

УДК 523.62

СОЛНЕЧНЫЕ И ГЕЛИОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ОКТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2003 г.: ПРИЧИНЫ И СЛЕДСТВИЯ

© 2004 г. И. С. Веселовский¹, М. И. Панасюк¹, С. И. Авдюшин², Г. А. Базилевская³,
А. В. Белов⁴, С. А. Богачев³, В. М. Богод⁵, А. В. Богомолов¹, В. Ботмер⁶, К. А. Боярчук⁴,
Э. В. Вашенюк⁷, В. И. Власов⁸, А. А. Гнездилов⁴, Р. В. Горгуца⁴, В. В. Гречнев⁹,
Ю. И. Денисов¹, А. В. Дмитриев^{1, 10}, М. Драйер¹¹, Ю. И. Ермолаев¹², Е. А. Ерошенко⁴,
Г. А. Жеребцов⁹, И. А. Житник³, А. Н. Жуков^{1, 13}, Г. Н. Застенкер¹², Л. М. Зеленый¹²,
М. А. Зельдович¹, Г. С. Иванов-Холодный⁴, А. П. Игнатьев³, В. Н. Ишков⁴,
О. П. Коломийцев⁴, И. В. Крашенинников⁴, К. Кудела¹⁴, Б. М. Кужевский¹, С. В. Кузин³,
В. Д. Кузнецов⁴, С. Н. Кузнецов¹, Виктория Г. Курт¹, Л. Л. Лазутин¹, Л. Н. Лещенко⁴,
М. Л. Литвак¹², Ю. И. Логачев¹, Г. Лоуренс¹³, А. К. Маркеев⁴, В. С. Махмутов³,
А. В. Митрофанов³, И. Г. Митрофанов¹², О. В. Морозов¹, И. Н. Мягкова¹, А. А. Нусинов²,
С. Н. Опарин³, О. А. Панасенко¹, А. А. Перцов³, А. А. Петрукович¹², А. Н. Подорольский¹,
Е. П. Ромашев⁴, С. И. Свертилов¹, П. М. Свидский², А. К. Свиржевская³, Н. С. Свиржевский³,
В. А. Слемзин³, З. Смит¹¹, И. И. Собельман³, Д. Е. Соколов⁴, Ю. И. Стожков³, А. В. Суворова¹,
Н. К. Суходрев³, И. П. Тиндо³, С. Х. Тохчукова¹⁵, В. В. Фомичев⁴, И. В. Чашей⁹,
И. М. Черток⁴, В. И. Шишов⁹, Б. Ю. Юшков¹, О. С. Яковчук¹, В. Г. Янке⁴

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ
(veselov@dec1.sinp.msu.ru)

² Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова, г. Москва

³ Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва

⁴ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, г. Троцк

⁵ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, г. Нижний Архыз

⁶ Институт исследования солнечной системы им. Макса Планка, Катленбург-Линдау, Германия

⁷ Полярный геофизический институт Кольского филиала РАН, г. Апатиты

⁸ Радиоастрономическая станция АКЦ ФИАН, г. Пуццано

⁹ Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

¹⁰ Институт космических исследований, Чонгли, Тайвань

¹¹ Центр по исследованию космической среды, Булдер, США

¹² Институт космических исследований РАН, г. Москва

¹³ Королевская обсерватория Бельгии, Брюссель

¹⁴ Институт экспериментальной физики САН, Кошице, Словакия

¹⁵ Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулково

Поступила в редакцию 19.05.2004 г.

Представлен новый наблюдательный материал о явлениях экстремально высокой активности на Солнце и в гелиосфере, имевших место в октябре–ноябре 2003 г. По целому ряду солнечных и гелиосферных параметров рассматриваемый интервал времени является уникальным за все время наблюдений. На основе этой информации и сравнения с другими подобными ситуациями в прошлом, а также с использованием имеющихся теоретических представлений обсуждаются возможные причинно-следственные связи между наблюдаемыми процессами. Статья содержит первые результаты и выводы, полученные коллаборацией “Солнечные экстремальные события – 2003”, созданной в России для детального исследования этих событий. Проведенное рассмотрение не оставляет сомнений в том, что физические причины солнечных и гелиосферных явлений в октябре–ноябре 2003 г. не являются исключительно локальными и относящимися лишь к активным областям и солнечной атмосфере над ними. Энергетические резервуары и движущие силы этих процессов носят более глобальный характер и во многом скрыты от наблюдателя, поскольку в конечном счете их источники лежат в подфотосферных слоях Солнца, где иногда могут происходить и действительно происходят достаточно быстрые, неожиданные и трудно предсказуемые изменения. Солнечные пятна могут служить неплохими трассерами этих внезапных изменений и перестроек на Солнце, хотя можно указать и другие диагностические признаки в параметрах магнитных полей, движений вещества и характеристиках излучений.

1. ВВЕДЕНИЕ

Цель данной статьи состоит в том, чтобы представить и обсудить новый наблюдательный материал о разнообразных явлениях экстремально высокой активности на Солнце и в гелиосфере, имевших место в октябре–ноябре 2003 г. Сопоставив этот материал с известными ранее фактами, можно найти определенные черты сходства и различия с другими подобными периодами в нескольких прошлых циклах солнечной активности, что дает возможность рассмотреть как твердо установленные закономерности, так и гипотезы о природе этих явлений и об их влиянии на процессы в околоземном космическом пространстве.

