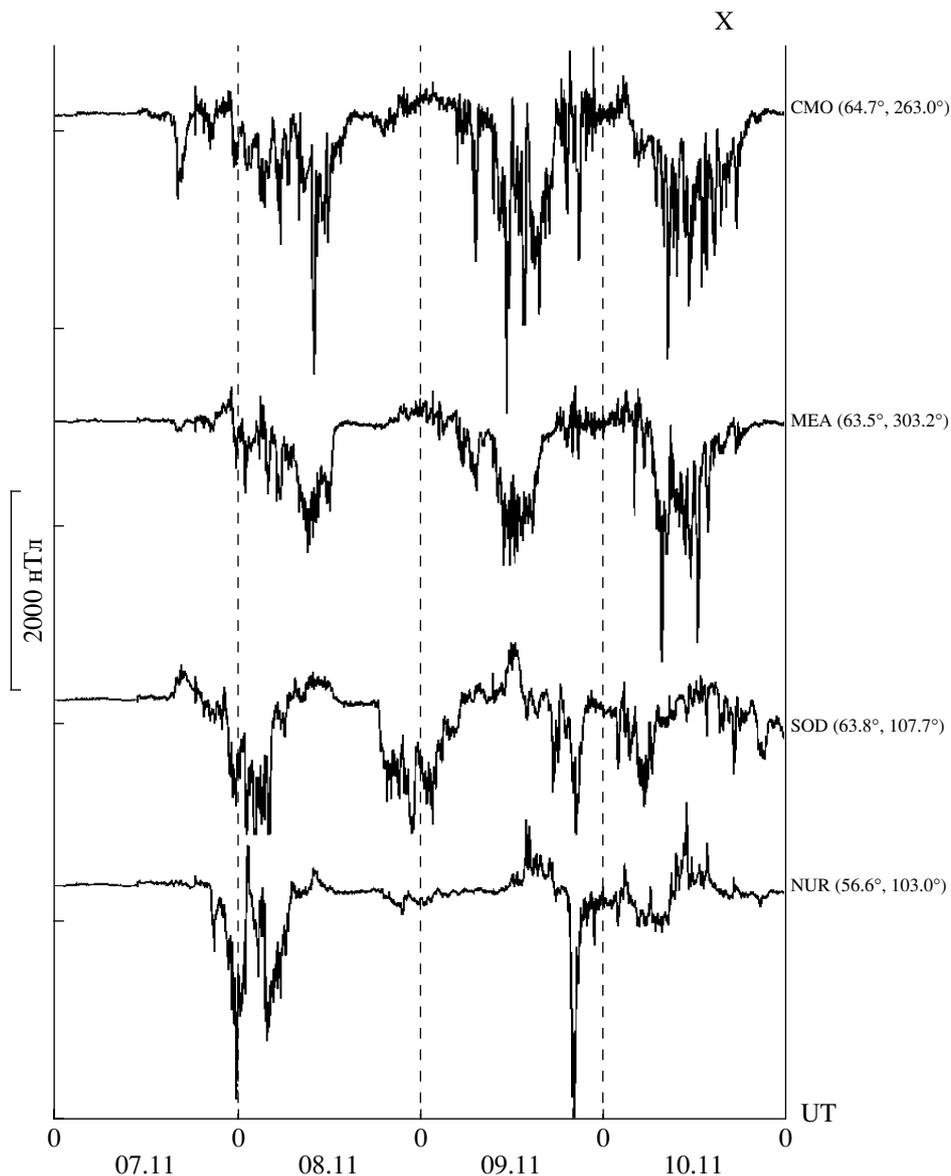


Рис. 27. Магнитограммы обсерваторий в антиподных точках (подробности в тексте), справа – коды обсерваторий и их геомагнитные координаты

потезу. В работе [Молдаванов, 2003] рассмотрены условия, благоприятствующие возникновению электрического поля в поляризованном слое, возникающем на атмосферных высотах вследствие поглощения гамма излучения, с величиной близкой к порогу возникновения его электрического пробоя. Подобный электрический пробой (стратосферная молния) является источником широкополосного излучения различной физической природы (электромагнитного, акустико-гравитационного, теплового и т.д.), что может приводить к генерации колебательных процессов различных частот. В частности, акустическая волна, достигая ионосферы, может индуцировать импульс продольного тока и высокочастотную турбулент-

ность в E -слое ионосферы. Наличие естественных волноводов, таких как волновод для атмосферно-гравитационных волн, атмосферный ТН-волновод, альвеновский и БМЗ-волноводы и другие приводит к модуляции возникшего возмущения.

Магнитная буря в рассматриваемый период представляла собой сумму двух бурь, следующих одна за другой. Максимум главной фазы первой бури отмечался в 8 ноября ($Dst \sim -373$ нТл), а второй – 10 ноября ($Dst \sim -289$ нТл) (см. рис. 1, а также пример измерений компонент магнитного поля на магнитной обсерватории ИЗМИР АН “Москва” на рис. 26). Именно в это время на земной поверхности наблюдались наиболее интен-

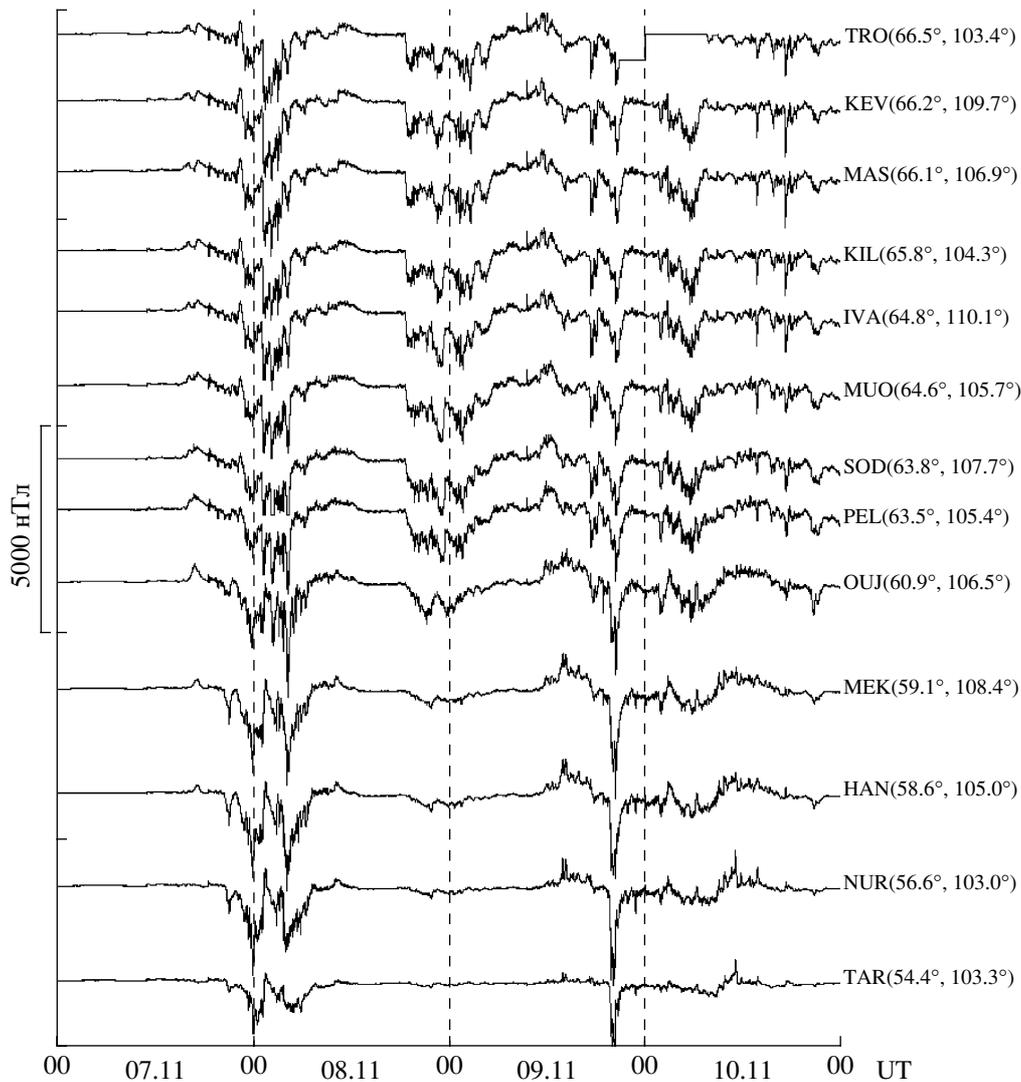


Рис. 28. Магнитограммы скандинавских обсерваторий за 7–10 ноября 2004 г. справа – коды обсерваторий и их геомагнитные координаты

сивные геомагнитные возмущения в ночном секторе магнитосферы.