Ниже приводится информация о наблюдавшихся явлениях на Солнце и в гелиосфере на спаде 23-го солнечного цикла в октябре–ноябре 2003 г. В это время произошло быстрое развитие глобальной и локальной активности, наблюдаемой на всей поверхности Солнца и над ней. Самые заметные изменения и мощные активные области были сосредоточены в основном на одной стороне Солнца, наиболее полно обращенной к Земле около 26.X и 18.XI. В октябре–ноябре были зарегистрированы очень мощные корональные выбросы массы (КВМ или СМЕ) и многочисленные солнечные вспышки, в том числе самого высокого рентгеновского балла. Некоторые сложные плазменные и магнитные возмущения, образовавшиеся после этого в солнечном ветре, достигали Земли и воздействовали на магнитосферу, а другие прошли мимо нее. Серия КВМ, зарегистрированных 28–30.X приборами на космических обсерваториях *SOHO* и *Коронас-Ф* вблизи центрального меридиана Солнца около активной области 10486, явилась непосредственной причиной межпланетных транзитов и ударных волн, достигших Земли через 1–2 суток и принесших вместе с собой сильные электрические поля и токи. Именно это и привело к развитию геомагнитных бурь в три этапа 29–31.X. Спустя почти один оборот Солнца, 20.XI произошла другая сильная геомагнитная буря, на этот раз одиночная. Она была инициирована приходом к Земле одиночного КВМ из тех же участков Солнца 18.XI. Поэтому данное геомагнитное возмущение следует квалифицировать и как рекуррентное, и как спорадическое возмущение одновременно. Другие события на Солнце в рассматриваемый промежуток времени оказались не столь эффективными в смысле возбуждения геомагнитных бурь либо из-за расположения их источников на Солнце вдали от центрального меридиана, либо из-за геометрии гелиосферных магнитных полей, имевших в это время преимущественно положительную северную составляющую. Например, мощнейшее эруптивное явление 4.XI с КВМ, рекордной рентгеновской вспышкой и огромной постэруптивной аркадой на западном лимбе породило лишь относительно слабое геомагнитное возмущение. Од-

нако ускорение заряженных частиц до очень высоких энергий и сопровождавшее его мощное электромагнитное и нейтронное излучение уверенно зарегистрировано для этого и ряда других событий в указанный промежуток времени как на Земле, так и на различных космических аппаратах.

Введение, дискуссия, выводы статьи написаны И.С. Веселовским, им же при содействии других соавторов составлен окончательный текст. Идея создания коллаборации для исследования солнечно-земных связей во время рассматриваемого сильно возмущенного периода времени и для написания данной статьи, а также руководство обсуждениями на научных семинарах и совещаниях, посвященных этим вопросам, принадлежат М.И. Панасюку. Подготовка содержания всех разделов статьи осуществлялась как индивидуально отдельными авторами и группами, так и совместно на основе материалов, представленных различными институтами. Необходимо особо отметить основной вклад сотрудников ИЗМИРАН в разделы 2, 7, 14. САО и ГАО РАН внесли главный вклад в раздел 6. Следует подчеркнуть, что в такой многоплановой статье с большим числом соавторов могут содержаться результаты, интерпретационные утверждения и выводы, которые разделяются не всеми участниками коллаборации, а отражают точку зрения отдельных авторов и групп. Авторы не считали нужным обходить стороной такие дискуссионные моменты, но стремились выработать на них единый взгляд насколько это возможно. Тем не менее, первый автор отвечает за все возможные ошибки и неточности в этом отношении.

2. СРАВНИТЕЛЬНОЕ РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ОПИСАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ РАССМАТРИВАЕМОГО ПЕРИОДА

События, в чем-то похожие на рассматриваемые в данной статье, произошли и на ветви спада 20 цикла солнечной активности в августе 1972 г. В это время за короткий период (2.VIII, 4.VIII и 7.VIII) наблюдались четыре очень сильных солнечных вспышки (класса 2В и 3В) и к Земле пришли три сильных межпланетных ударных волны. Эти события были одними из первых с начала космической эры, сравнительно хорошо документированных по прямым измерениям в межпланетной среде, в том числе, в первую очередь, по данным ИСЗ “Прогноз” и “Прогноз-2”, а также *HEOS-2* и *КА Pioneer 9* [1]. При анализе полученного в 1972 г. набора данных основное внимание было обращено на определение характеристик ударных волн – их формы, мгновенной и средней скорости, характера замедления, поведения параметров солнечного ветра и ММП на фронтах и за ними. Также важнейшим достижением этого анализа было получение оценки энергии каждой из ударных волн (потенциальной, кинетической, тепловой, магнитной), выделившейся в ходе вспышки в виде выброса определенной массы

вещества в межпланетную среду. Для вспышки 4.VIII.72 были получены рекордные оценки – поток энергии около $100 \text{ эрг/см}^2 \text{ с}$, выброшенная масса около 10^{17} г , выброшенная энергия около 10^{33} эрг . В этом аспекте, вследствие уже упоминавшегося сбоя в работе приборов на нескольких космических аппаратах и ряда других ограничений, сделать аналогичные оценки для событий октября–ноября 2003 г. будет несколько сложнее. События августа 1972 г. были также множественными во времени (вся последовательность из четырех мощных вспышек развернулась на интервале 3 суток), как и события конца октября 2003 г., но, конечно, они были гораздо хуже изучены в части наблюдений Солнца (тогда еще не было наблюдений СМЕ на внеземном коронографе и т.д.). Наиболее близкая аналогия может быть отмечена между вспышкой 4.VIII.1972 в 06.21 UT и вспышкой 28.X.2003 в 10.02 UT. В первом событии к Земле через 14.5 часов пришла ударная волна, после которой скорость солнечного ветра возросла до $\sim 2000 \text{ км/с}$, а плотность – до $\sim 30 \text{ см}^{-3}$. Во втором событии через 19 часов к Земле пришла ударная волна, скорость ветра после которой возросла до $2100\text{--}2400 \text{ км/с}$, а плотность – до $\sim 15 \text{ см}^{-3}$. Дальнейшие исследования позволят углубить эту аналогию как в части солнечного происхождения межпланетного возмущения, так и в части его “геоэффективности”.

Солнечная активность во всех ее проявлениях испытывает регулярные циклические и нерегулярные хаотические вариации в весьма широком диапазоне амплитуд, длительностей и других характеристик, которые проявились определенным образом и в рассматриваемый нами промежуток времени. Не являя исключением из этого общего правила корональные выбросы массы и вспышки, которые представляют собой не причину и следствие по отношению друг к другу, как иногда необоснованно полагают, а лишь две наблюдаемые стороны единого диссипативного процесса, связанного с увеличенным выносом свободной энергии из недр Солнца наружу в его верхнюю атмосферу и гелиосферу (см., например, дискуссию и ссылки в работе [2]). Эта свободная энергия перераспределяется определенным образом в тепловой, магнитной, кинетической, гравитационной и излучательной формах, причем их относительная доля изменяется от случая к случаю в зависимости от ситуации, задаваемой граничными условиями и начальными данными.

Известно, что периоды, когда резко возрастает вспышечная и эруптивная активность Солнца, как правило, наблюдаются в годы вблизи максимумов солнечного цикла, определяемых, как обычно, по солнечным пятнам. Довольно часто именно на это время приходится наибольшая концентрация мощных вспышек и эрупций за весь цикл. При этом появляется одна или две-три мощных и быстро развивающихся активных области, являющихся рекордными по производству вспышек и КВМ и обеспечивающих самое мощное вы-

деление энергии в цикле. Иногда эти периоды приходится на первые годы спада после солнечного максимума. Примерами могут служить известные события ноября 1960 г. в 19 цикле, августа 1972 г. в 20 цикле, июня–июля 1982 г. в 21 цикле. Так случилось и в текущем 23-м цикле. Однако о каких-либо твердо установленных эмпирических правилах без исключений здесь говорить пока не приходится из-за малой статистики наблюдений и большой неустойчивости всех циклических проявлений на Солнце. Так, в 22-м цикле самые мощные вспышки произошли в фазе максимума (март 1989 г., июнь 1991 г.), а на спаде цикла после ноября 1992 г. не произошло ни одной вспышки балла X.

Эти хорошо известные факты указывают на существование довольно сильных и неустойчивых квазидвухлетних вариаций, приводящих к немонотонному поведению и так называемому провалу Гневыхшева, то есть к двугорбым максимумам активности. Ниже приводится несколько более подробное сравнительное описание вспышечных событий на Солнце за последнее время с целью указать обычные и специфические условия в этом отношении.

Для сравнения вспышечной производительности активных областей было бы весьма полезно иметь длительные ряды абсолютно калиброванных измерений энергии и мощности. За их отсутствием иногда используют индекс XRI, введенный П. Мак-Интошем (<http://www.jps.gov.au/Main.php?CatID=8>) [3], который определяется по суммарной мощности всех вспышек баллов X и M в мягком рентгеновском диапазоне ($1\text{--}12.5 \text{ кэВ}$). Вспышки балла X берутся с единичным весом (например, вспышка балла X1.5 дает значение 1.5), а вспышки балла M дают значения на порядок меньше (например, вспышка балла M3.2 дает значение 0.32). Наибольший за все время наблюдения Солнца в данном диапазоне (с 1970 г. по октябрь 2003 г.) получили две активные области 22 цикла солнечной активности: это активные области AO 6659 июня 1991 г. (>86.5) и AO 5395 марта 1989 г. (>55.5). Для рассматриваемого здесь промежутка времени в октябре–ноябре 2003 г. оцениваемый индекс XRI составлял 5.73 для AO 10484. Он был в пределах от >62.56 (с учетом порога насыщения) до 73.06 (если балл X28) для AO 10486 и достигал значения 8.57 для AO 10488.

Необходимо отметить, что приборы, установленные на различных ИСЗ серии *GOES* для измерения потока мягкого рентгеновского излучения в указанном диапазоне, имели разный порог насыщения. В этом случае рентгеновский балл определяется для вспышек несколько условно – пропорционально времени запираания прибора. До 1976 года порог насыщения приборов соответствовал рентгеновскому баллу X5.1 и поэтому знаменитые вспышки 4 и 7.VIII.1972 г. имели формальный балл $X > 5.1$. До начала работы гео-стационарного спутника *GOES-9* (апрель 1996 г.)

порог соответствовал рентгеновскому баллу X12.5, а после, в 23 солнечном цикле порог вырос до X17.5. Поэтому более объективно было бы характеризовать рентгеновский балл таких вспышек с насыщением не только пороговым значением прибора, но и длительностью промежутка времени записи прибора. Экстраполяция рентгеновского потока для очень сильных вспышек с длительным насыщением вряд ли оправдана.