На рис. 27 приведены магнитограммы X -компоненты поля за 07–10 ноября 2004 г. на 4-х обсерваториях, расположенных в антиподных областях, т.е. разделенных по долготе на ~ 12 часов. Геомагнитная полночь в обе. Колледж (СМО) в 11 UT, в обе. Минук (МЕА) – 08:30 UT, в обе. Содаккюля (SOD) 21:30 UT и в обе. Нурмиерви (NUR) – 22 UT, т.е. ночное время в первых двух обсерваториях соответствует дневному времени в последних двух. Видно, что в ночном секторе (СМО и МЕА) 8 и 10 ноября амплитуда суббурь достигала 2000 нТл. Продолжительные возмущения имели вид отдельных импульсных всплесков длительностью 20–40 мин и интенсивностью до 400 нТл.

Интересно отметить, что такие же и даже более интенсивные ночные возмущения (особенно в СМО) отмечались и 9 ноября, когда начальная фаза второй супербури развивалась на фоне восстановительной фазы первой бури, а значения Dst -индекса составляли порядка -100 нТл. Обсерватории СМО и МЕА разделены по широте всего на 1.2° , но по долготе на 40° , однако интенсивность геомагнитных возмущений в этих обсерваториях отличалась в несколько раз, как и в ночное время в главную фазу первой супербури 8 ноября, что свидетельствует о большой локальности процессов. На скандинавском меридиане (SOD и NUR) наибольшие возмущения также отмечались в локальное ночное время. Наиболее интенсивная суббуря (до 3000 нТл) была зарегистрирована в околополуночное время 9 ноября в NUR. Интересная 36 суббуря наблюдалась в ночь с 8 на 9 но-

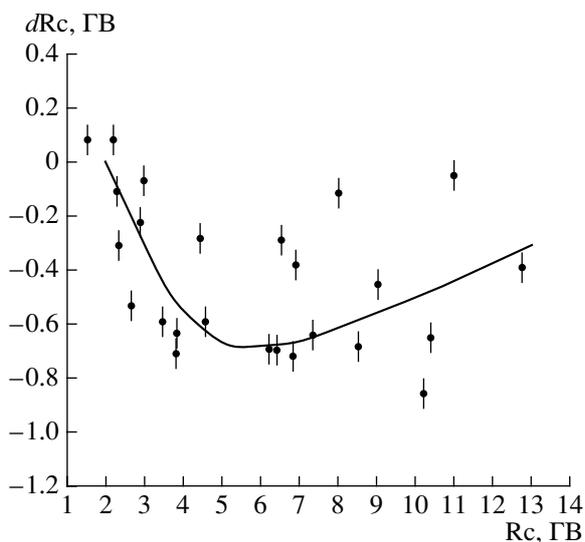


Рис. 29. Широтное распределение вариаций жесткостей обрезания dRc в максимуме магнитной бури 8 ноября 2004. х

ября в обс. SOD. Эта суббуря не отмечалась в более низкоширотной обе. NUR. В дневном секторе (обе. СМО и МЕА) в это время наблюдались геомагнитные пульсации $Pc5$ с характеристиками, типичными для резонансных колебаний магнитосферы.

Рассмотрим более подробно широтные особенности геомагнитных возмущений на скандинавском меридиане (рис. 28), где имеется плотная сеть наземных обсерваторий IMAGE. Две интенсивные суббури были зарегистрированы в местное послеполуночное время 8 ноября с максимальной амплитудой на широтах меньше 60° , сопровождаемые всплесками риометрического поглощения до 5–6 дБ. В более высоких широтах в это время наблюдалась серия импульсных возмущений с амплитудой до 1500 нТл.

В околополуночное время 9 ноября сначала (в 17 UT) возникла суббуря с четко выраженной взрывной фазой на высоких геомагнитных широтах $64\text{--}67^\circ$, не наблюдаемая на широтах ниже 61° . Затем (около 20LUT) началась новая, значительно более интенсивная (до 3000 нТл) суббуря, наблюдаемая в большом диапазоне широт, с максимальной интенсивностью на широтах порядка 56° (обе. NUR), где и находился центр электроструи, судя по вариациям Z-компоненты на профиле станций. Суббуря сопровождалась всплеском риометрического поглощения, максимум которого (7 дБ) наблюдался на широтах 63° , т.е. по широте выше центра токовой струи.

В ночь с 8 на 9 ноября, как уже отмечалось, на скандинавском меридиане регистрировались интенсивные (до 1500 нТл) импульсные возмуще-

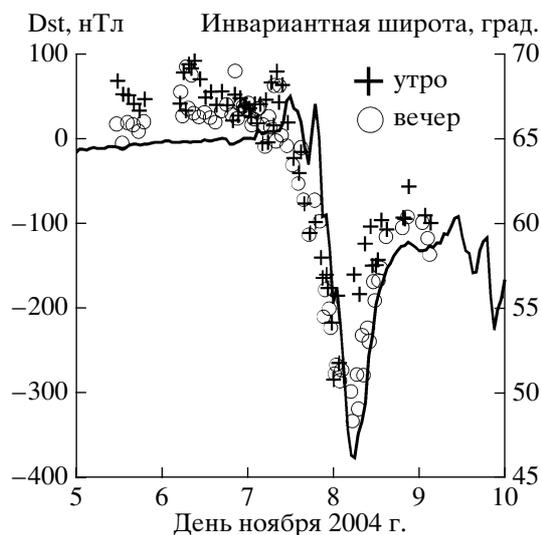


Рис. 30. Вариации положения границ проникновения протонов с энергией 1–5 МэВ в утреннем (кресты) и вечернем (кружки) секторе магнитосферы во время магнитной бури 8 ноября 2004 года. Сплошной кривой изображена Dst -вариация.

ния, наблюдаемые только на широтах выше 61° , ниже которой амплитуда колебаний резко уменьшалась с уменьшением широты.

Из рис. 28 видно, что все обсуждаемые ночи характеризовались резкой четкой сменой режима магнитных возмущений на геомагнитной широте порядка 60° . Отсюда можно предположить, что эта широта соответствует полярной границе авроральной зоны. Такой же резкий низкоширотный сдвиг ночной авроральной зоны наблюдался и во время октябрьских супербурь 2003 г.

Судя по Dst вариациям, восстановительная фаза бури началась 10 ноября после 21 UT. В наблюдаемых год назад супербурях октября и ноября 2003 г. эта фаза характеризовалась генерацией очень интенсивных (до 500 нТл) квази-мономатических геомагнитных пульсаций диапазона $Pc5$ [Клейменова и Козырева, 2005]. Однако в восстановительную фазу супербури ноября 2004 таких интенсивных $Pc5$ пульсаций не наблюдалось. В утренне-дневном секторе на Скандинавском меридиане отмечались лишь отдельные всплески колебаний с периодами около 4–5 мин и максимальной амплитудой 50–60 нТл.