Тем не менее, вероятно, что при такой оценке самыми интенсивными за все время наблюдения были рентгеновские вспышки 1 и 6.VI.1991 г. Время записи прибора достигало 26 мин, а еще у трех вспышек этой же активной области оно было ≥ 17 мин. Это хорошо понимали исследователи, первыми получившие информацию об этих вспышках, и для всех них был оставлен балл $X > 12.5$ с указанием времени записи рентгеновского фотометра [4]. К сожалению, в литературе не для каждой мощной вспышки можно найти эти данные, и в большинстве случаев для таких вспышек указывается оценочный рентгеновский балл.

Текущий 23 цикл солнечной активности по всем своим характеристикам относится к циклам средней величины. За 7.5 лет его развития зарегистрировано всего четыре вспышки с рентгеновским баллом $X \geq 10$, тогда как только в июне 1991 г. их было пять. Три из четырех вспышек произошли в период наибольшей концентрации вспышечной активности текущего цикла 19.X–5.XI.2003 г., когда видимый диск Солнца проходили сразу три больших вспышечно-активных группы солнечных пятен: одна в южном полушарии, самая большая по площади группа пятен в текущем цикле солнечной активности (номер 10486), и две – в северном (номера 10484 и 10488).

Вспышечно-активный период в октябре–ноябре 2003 г. начался с появления из-за восточного лимба (17.X) и бурного развития в первые дни группы пятен AR10484 (N05L353 – второй оборот АО 10464), в которой на второй день (19.X) произошла первая вспышка балла X1.1/1N. До 26.X в указанной области наблюдались только вспышки средних баллов не выше M. 26.X, после всплытия нового мощного магнитного потока, увеличившего площадь AR10484 до 1700 миллионов долей солнечной полусферы (м.д.с.п.), в ней произошли еще две большие вспышки (X1.2/2N и M7.6/2N), после чего 29.X она в полном развитии ушла за западный лимб Солнца. Наблюдения с достаточно высоким пространственным и временным разрешением, выполненные наземными и космическими обсерваториями *Коронас-Ф* (орбита: высота 507 ± 21 км, наклонение 82.5° , период обращения 94.5 мин), *SOHO*, *TRACE* и сделанные по ним фильмы позволяют хорошо проследить за развитием активных областей, изменениями яркости и движениями в солнечной атмосфере на всех уровнях от фотосферы вплоть до самых верхних участков солнечной короны.

Мощные КВМ сопутствовали этим явлениям и распространялись в гелиосфере. Последствия некоторых из этих событий в смысле прихода к Земле потоков солнечного ветра и магнитных облаков с нужной ориентацией поля для возбуждения сильных геомагнитных бурь и ускоренных частиц оказались не всегда столь впечатляющими как для других подобных событий. Это произошло по чисто геометрическим причинам из-за особенностей в расположении и преимущественно северной ориентации поля в это время. Однако в других случаях эти условия были выполнены. Тогда на Земле наблюдались мощные потоки энергичных частиц и сильные геомагнитные бури.

Временной ход коротковолнового излучения Солнца в период максимальной активности Солнца в октябре 2003 года представлен на рис. 1 в трех диапазонах спектра: $175 \pm 3 \text{ \AA}$, $8.42 \text{ \AA}$ (по данным *Коронас-Ф/СПИРИТ*) и $1\text{--}8 \text{ \AA}$ (по данным *GOES*). Графики показывают хорошее подобие, хотя и имеются существенные отличия. Например, довольно сильные вспышки 22 и 26.X, зарегистрированные в диапазоне $175 \text{ \AA}$, в более жесткой области спектра проявились гораздо слабее.

После выхода (21.X) на видимый диск Солнца активной области АО 10486 (S16 L286), которая развилась в большую группу пятен еще на невидимой стороне Солнца, уже 23.X в ней произошли вспышки балла X5.4/1B и X1.1/1N, а 24.X – вспышка балла M7.6/1N. 24–25.X в этой активной области произошло первое наблюдаемое всплытие мощного магнитного потока, увеличившего площадь группы пятен на 800 м.д.с.п. ($S_p = 2200$ м.д.с.п.), следствием чего явились вспышки балла X1.2/3B (26.X), M5.0/1F и M6.7/1F (27.X). Всплытие следующего нового магнитного потока (27–28.X), увеличившего площадь группы пятен до рекордного для текущего цикла значения – $S_p = 2610$ м.д.с.п., позволило осуществиться вспышке X17.2/4B 28.X. Поток излучения в линии MgXII , $8.42 \text{ \AA}$, измеренный по данным СПИРИТ, составил $1.3 \cdot 10^{-2}$ эрг/см² с. Спектральная плотность потока, с учетом ширины спектральной полосы наблюдения в этом канале $\sim 5 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$, почти на порядок превышает значение, полученное по данным *GOES* ($1.7 \text{ эрг/см}^2 \text{ с}$). Распространяющиеся гелиосферные возмущения от предыдущих эруптивных событий, достигнув Земли, вызвали магнитную бурю 28.X, которая с приходом возмущения от последнего КВМ развилась до очень сильной ($G5$, $|D_{st}| > 200$ нТл), одной из самых больших магнитных бурь текущего солнечного цикла. От этой же эруптивной вспышки в околоземное космическое пространство пришли высокоэнергичные солнечные протоны и вызвали в нем протонное событие класса S4 (29500 pfu (число протонов с энергиями > 10 МэВ через 1 см^2 за 1 с в стерадиане)).

Следующий период сильного эруптивного и вспышечного энерговыделения в данной активной области начался 2.XI вспышкой балла X8.3/2B и

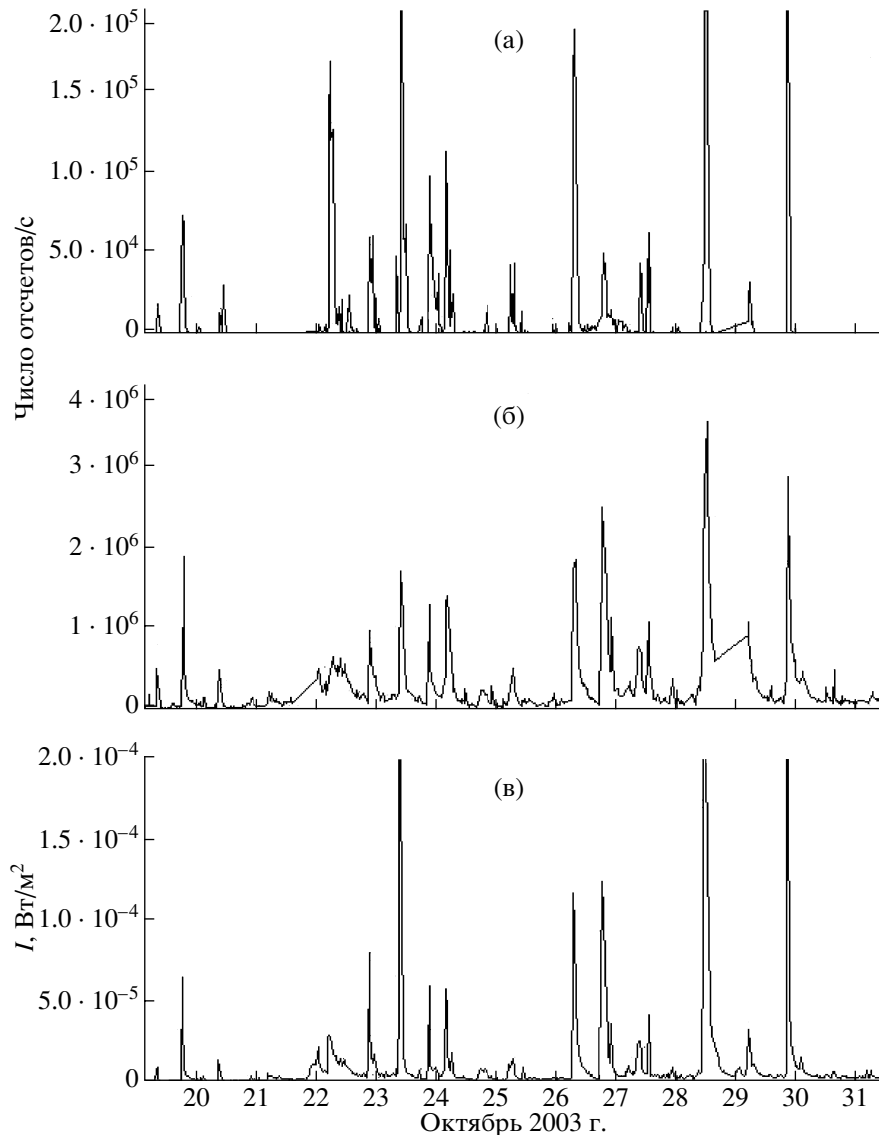


Рис. 1. Временной ход коротковолнового излучения в период больших вспышек октября 2003 года в диапазонах: (а) – $175 \text{ \AA} \pm 3 \text{ \AA}$ (Коронас-Ф/СПИРИТ); (б) – $8.42 \text{ \AA}$ (линия MG XII, Коронас-Ф/СПИРИТ); (в) $1\text{--}8 \text{ \AA}$ (GOES-12).

продолжился 4.XI самой интенсивной по потоку мягкого рентгеновского излучения в текущем цикле вспышкой балла X $> 17.5/3B$ ($\tau = 12$ мин., расчетный балл X28). Указанные вспышки произошли вблизи западного лимба Солнца. Поэтому существенного влияния на геомагнитную обстановку они не произвели, однако солнечные протонные события класса S3 и S2 имели место (максимумы 2 и 4.XI, соответственно).

Активная область АО 10488 (N09 L292) образовалась 27.X в центральной области солнечного диска и, несмотря на быстрое развитие, до 3.XI производила лишь вспышки среднего балла, а 3.XI в ней произошли две вспышки балла X2.7/2B и X3.9/2F. Всего за 16 суток в этих 3 активных областях произошло 16 больших вспышек, 11 из которых имели рентгеновский балл X.

Вспышечный период в середине ноября был связан с активной областью АО 10501 (N05 L012 – следующая оборот АО 10484). Он начался 17.XI и продолжался 94 часа. За это время в активной области произошли две большие вспышки и пять вспышек среднего балла M. Наибольшее воздействие на околоземное космическое пространство оказало эруптивное вспышечное событие оптического балла 2N 18.XI, в процессе развития которого произошло два рентгеновских всплеска M3.2 и M3.9 с мощными KBM. Возмущения от данных эруптивных событий, достигнув окрестности Земли, вызвали одну из самых мощных магнитных бурь (интенсивность G5) текущего солнечного цикла.