Описанная ситуация отразилась также и в поведении галактических КЛ, проявившись в так называемом “магнитосферном” эффекте возрастания интенсивности КЛ. Как видно из рис. 29, скорость счета на нейтронных мониторах на средне- и низкоширотных станциях показывает гораздо большее возрастание, чем на высокоширотных нейтронных мониторах во время главной фазы магнитной бури, что действительно может быть отнесено к магнитосферному эффекту в КЛ

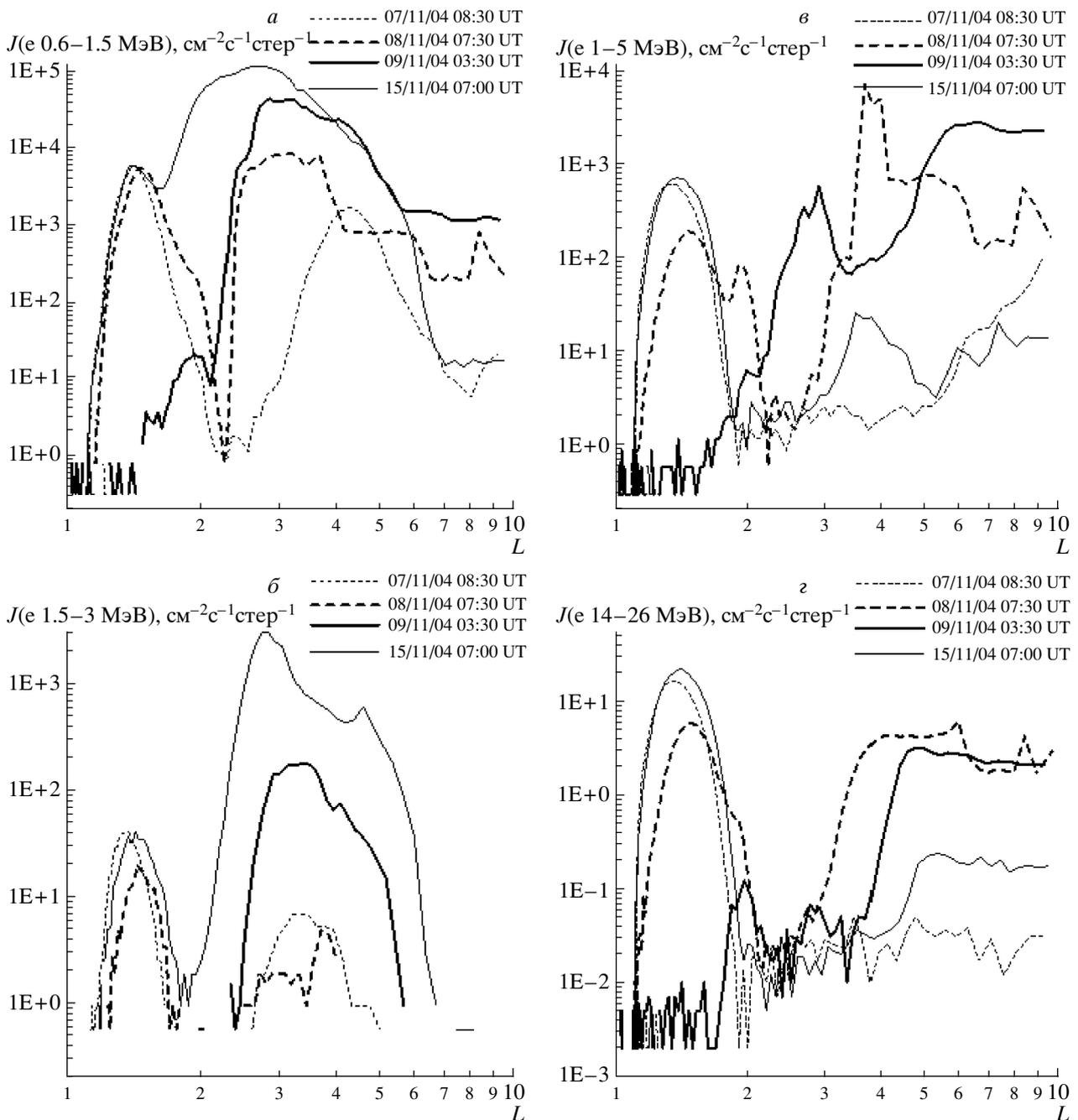


Рис. 31. Сравнение профилей потоков частиц радиационных поясов: электроны с энергиями 600 кэВ–1.5 МэВ (а) и 1.5–3 МэВ (б) и протоны с энергией 1–5 МэВ (в) и 14–26 МэВ (г).

на этих станциях. Остаточная дисперсия при счете по *GSM* методу велика в эти часы, что говорит о неучтенном магнитосферном эффекте. Таким образом, скорее всего, в этом событии проявились одновременно эффекты межпланетного и геомагнитного происхождения.

Методом, описанным в работах [Baisultanova et al., 1995; Белов и др., 2005а], были рассчитаны изменения жесткости геомагнитного обрезания

по разным станциям во время этого эффекта. Распределение вариаций этих жесткостей dRc относительно жесткостей в спокойный период для эпохи 2000 г. (фактически, широтное распределение) приведено на Рис. 29 для 6–7 го часа 8 ноября при минимальном значении *Dst*-вариации для этого эффекта. Как видно, максимальные изменения жесткостей (порядка 0.7 ГВ) происходили на широтах, соответствующих жесткости геомагнитно-

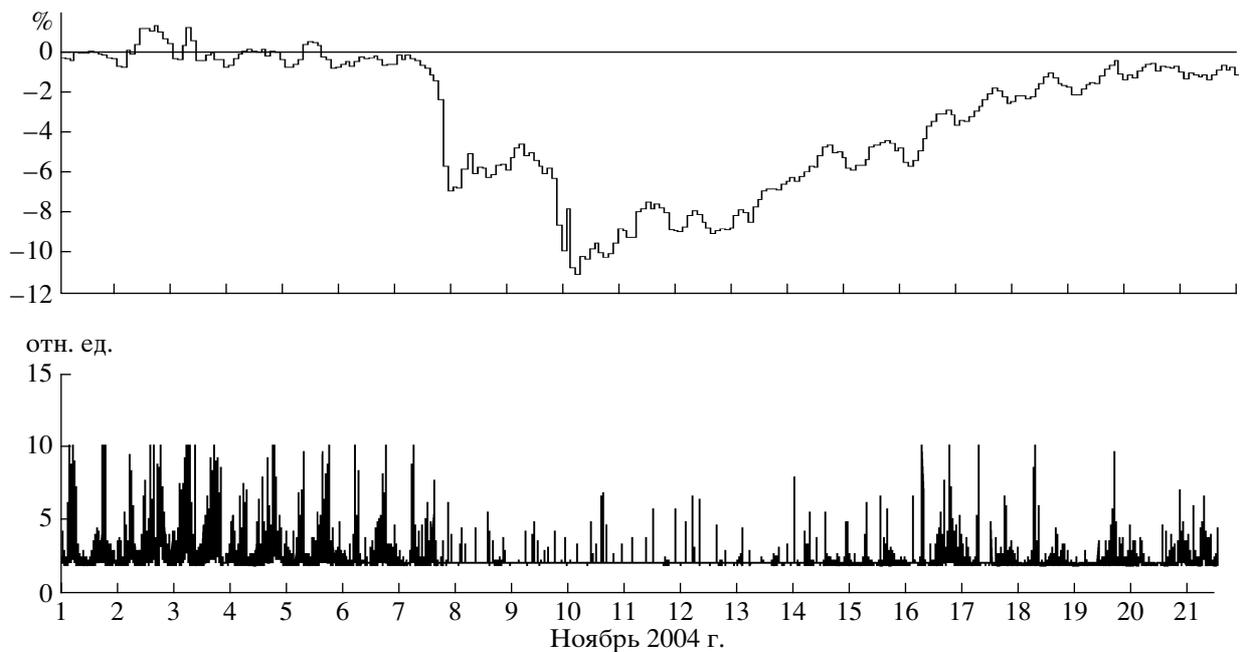


Рис. 32. Временной ход данных нейтронного монитора и магнитной составляющей атмосферных импульсов в диапазоне частот 1–300 Гц в ноябре 2004 года.

го обрезания 5–6 ГВ, что подтверждает более слабую возмущенность магнитосферы в этот период по сравнению с бурей в ноябре 2003 г. [Белов и др., 2004]

4.3. Положение границ проникновения СКЛ

Как уже отмечалось ранее, одной из основных особенностей магнитной бури является перенос активных процессов во внутреннюю магнитосферу. В околоземном космическом пространстве структура и потоки СКЛ определяются структурой геомагнитного поля. В данной работе мы используем потоки малоэнергичных протонов СКЛ, зарегистрированные в эксперименте на ИСЗ “КОРОНАС-Ф”, как индикатор, хорошо отражающий трансформации структуры магнитосферы во время бури, аналогично тому, как это было сделано в [Панасюк и др., 2004] для периода бурь октября 2003 г. Исследование динамики границ проникновения СКЛ в магнитосферу Земли дает ценную информацию об изменении топологии геомагнитного поля во время геомагнитных возмущений. Динамика границы проникновения солнечных протонов и электронов – хороший индикатор структуры магнитосферы (см. например, [Дарчиева и др., 1990; Панасюк и др., 2004] и ссылки там).

Солнечные космические лучи с энергиями 1–5 МэВ регистрировались в полярных шапках с 30 октября, но мы исследуем границы проникновения СКЛ начиная с 5 ноября, перед магнитной бурей. Как уже отмечалось, в данных ИСЗ “КО-

РОНАС-Ф” с 10 по 15 ноября имеется пропуск. Тем не менее, имеющиеся данные дают нам возможность проследить движение границ проникновения до начала магнитной бури 8 ноября и в начале бури. Поток протонов на границе проникновения падает не мгновенно, поэтому для анализа положения границы можно применить разные критерии. Как и в работе [Панасюк и др., 2004], мы используем традиционный для предыдущих работ НИИЯФ критерий – в 2 раза ниже максимума.

На рис. 30 приведен временной ход границ проникновения протонов с энергией 1–5 МэВ. Из рисунка хорошо видно, что до бури граница (если не учитывать небольшие колебания) и для утреннего, и для вечернего сектора располагается вблизи $67\text{--}68^\circ$, то есть вблизи $L = 6$. Также из рис.30 видно, что экстремальное низкоширотное положение границ и для утреннего, и для вечернего секторов хорошо соответствует моментам максимума амплитуды Dst -вариации во время бури 8 ноября, однако значения минимальной инвариантной широты для них различны. Минимальная инвариантная широта границы для утреннего сектора составляет $\Lambda_b \sim 51^\circ$ ($L = 2.5$) и для вечернего сектора – $\Lambda_b \sim 48^\circ$ ($L = 2.3$). Из рисунка видно, что границы хорошо следуют за ходом Dst на главной фазе этой бури. Как ранее предполагалось в работе [Панасюк и др., 2004], возможное объяснение схожести поведения границ в утреннем и вечернем секторах связано с тем, что самые глубокие уровни проникновения связаны с захватом

частиц на дрейфовые орбиты, в результате чего достигается равенство инвариантных долгот на дневной и ночной стороне магнитосферы.

4.4. Вариации радиационных поясов

Одним из основных физических процессов во время магнитных бурь является динамика радиационных поясов Земли [Li and Temerin, 2001; Панасюк и др., 2004, Ермолаев и др., 2005]. Проследим динамику радиационных поясов во время сильных магнитных бурь начала ноября 2004 по данным ИСЗ “КОРОНАС-Ф”. На тот момент спутник имел полярную орбиту с наклоном 82.5° , высота которой составляла примерно 400 км. При таких параметрах орбиты приборы, установленные на “КОРОНАС-Ф” могли регистрировать захваченную радиацию лишь в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии. На рис. 31 (а–г) приведены данные о вариациях потоков частиц в радиационных поясах (электроны с энергиями 600 кэВ–1.5 МэВ и 1.5–3 МэВ и протоны с энергией 1–5 МэВ и 14–26 МэВ) в утреннем секторе MLT. По оси X приведен номер L -оболочки, по Y – интенсивность потока частиц. Данные о радиационных поясах 7 ноября (тонкая пунктирная линия) мы используем в качестве исходного состояния пояса перед магнитными бурями – максимум внешнего пояса располагается на $L = 4.5$, зазор между поясами – на 2.5. Данные 8 октября (жирная пунктирная линия) получены практически сразу после окончания главной фазы первой бури, данные 9 ноября (жирная сплошная линия) – во время развития фазы восстановления после первой бури. К сожалению, единственное имеющееся в нашем распоряжении прохождение внутреннего пояса в этот день расположено значительно восточнее центра Бразильской магнитной аномалии, поэтому данные о потоках частиц во внутреннем поясе в этот день не были получены. Далее из-за отсутствия информации с 10 по 14 ноября мы имели возможность оценить результат воздействия бури на радиационные пояса только 15 ноября (тонкая сплошная линия), в самом конце фазы восстановления после второй бури. Тем не менее, данные, представленные на рис. 31 (а–г), содержат важную информацию о динамике радиационных поясов.

Так мы видим, что 8 октября интенсивность электронов 1.5–3 МэВ на $L = 3–3.5$ заметно уменьшилась, граница электронов с энергией 0.6–1.5 МэВ сдвинулась ближе к Земле, примерно до 2.2, а полярная шапка заполнена солнечными электронами этих энергий. Что касается протонов, то на рис. 31в, 31г хорошо видны границы проникновения этих частиц на $L = 3–3.5$ для энергий 14–26 МэВ и 1–5 МэВ, соответственно. Данные, полученные 9 ноября, показывают заметное расширение внешнего пояса (это видно для обоих энергетических

каналов электронов), возрастание интенсивности более чем на порядок электронов с энергиями 600 кэВ–1.5 МэВ, и на полтора порядка в интервале 1.5–3 МэВ, а также сдвиг максимума внешнего пояса ближе к Земле. Мы видим, что наблюдаемая динамика потоков электронов во внешнем поясе имеет весьма схожий характер с изменениями внешнего радиационного пояса Земли во время бурь октября–ноября 2004 года [Панасюк и др., 2004, Ермолаев и др., 2005]. Отсутствие значимых потоков протонов 1–5 МэВ во внутреннем поясе связано исключительно с географическим положением единственного витка спутника в этой области пространства. У протонов с энергией 1–5 МэВ мы видим сформировавшийся на $L = 2.8–3$ дополнительный максимум, что также сходно с данными, полученными в 2003 г [Панасюк и др., 2004, Ермолаев и др., 2005]. Спустя 5 дней, 15 ноября продолжалось расширение внешнего пояса электронов, а также дальнейшее увеличение потоков электронов во внешнем поясе (особенно с энергией 1.5–3 МэВ) и смещение максимума внешнего пояса до 2.3–2.5. Пик протонов с энергией 1–5 МэВ в это время сместился на $L = 3.8$, поток протонов с энергией 14–26 МэВ в полярных шапках все еще почти на порядок превышал фоновое значение, полученное 7 ноября.