Рассматривая эруптивные события и вспышки на Солнце, не следует упускать из вида то обстоятельство, что возникновение и развитие этих са-

мых мощных процессов высвобождения энергии в атмосфере Солнца, в конечном счете, связано с поступлением и перераспределением свободной энергии из подфотосферных слоев. Наблюдения предвспышечных ситуаций на Солнце однозначно указывают на недостаточность часто используемых представлений о том, что эруптивные и вспышечные процессы инициируются исключительно какой-либо неустойчивостью и высвобождением свободной энергии, накопленной ранее в солнечной короне. Ни сколько не отрицая сложность и важность рассмотрения этих корональных процессов, следует учитывать, что наиболее сильные КВМ и солнечные вспышки часто сопутствуют друг другу и всегда без исключения происходят вследствие и после появления вполне определенных быстрых изменений в плазме и магнитных полях на фотосферном уровне. Это однозначно свидетельствует о важной роли энергетических “сигналов снизу”. Поступление дополнительной свободной энергии из недр при этом играет ключевую физическую роль. Вполне понятно, что для самых мощных явлений оказываются открытыми в той или иной мере как плазменные, так и электромагнитные каналы выделения энергии – мы видим и выброс вещества, и яркую вспышку. Чувствительность и пороги для их регистрации соответствующими приборами таковы, что КВМ при этом обычно предстают более длительными событиями, особенно если обратиться к изображениям в поле зрения коронографа LASCO/C3 до 30 солнечных радиусов. Вспышки же, видимые иногда в белом свете, а также в более жестком хромосферном и корональном излучении, как правило, предстают более кратковременными явлениями, хотя и для них используется несколько субъективное разделение на импульсные (минуты) и длительные (часы) события. Импульсные вспышки более компактны в пространстве и происходят, как правило, на меньших высотах. Поэтому они часто не сопровождаются заметными выбросами вещества в межпланетное пространство, а все движения в основном удерживаются в поле тяжести Солнца. Длительные события заключают в себе больше энергии. Они значительно больше по занимаемому ими объему, по площади и по высоте, что облегчает преодоление сил тяжести и выброс вещества от Солнца. Подчеркнем еще раз, что явления вспышек и КВМ часто сопутствуют друг другу в той или иной мере, но не являются физической причиной по отношению друг к другу. При их рассмотрении бывает трудно (а иногда и просто невозможно) выделить и локализовать в пространстве и во времени наиболее существенные детали и установить причинно-следственные связи между ними. Эта ситуация вообще свойственна не изолированным и открытым физическим системам с пересекающимися их большими потоками энергии, импульса и массы как в случае солнечной атмосферы на всех ее высотах.

Характеристики наиболее интересных вспышек и их “геоэффективность” приведены в табл. 1. Говоря здесь о “геоэффективности вспышек”, мы отдаем дань сложившейся традиции, в целом правильной для наиболее сильных геомагнитных бурь, как было разъяснено выше. Конечно, при этом следует ясно отдавать себе отчет в том, что геомагнитную бурю вызывает вовсе не оптическое явление, а приход к Земле плазмы с магнитными полями нужной силы и ориентации, а оптическое явление – всего лишь неплохой диагностический признак мощных событий. Так называемые “проблемные бури”, то есть наблюдаемые иной раз довольно сильные геомагнитные возмущения без зарегистрированных ярких вспышечных проявлений никогда не бывают рекордными по своей мощности. Все они, конечно, по самой своей физической сути причинно связаны с КВМ. Вспышки же при этом могли быть как не очень яркими, так и скрытыми от наблюдений из-за того, что имели место на обратной стороне Солнца. Выяснение этих ситуаций возможно лишь при проведении соответствующих наблюдений в будущем, а пока стоит заметить, что “проблемные бури” в последнее время удалось неплохо связать с видимыми крупномасштабными перестройками в короне Солнца в районе длинных каналов волокон, порой даже пересекающих весь диск и уходящих на обратную сторону Солнца. Такие перестройки вызываются изменениями электрических токов в атмосфере Солнца и часто сопровождаются вполне заметной активизацией волокон и протуберанцев.

Длительность определяется по вспышке в $NO\alpha$; φ – гелиографическая широта, λ – угловое расстояние от центрального меридиана (текущая гелиодолгота). I_{RB} – величина поглощения радиоволн по шкале оценки явлений космической погоды NOAA. P_r – поток солнечных протонов в максимуме в солнечных единицах потока протонов (pfu); I_{pr} – интенсивность потока протонов по шкале NOAA. М, ОБ – малая и очень большая магнитные бури; I_{ms} интенсивность магнитной бури по шкале NOAA.

В заключение этого описания стоит еще раз отметить, что большинство наиболее ярких вспышек сопровождается мощными КВМ (синдром сильных событий), хотя ни о какой пропорциональности между этими явлениями в общем случае говорить не приходится из-за большого разброса в параметрах событий и их разнообразия. Известны случаи довольно сильных КВМ без ярких вспышек на видимой стороне Солнца. Случаются также сильные и компактные по рентгеновскому излучению вспышечные явления, происходящие на относительно небольших высотах и не сопровождающиеся значительными корональными выбросами массы (confined flares) и связанные лишь с движениями, удерживаемыми вблизи Солнца силой тяжести и магнитными полями. Окончательное выяснение вопроса о взаимосвязях между этими явлениями – дело будущих ис-

Таблица 1. Наиболее значительные и геоэффективные солнечные вспышки и связанные с ними явления в околоземном космическом пространстве