Из приведенных данных видно, динамика радиационных поясов во время бурь ноября 2004 года имела достаточно сходных черт с динамикой РПЗ во время мощных бурь октября–ноября 2003, описанных в работах [Панасюк и др., 2004, Ермолаев и др., 2005], а именно:

- а) уменьшение интенсивности потока электронов с энергиями 1.5–3 МэВ во время главной фазы магнитной бури;
- б) заметное увеличение интенсивности потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли, расширение электронного пояса и сдвиг его максимума на меньшие L во время фазы восстановления;
- в) появление дополнительного максимума протонов с энергиями 1–5 МэВ на L вблизи 3.

4.5. Атмосферное электрическое поле в КНЧ-диапазоне

Согласно современным представлениям (см., например, [Ермаков и др. 2003.]), космические лучи являются одним из основных источников ионизации атмосферы. Особенно это касается высоких широт, где интенсивность другого мощного ионизирующего фактора – грозовой активности – гораздо слабее по сравнению с низкоширотными районами. При этом лишь для части низкоширотных грозовых разрядов характерны настолько мощные электромагнитные импульсы, что способны достигать высокоширотных областей и за-

метно превышать местный флуктуационный электромагнитный фон. Основная энергия подобных импульсов, пришедших в точку наблюдения, оказывается сосредоточенной в диапазоне от единиц Гц до десятков кГц (см., например, [Ремизов, 1985]).

Авторы [Муллаяров и др., 2003], анализируя результаты регистрации атмосфериков в Якутске в диапазоне частот 0.3–10 кГц, делают вывод о том, что Форбуш-понижения интенсивности ГКЛ приводят к увеличению грозовой активности и количества атмосфериков. Однако графики, приведенные этими авторами свидетельствуют, на наш взгляд, не об увеличении, а скорее, лишь о восстановлении интенсивности атмосфериков на фазе Форбуш-эффекта после их уменьшения, вызванного вспышкой релятивистских солнечных протонов. Как известно, вторжения последних в земную атмосферу предшествуют Форбуш-понижениям ГКЛ и приводят к образованию мощного слоя ионизации в нижней ионосфере, который препятствует распространению атмосфериков, особенно в высоких широтах.

Известно, что на расстояниях более нескольких тысяч км амплитудные спектры атмосферных электромагнитных импульсов имеют два максимума, а именно: 2–10 кГц и единицы – сотни Гц.

На Апатитском атмосферном полигоне Полярного геофизического института (67°33' N, 33°20' E) с июля 2003 г. начато проведение непрерывных наблюдений атмосферных электромагнитных импульсов в диапазоне частот 1–300 Гц [Ролдугин и др., 2003]. По данным институтского нейтронного супермонитора в Апатитах за интервал наблюдений с июля 2003 г. по ноябрь 2004 г. были зафиксированы 5 случаев значительных Форбуш-понижений (уменьшение интенсивности ГКЛ около 4-х % и более). При этом во всех случаях Форбуш-понижению ГКЛ соответствует уменьшение магнитной составляющей атмосферных импульсов.

В качестве примера, на рис. 32 приведены графики для случая в ноябре 2004 г. по наблюдениям в Апатитах. Здесь: верхний график – данные супермонитора, нижний – поведение магнитной составляющей атмосферных импульсов в КНЧ-диапазоне 1–300 Гц.

Основным источником рассматриваемых здесь атмосферных электромагнитных импульсов в диапазоне 1–300 Гц, по-видимому, являются грозовые разряды типа “облако-верхние слои атмосферы”, т.е. спайты и джеты (см., например, [Морозов, 2002] и приведенный там краткий обзор). Форбуш-понижение интенсивности ГКЛ приводит к уменьшению степени ионизации верхних слоев атмосферы и, как следствие, к уменьшению интенсивности образования спайтов и джетов, что, в свою очередь – к понижению КНЧ-сигналов.

4.6. Отклик электротеллурического поля

Вариации электротеллурического поля и их связи с другими гелиогеофизическими явлениями изучались на пункте комплексных наблюдений (ПКН) “Карымшина” (Камчатский филиал Геофизической службы РАН), который находится в южной части полуострова Камчатка, примерно в 30 км от побережья Тихого океана (52.8° N, 158.15° E). ПКН расположена на значительном удалении от возможных источников антропогенных помех, что позволяет реализовать максимальную чувствительность регистрирующей аппаратуры.

На ПКН “Карымшина” регистрация электротеллурического потенциала (ЭТП) осуществляется на 6 диполях, относящихся к двум системам линий, ориентированных в направлениях север-юг (Φ_1, Φ_2, Φ_3) и запад-восток (Φ_4, Φ_5, Φ_6) (см. врезку на рис. 33). Диапазон регистрации ± 2 В, частота отсчетов 1 Гц, пороговая чувствительность геовольтметра ~ 30 мкВ, динамический диапазон регистрируемых сигналов не менее 102 дБ. Потенциал отсчитывается относительно углового датчика, обозначенного на схеме цифрой 0, для которого значение потенциала принято за 0.

Примером отклика ЭТП на возмущения магнитосферы и ионосферы вследствие проявлений солнечной активности являются имеющиеся на ПКН “Карымшина” записи солнечных вспышек (магнитных возмущений S_{FE}) и многочисленных магнитных бурь. На рис. 33 и 34, соответственно, приведены записи двух магнитных бурь 7–10 ноября 2004 г. и вспышечного события 06 ноября 2004 г., которое удачно совпало с периодом слабозвозмущенной геомагнитной обстановки и пришлось на близкое к локальному полудню время. Запись этой вспышки в геоэлектрическом поле на Камчатке, видимо, является единственной на территории России.

Во время магнитных бурь магнитные вариации индуцируют в любой проводящей среде электрические токи. Так как верхние слои земной коры обладают электрической проводимостью, то в них и возникают токи индуктивного характера. Магнитные бури практически всегда четко видны в записях ЭТП.

Возмущения ЭТП во время солнечных вспышек, как и эффект их воздействия на геомагнитное поле S_{FE} , проявляется в записях в виде всплеска или импульсного изменения продолжительностью в нескольких десятках минут. Как в геоэлектрическом, так и в геомагнитном полях эффект вспышки можно наблюдать только при спокойной геомагнитной обстановке в близкое к локальному полудню время. Коротковолновое электромагнитное излучение солнечной вспышки увеличивает проводимость ионосферы и временно изменяет нормальные ионосферные S_q -токи на обра-

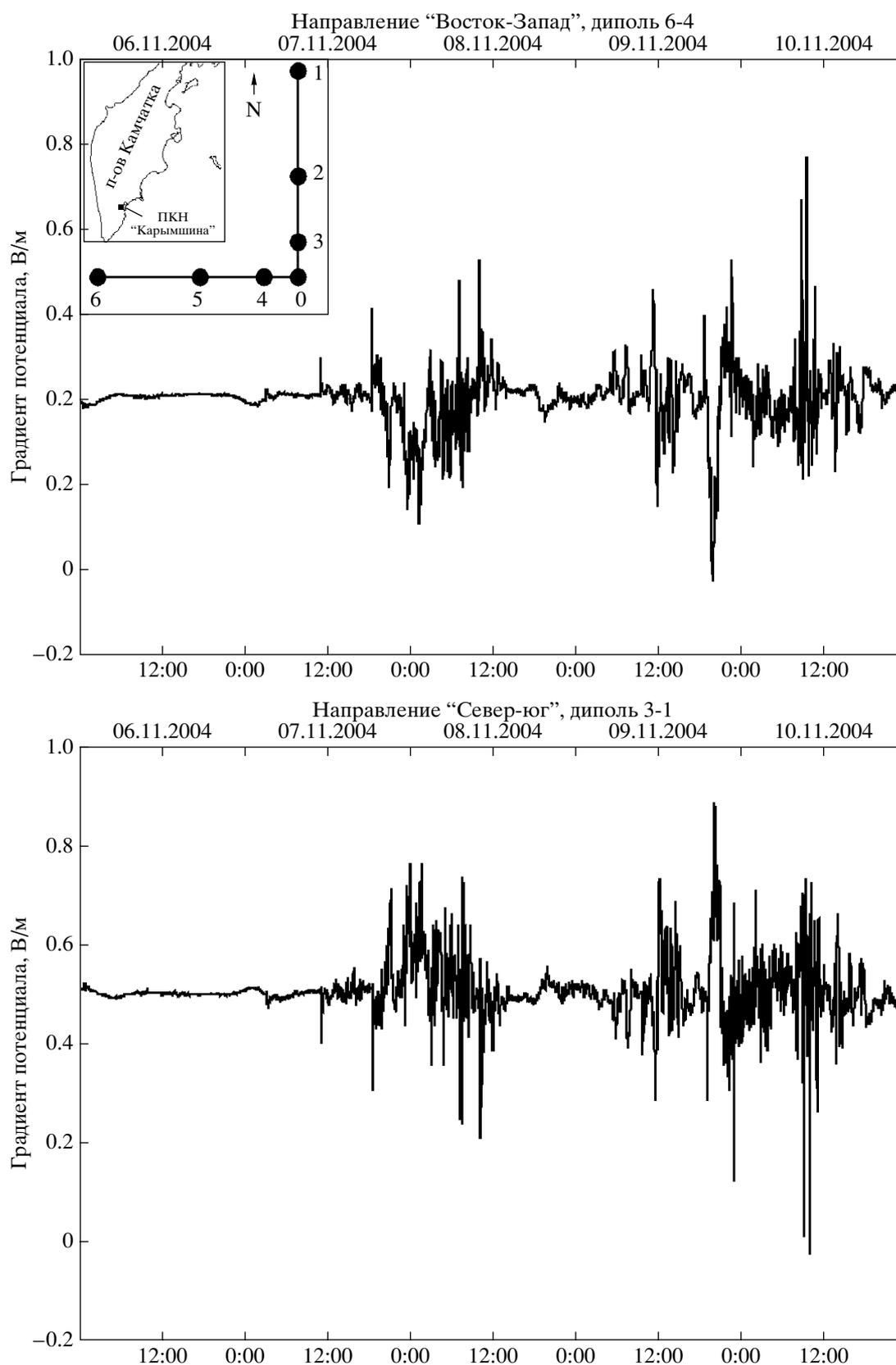


Рис. 33. Запись ЭТП двумя взаимно перпендикулярными диполями во время магнитных бурь 07–10.11.2004. Минутные осреднения градиентов. На врезке: Расположение электродов системы регистрации электротеллурических потенциалов на ПКН "Карымшина". Расстояния между электродами на схеме приведены в м

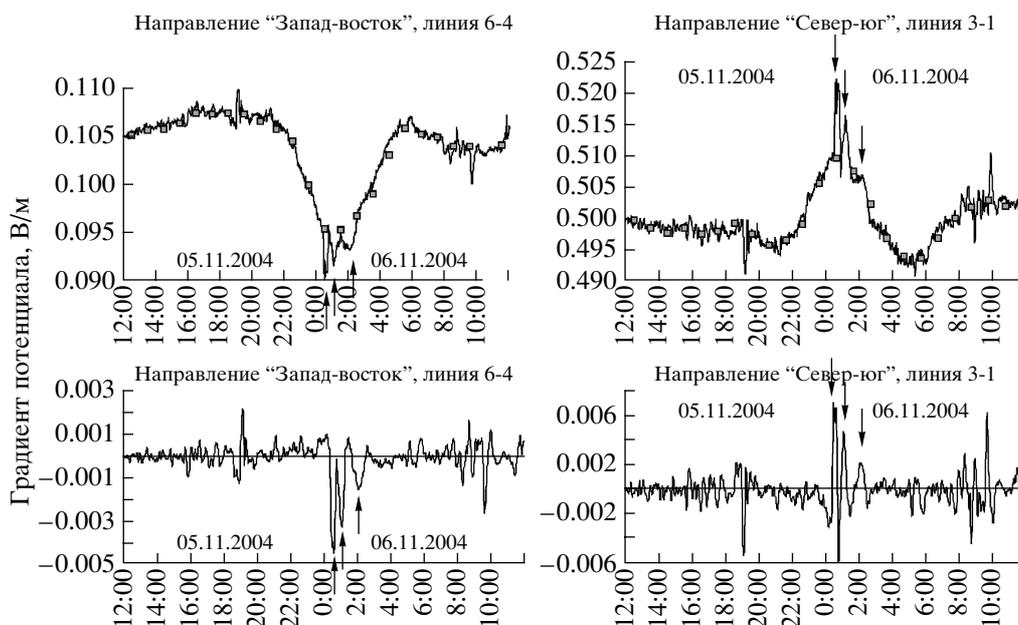


Рис. 34. Запись ЭТП двумя взаимно перпендикулярными диполями во время солнечных вспышек 06.11.2004 в 00:11–02:48 UT. Минутные осреднения градиентов ЭТП. На верхних графиках на фоне солнечно-суточной вариации зафиксированы три экстремума, соответствующих трем рентгеновским всплескам. (Часовые значения солнечно-суточной вариации отмечены точками). На нижних графиках – вариации ЭТП за тот же временной интервал при отфильтрованной солнечно-суточной вариации.

щенной к солнцу стороне Земли, параметрически воздействуя на ток в глобальной электрической сети, что в свою очередь влияет на электрические процессы в верхней части земной коры. Отклик ЭТП на солнечную вспышку имеет сложную природу и обусловлен, с одной стороны, индукционным эффектом, а с другой – временным изменением проводимости глобальной электрической цепи в период вспышки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из наблюдений за последние несколько лет, в текущем 23-м цикле Солнце приберегло главные сюрпризы на фазу его спада. Хотя максимум (по крайней мере, по числу солнечных пятен) пришелся на 2000 год, на Солнце в 2001–2003 годах наблюдалась сильная активность. Например, явления октября–ноября 2003 года по ряду параметров относятся к экстремальным [Веселовский и др., 2004; Панасюк и др., 2004; Ермолаев и др., 2005]. В настоящей статье мы собрали экспериментальный материал по наблюдениям Солнца, гелиосферы, магнитосферы и на Земле и сделали предварительный анализ для следующего по времени и силе возмущенности интервала, который сопровождался 8–10 ноября 2004 года сильнейшей геомагнитной бурей с $Dst = -373$ нТл. В работе не только приводится обширный и разнообразный экспериментальный материал по наблюдениям в различных областях, но и показыва-