Дата	Начало, UT	Длит. мин	Координаты	Балл	I_{RB}	P_r p f u	I_{Pr}	Магнитные бури	I_{ms}
19.X	16.29	79	N06 E58	X1.1/1N	R3				
22.X	19.45	>41	S20 E90	M9.9	R2				
23.X	08.17	64	S21 E88	X5.4/1B	R3				
23.X	19.50	38	S17 E84	X1.1/1N	R3				
24.X	02.22	66	S19 E72	M7.6/1N	R2				
26.X	05.17	213	S17 E38	X1.2/3B	R3	323	S2	M 28.X	G1
26.X	17.17	179	N02 W38	X1.2/1N	R3	466	S2	M 28.X	G1
26.X	21.26	60	N01 W38	M7.6/2N	R2				
27.X	09.21	23	S16 E26	M5.0/1F	R2				
27.X	12.27	37	S17 E25	M6.7/1F	R2				
28.X	09.51	>269	S16 E08	X17.2/4B	R5	29500	S4	ОБ 29–30.X	G5
29.X	20.37	136	S15 W02	X10.0/2B	R4	330	S2	ОБ 31.X	G4
2.XI	17.03	171	S14 W56	X8.3/2B	R3	1540	S3	M 4.XI	G2
3.XI	01.06	91	N10 W83	X2.7/2B	R3				
3.XI	09.43	>36	N08 W77	X3.9/2F	R3				
4.XI	19.29	80	S19 W83	X28/3B	R5	353	S2		
5.XI	10.46	>12	S16 W90	M5.3/SF	R2				
18.XI	07.16	159	N00 E18	2N/M3.2/M3.9	R1			ОБ 20–21.XI	G5
20.XI	07.35	61	N01 W08	M9.6/2B	R2	10	S1	22.XI	G1
20.XI	23.42	.16	N00 W17	M5.8/2N	R2				

следований, однако для целей прогноза геомагнитной активности, конечно, ни тех, ни других наблюдений явно недостаточно. Это связано с тем, что КВМ охватывает в среднем угол лишь около 40° – 50° и оказывается геоэффективным тогда и только тогда, когда он достигает Земли и несет с собой сильные и длительные магнитные поля, направленные на юг (десятки нанотесла в течение нескольких или многих часов). Иными словами, сильные солнечные вспышки, как и КВМ, сами по себе еще не являются достаточными признаками “геоэффективности” [5, 6]. Основным же достаточным признаком геоэффективности в этом плане служит сильное электрическое и магнитное поле соответствующего направления при достаточно большой длительности в межпланетном пространстве. По вполне понятным причинам плазма солнечного ветра в такие периоды времени крайне неоднородна и нестационарна. Она содержит в себе следы сильных возмущений на Солнце в виде исключительно больших (и малых) значений скорости, плотности и температуры, может резко отличаться по составу ионов и другим характеристикам. Все это играет свою динамическую роль в развитии магнитосферных откликов.

3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СИЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ И ИОНОСФЕРНЫХ БУРЬ В ОКТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2003 г.

Магнитосферный отклик на сильные возмущения в рассматриваемый промежуток времени на Солнце и в гелиосфере более подробно обсуждается в другом месте [7]. Здесь же мы ограни-

чимся лишь самыми общими сведениями, необходимыми для выяснения солнечной и гелиосферной обусловленности имевших место сильных геомагнитных и ионосферных бурь.

Для анализа солнечной и геомагнитной активности ниже используются данные, представленные на Web-сайтах: <http://www.sec.noaa.gov/today.html>; ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SOLAR_RADIO/FLUX/; ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP/; <http://sohowww.estec.esa.nl>; <http://www.izmiran.rssi.ru>.

В октябре–ноябре 2003 г. наблюдались два периода времени с очень сильными геомагнитными бурями. Один из этих периодов с внезапным началом в 06.12 UT 29.X характеризуется планетарным индексом активности $A_p = 189$ нТл. Пиковые значения компонент геомагнитного поля по данным обсерватории ИЗМИРАН были: $Z \approx 200$, $Y \approx 600$ и $X \geq 1000$ нТл. В главной фазе бури трехчасовой индекс активности $K_p = 9$. Эта буря развивалась в несколько этапов. Она имела сложный многоступенчатый характер и продолжалась до 31.X. Можно в этом случае говорить о наложении друг на друга нескольких последовательных возмущений, слившихся в довольно длительный буревой период. Другая – более короткая и изолированная буря с постепенным началом в 15.00 (время Московское) 20.XI; планетарный индекс активности $A_p = 117$ нТл. Пиковые значения компонент геомагнитного поля по данным той же обсерватории составляли: $Z \approx 400$, $Y \approx 600$, $X \approx 1000$ нТл. В главной фазе бури $K_p = 8$ – 9 . Буря наблюдалась до 06.00 (время Московское) 21.XI.

Все геомагнитные бури были вызваны быстрыми и мощными изменениями ситуации на Солнце. Развитие бурь полностью контролировалось параметрами полей и плазмы в околоземной гелиосфере. Активные области, которые наблюдались в период с 19.X по 4.XI.2003 г., имели максимальную площадь 30.X в ~5700 м.д.с.п. Развитие одной группы пятен привело к образованию самой большой вспышечно-активной группы пятен 23 цикла солнечной активности. Поток радиоизлучения Солнца на частоте 2800 МГц $F_{10.7} = 270$ с.е.п. (1 с.е.п. = 10–22 Вт/(м² Гц)). В рентгеновском и оптическом диапазонах в областях наблюдалось большое число вспышек разного класса и разных баллов. Вспышечная активность сопровождалась повышенной эмиссией высокоэнергичных частиц – ионов и электронов.