ются возможные причинно-следственные связи между различными явлениями в сложной цепочке солнечно-земной физики.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 03-0246049, 03-51-6206, 04-2-16131, 04-0246152, 04-0247332, 05-0246228), Министерства образования и науки РФ (грант НШ 1445.2003.2), “Университеты России” (проект УР.02.02.509/05-1), INTAS (проект 03-51-3738), программ ООН РАН “Плазменные процессы в солнечной системе” и “Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследований”, программы РАН “Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля”, а также Slovak VEGA grant agency (project 4064). Авторы благодарны коллективам коронографа SOHO/LASCO, телескопа SOHO/EIT, спутников КОРОНАС-Ф, GOES, ACE, а также обсерваторий Биг Бэр и Медон и целого ряда наземных станций за данные, использованные в настоящей работе. Разностные изображения ВКМ получены на основе IDL программы, разработанной В.В. Гречневым (ИСЗФ, Иркутск).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- *Бейгман И.Л., Боженов С.А., Житник И.А., Кузин С.В., Толстихина И.Ю., Урнов А.М.* Солнечные спектры крайнего ВУФ-диапазона, полученные в ходе эксперимента СПИРИТ на борту ОС Коронас-Ф. I. Каталог линий в области 280–330 Å // Письма в Астрон. журн. Т. 31. № 1. С. 39–58. 2005.
- *Белов А.В., Гайдаш К.Г., Иванов С.П., Канониди Х.Д.* Необычно высокая геомагнитная активность в 2003 году // Космич. исслед. Т. 42. № 6. С. 563–573. 2004.
- *Белов А.В., Байсултанова Л.М., Ерошенко Е.А., Мавромичалаки Е., Пчелкин В.В., Янке В.Г.* Необычно большой магнитосферный эффект в космических лучах 20 ноября 2003 г. // Изв. РАН, Сер. физ. Т. 69. № 6. С. 857–860. 2005а.
- *Белов А.В., Е.А. Ерошенко, В.Г. Янке.* События октября–ноября 2003 г. в наземных наблюдениях космических лучей // Геомагнетизм и Аэрономия. Т. 45. № 1. С. 51–57, 2005б.
- *Бендат Д., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных. М.: “Мир”. 1989.
- *Веселовский К.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И.* и др., Солнечные и гелиосферные явления в октябре–ноябре 2003 г.: Причины и следствия // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 453–508. 2004.
- *Веселовский К.С., Ботмер Ф., Дмитриев А.В., Жуков А.К., Панасенко О.А., Ромашец Е.П., Руденко Г.В., Яковчук О.С.* Трансэкваториальный корональный выброс массы и связанное с ним мощное геоэффективное возмущение в ноябре 2004 г. // Астрономический Вестник, 2005.
- *Власов В.И.* Скорость межпланетных ударных волн по радиоастрономическим данным // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 28. С. 1–8. 1988.
- *Дарчиева Л.А., Иванова Т.А., Сосновец Э.Н., Тверская Л.В.* Динамика экваториальных и полярных границ проникновения солнечных протонов с энергией >1 МэВ в магнитосферу во время сильной магнитной бури // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 30. № 5. С. 856–858. 1990.
- *Ермаков В.К., Стожков Ю.И., Свиржевский К.С.* Основные источники ионизации атмосферы // Сб. трудов 5-й Российской конференции по атмосферному электричеству, 21–26 сентября 2003 г. Владимир, т. 1. г. Владимир: Изд-во ВГУ, С. 63–65. 2003.
- *Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю.* О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976–2000 годов. 3 // Космич. исслед. Т. 41. № 6. С. 539. 2003.
- *Ермолаев Ю.И., Зеленый Л.М., Застенкер Г.К.* и др. Солнечные и гелиосферные возмущения, приведшие к сильной магнитной буре 20 ноября 2003 года // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 1. С. 23–50. 2005.
- *Еселевич М.В., Еселевич В. Г.* Спорадические потоки плазмы и их источники в период чрезвычайной активности Солнца с 26 октября по 6 ноября 2003 г. // Космич. исслед. Т. 42. № 6. С. 1–13. 2004.
- *Клейменова Н.Г., Козырева О.В.* Пространственно-временная динамика геомагнитных пульсаций P13 и Pc5 во время экстремальных магнитных бурь в октябре 2003 года // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 45. № 1. С. 71. 2005.
- *Козлов В.И., Туголуков Н.Н.* Мерцания интенсивности космических лучей. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. № 3. С. 153–159. 1992.
- *Кузнецов С.Н., Богомолов А.В., Гордеев Ю.П.* и др. Предварительные результаты эксперимента, проводимого с помощью комплекса аппаратуры СКЛ на ИСЗ “КОРОНАС-И” // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 59. С. 2–6. 1995.
- *Митра А.* Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: “Мир”. 370 с. 1977.
- *Морозов В.Н.* Расчет электрических полей грозных облаков для инициирования электрических разрядов облако-верхние слои атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 42. № 1. С. 121–129. 2002.
- *Муллаяров В.А., Козлов В.И.* и др. Проявление вариаций космических лучей в грозной активности // Сб. трудов 5-й Российской конференции по атмосферному электричеству, 21–26 сентября 2003 г. Владимир, т. 1. г. Владимир: изд-во ВГУ. С. 60–62. 2003.
- *Ораевский В.Н., Собельман И.И., Житник И.А., Кузнецов В.Д.* Комплексные исследования активности Солнца на спутнике КОРОНАС-Ф: новые результаты II Успехи физ. наук. Т. 172. № 8. С. 949–959. 2002.
- *Панасюк М.И., Кузнецов С.К., Лазутин Л.Л.* и др. Магнитные бури в октябре 2003 года // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 509–554. 2004.
- *Пархомов В.А.* Геомагнитные пульсации, связанные с гамма-излучением солнечных вспышек // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 32. С. 130. 1992.
- *Пудовкин М.И., Зайцева С.А., Олиференко И.П.* Магнитное поле вспышечного потока // Изв. АН СССР. Сер. физ. Т. 41. № 2. С. 242–251. 1977.
- *Ремизов Л.Т.* Естественные радиопомехи. М.: Наука. 200 с. 1985.
- *Ролдугин В.К., Белоглазое М.И.* и др. О наблюдениях атмосферного электричества на Кольском полуострове // Сб. трудов 5-й Российской конференции по атмосферному электричеству, 21–26 сентября 2003 г. Владимир, т. 1. г. Владимир: Изд. ВГУ. С. 130–133. 2003.
- *Туголуков КН., Козлов В.И.* Связь мерцаний интенсивности космических лучей с параметрами солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия Т. 31. № 4. С. 715–716. 1991.
- *Чашей КВ., Шишов В.И.* О влиянии турбулентности на распространение межпланетных ударных волн // Письма в Астрон. журн. Т. 21. С. 716–720. 1995.
- *Черток И.М., Слемзин В.А., Кузин С.В., Гречнев В.В., Бугаенко О.И., Житник И.А., Игнатьев А.П., Перцов А.А.* Солнечное эруптивное событие 4 ноября 2001 г. по данным телескопа СПИРИТ на спутнике КОРОНАС-Ф // Астрон. Журнал Т. 81. № 5. С. 447–58. 2004.
- *Черток ИМ.* Крупномасштабная активность в солнечных мощных эруптивных событиях ноября 2004 г. по данным УФ телескопа SOHO/EIT // Астрон. журн., 2005.

- Akasofu S.-I., Olmsted C., Smith E.J., Tsurutani B., Okida R., Baker D.N. Solar wind variations and geomagnetic storms: A study of individual storms based on high time resolution ISEE-3 data // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90. P. 325.
- Baisultanova L., Belov A., Yanke V. Magnetospheric effect of cosmic rays within the different phases of magnetic storms // *Proc 24-th ICRC.* 4. C. 1090–1094, 1995.
- Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A., Struminsky A.B., Yanke V.G. What determines the magnitude of Forbush decreases? // *Adv. Space Res.* V. 27. № 3. P. 625–630. 2001.
- Bogod V.M., Tokhchukova S.Kh. Peculiarities of the Microwave Emission from Active Regions Generating Intense Solar Flares // *Astronomy Letter.* V. 29. P. 263–273. 2003.
- Bogod V.M., Gelfreikh G.B., Drago F.Ch., Maximov V.P., Nindos A., Kaltman T.L., Ryabov B.I., Tokhchukova S.Kh. Analysis of polarized microwave emission of Flare-Productive Active Region 9415 // *astro-ph/0309444*, 2003.
- Bothmer V., Veselovsky I.S., Dmitriev A.V., Zhukov A.N., Cargill P., Romashets E.P., Yakovchouk O. Solar and heliospheric reasons for geomagnetic perturbations during the growth phase of the solar cycle 23 // *Solar System Research.* V. 36. P.498–505. 2002.
- Cane H.V., McGuire R.E., Von Rosenvince T.T. Two classes of solar energetic particle events associated with impulsive and long-duration soft X-ray flares // *The Astrophysical Journal.* V. 301. P. 449. 1986.
- Cane H.V., Richardson I.G. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996–2002 // *J. Geophys. Res.* V. 108. P. SSH 6-1 (*J. Geophys. Res.*, 108(A4), 1154, doi: 10.1029/2002JA009817) 2003.
- Cole D.G. Space weather: its effects and predictability // *Space Science Reviews.* V. 107. № 1–2. P. 295–302. 2003.
- Crooker N.U. Solar and Heliospheric Geoeffective Disturbances // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* V. 62. № 12. P. 1071. 2000.
- Daglis I.A., Kozyra J. U., Kamide Y., Vassiliadis D., Sharma A.S., Liemohn M.W., Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Lu G. Intense space storms: Critical issues and open disputes // *Journal of Geophysical Research* V. 108(A5), 1208, doi: 10.1029/2002JA009722, 2003.
- DalLago A., Viera L.E.A., Echer E., Gonzalez W.D., De Gonzalez A.L.C., Guarnieri F.L., Schuch N.J., Schwenn R. Comparison between halo CME expansion speeds observed on the sun, the related shock transit speeds to Earth and corresponding ejecta speeds at 1AU // *Solar Phys.* V. 222. P. 328. 2004.
- Dmitriev A.V., Crosby N.B., Chao J.-K. Interplanetary sources of space weather disturbances in 1997 to 2000 // *Space Weather* V. 3, S03001, doi: 10.1029/2004SW000104. 2005.
- Dryer M. Interplanetary Shock Waves Generated by Solar Flares // *Space Sci. Rev.* V. 15. P. 403–437. 1974.
- Echer E., Gonzalez W.D. Geoeffectiveness of interplanetary shocks, magnetic clouds, sector boundary crossings and their combined occurrence // *Geophysical Research Letters.* V. 31. № 9. 2004.
- Eselevich V.G., Fainshtein V.G. An investigation of the relationship between the magnetic storm *Dst* – index and different types of solar wind streams // *Ann. Geophysicae.* V. 11. P. 678. 1993.
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms // *Space Science Review.* V. 88. P. 529. 1999.
- Gonzalez W.D., Dal Lago A., Clua de Gonzalez A.L., Vieira L.E.A., Tsurutani B.T. Prediction of peak-Dst from halo CME/magnetic cloud-speed observations // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* V. 66. № 2. P. 161–165. 2004.
- Kane R.P. How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? // *J. Geophys. Res.* V.I 10. A02213, doi: 10.1029/2004JA010799. 2005.
- Kuzin S.V., Zhitnikl A., Bozhenkov S.A., et al. Diagnostic of solar corona plasma by means of EUV spectroheliograph RES-C on CORONAS-F spacecraft // *Advances in Space Research*, 2005.
- Kuznetsov S.N., Kudela K., Ryumin S.P., Gotselyuk Y.V. CORONAS-F satellite – tasks for study of particle acceleration // *Adv. Sp. Res.* V. 30. P. 1857–1863. 2002.
- Li X., Temerin M.A. The electron radiation belt // *Space Sci. Rev.* V. 95. P. 569–580. 2001.
- Lyatsky W., Tan A. Solar wind disturbances responsible for geomagnetic storms // *J. Geophys. Res.*, 108(A3), 1134, doi: 10.1029/2001JA005057, 2003.
- Maltsev Y.P. Points of controversy in the study of magnetic storms // *Space Science Reviews* V. 110. № 3–4. P. 227–277. 2004.
- Moldavanov, A. V. Stratospheric discharges during solar gamma flares // *J. Phys. D: Appl. Phys.* V. 36. P. L1–L4. 2003.
- Motoba T., Kikuchi T., Luhr H. et al. Global Pc5 caused DP2 – type ionospheric current system // *J. Geophys. Res.* V. 107. № A2. 1029/2001JA900156. 2002.
- Parker E.N. Sudden Expansion of the Corona Following a Large Solar Flare and the Attendant Magnetic Field and Cosmic-Ray Effects. // *ApJ.* V. 133. P. 1014–1025. 1961.
- Richardson I.G., Cliver E.W., Cane H.V. Sources of geomagnetic storms for solar minimum and maximum conditions during 1972–2000 // *Geophys. Res. Lett.* V. 28 P. 2569. 2001,
- Schwenn R., Dal Lago A., Huttunen E., Gonzalez W.D. The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth // *Annales Geophysicae* V. 23 P. 1033–1059. 2005.
- Sheeley N.R., Jr., Howard R.A., Koomen M.J., Michels D.J., Schwenn R. Doppler scintillation observations of interplanetary shocks within 0.3 AU // *J. Geophys. Res.* V. 90. P. 154. 1985a.
- Sheeley N.R., Jr., Howard R.A., Koomen M.J., Michels D.J. Coronal mass ejection and interplanetary shock // *J. Geophys. Res.* V. 90. P. 163. 1985b.
- Tokhchukova S.Kh., Bogod V.M. Detection of the Long-Term Microwave “Darkening” Before the 14 July 2000 Flare // *Solar Physics.* V. 212. № 1. P. 99–109. 2003.
- Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Tang F., Lee Y.T. Greaty magnetic storm // *J. Geophys. Res.* V. 93. P. 8519. 1988.

- *Veselovsky I.S., Bothmer V., Carrigill P., Dmitriev A.V., Ivanov K.G., Romashets E., Zhukov A.N., Yakovchouk O.S.* Magnetic storm cessation during sustained northward IMF // *Adv. Space. Res.* 2005.
- *Williams D.J., Arens J.F., Lanzerotti L.J.* Observations of trapped electrons at low and high altitudes // *J. Geophys. Res.* V. 73 P. 5673–5696. 1968.
- *Wu Chin-Chun, Lepping R.P.* Effect of solar wind velocity on magnetic cloud-associated magnetic storm intensity // *J. Geophys. Res.* V 107. P. S5H 3-1. (*J. Geophys. Res.*, 107(A11), 1346, doi: 10.1029/2002JA009396) 2002.
- *Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu., Zastenker G.N., Zelenyi L.M., Petrukovich A.A., Sauvaud J.-A.* Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on solar and interplanetary events: a review // *Planetary and Space Science* V.53. № 1–3. P. 189–196. 2005.
- *Yurchyshyn V.* Coronal and Interplanetary Magnetic Fields in Coronal Ejecta in October–November 2004 // *RHESI/ SOHO/ TRACE Workshop: Coordinated observations of flares and CMEs*, Sonoma, California, December 8–11, 2004. (<http://sprg.ssl.berkeley.edu/RHESI/rst/abstracts/yurchyshyn.txt>) 2004.
- *Zhukov A.N., Van der Linden R., Vanlommel P., Clette F., Robbrecht E., Berghmans D., Nicula B., Wauters L.* Solar and interplanetary sources of severe geomagnetic storms in November 2004. // *First European Space Weather Week, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, 29 November–4 December 2004* (<http://www.congrex.nl/04c27/4>) 2004.
- *Zlotnik E. Ya.* About prevalence of ordinary wave in microwave emission of solar active regions // *Radiophysics and Quantum Electronics.* V. 44. P. 53–61. 2001.