Несколько иные характеристики имели активные области, которые наблюдались с 18.XI по 1.XII.2003 г. Так, они имели 19.XI максимальную площадь в ~2140 м.д.с.п., максимальное число пятен 26.XI составляло 209, $F_{10.7} = 178$. В областях наблюдалось относительно небольшое число вспышек в рентгеновском и оптическом диапазонах. Вместе с тем, эти области, как и описанные выше, по своему воздействию на околоземное космическое пространство были весьма геоэффективными.

Для сравнения, в спокойных условиях в рассматриваемый период наблюдений октябрь–ноябрь 2003 г. характеристики солнечно-геофизической активности были: $A_p \approx 10$ нТл, $K_p \approx 2$, $F_{10.7} \leq 100$, число пятен <50, площадь <50 м.д.с.п. Фотографии и фильмы, снятые с высокоапогейных спутников во время бурь, показывают глобальную картину развития полярных сияний над Землей, которая в целом является типичной для столь сильных возмущений. Быстро эволюционирующий овал полярных сияний сильно расширился и сдвигался на юг вплоть до средних широт над Европой, Азией и Америкой. Аналогичная картина расширения полярного овала была хорошо видна и в южном полушарии Земли. Полярные сияния были также зарегистрированы 29–30.X в этих районах визуально и фотографически многими наблюдателями во всем мире, в том числе в Москве и Московской области. В частности, имеются прекрасные любительские фотографии полярных сияний в северной части неба после полуночи 30.X над Москвой.

По наблюдениям со станции вертикального зондирования на обсерватории ИЗМИРАН (г. Троицк, Московская область), развитие ионосферно-магнитных возмущений в октябре–ноябре 2003 г. сопровождалось полным поглощением радиоволн в ионосфере. В период бурь была отмечена значительная перестройка вертикальной структуры ионосферы. Анализ полученных ионограмм показал, что поведение ионосферы над Троицком в это время было типичным для авроральных условий – рассеянные отражения, полное или частичное поглощение радиоволн, образование спорадических слоев в области

Е типа “a”, “s” и “r”, которые экранировали вышележащую область. Об этом же говорят и местные магнитные данные, указывающие на существование в это время сильного аврорального электроджета (электроструи) в ионосфере практически над головой наблюдателей. Амплитуда магнитного возмущения также вполне характерна для сильных авроральных возмущений и в несколько раз превосходит значения глобального D_{st} индекса, вычисляемого путем некоторого осреднения магнитных измерений по нескольким экваториальным станциям.

Глобальный отклик ионосферы в это время, несомненно, характеризуется наличием очень сильных и весьма хорошо локализованных электроструй, в которых течет основная часть тока. Детальное расположение и геометрию отдельных магнитосферных электроструй выявить сложнее, также как и их взаимную связь между собой в глобальной электрической цепи. В частности, данные события предоставляют хорошую возможность для того, чтобы попытаться не только уточнить распределение электрических токов, сосредоточенных внутри самой магнитосферы и на ее границах, но и выяснить степень их связи с гелиосферным током, который также сильно увеличен в это время и может частично проникать и концентрироваться в магнитосфере во время бурь [8]. Пока же при моделировании магнитосферного отклика, как правило, априори предполагается замкнутая конфигурация глобальной токовой цепи внутри магнитосферы [7]. Однако точность этого предположения и степень открытости магнитосферной токовой цепи в настоящее время неизвестны. Выяснение этого вопроса в ходе предстоящего более детального анализа данных представляло бы несомненный интерес для физики гелиосферно-магнитосферного взаимодействия.

4. СОЛНЕЧНЫЕ И ГЕЛИОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ОТВЕТСТВЕННЫЕ ЗА СИЛЬНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В 2003 г.

На рис. 2а, б показаны гистограммы среднесуточных значений индексов, характеризующих планетарную геомагнитную активность в 2003 г. Для анализа солнечных и гелиосферных причин, ответственных за наблюдавшиеся геомагнитные возмущения в 2003 г., удобно использовать собранную для этих целей базу данных APEV (<http://alpha.sinp.msu.ru/aprev>). Таким способом можно проследить за целым рядом рекуррентных событий, повторявшихся с каждым оборотом Солнца и имевших, как обычно, относительно небольшую амплитуду. Особенно хорошо видны эти события на рис. 2б в виде повторяющихся последовательностей возмущенных дней на каждом обороте. На эти последовательности наложены спорадические возмущения, порой более сильные, так что повторяемость не является вполне регулярной. Стоит обратить внимание на известную закономерность, состоящую в том, что рекуррент-

ные возмущения упорядочены таким образом, что амплитуда возмущений в каждой последовательности убывает от ее начала к концу.

Объяснение этой закономерности связано с особенностями гелиосферного распространения высокоскоростных потоков солнечного ветра из корональных дыр. При этом, как известно, в гелиосфере происходит их нелинейное взаимодействие с более медленными потоками из вращающегося Солнца, вследствие чего происходит уплотнение вещества и усиление магнитного поля на переднем фронте высокоскоростных потоков по ходу вращения Солнца. Это и является одной из причин указанной асимметрии. Другая причина связана с граничными условиями на самом Солнце. Как известно, там тоже наблюдается подобная асимметрия, связанная с вращением, и состоящая в том, что лидирующие (западные) пятна из группы пятен и активных областей обычно более компактны, чем последующие, более рассеянные и мелкие пятна. Бывает также заметна своеобразная сплюснутость крупномасштабных структур на передних (западных) краях по ходу вращения. Следствием этого должна быть также некоторая асимметрия в относительном расположении и структуре по долготе активных областей и корональных дыр, хотя этот вопрос нами подробно не исследовался. Какой фактор преобладает – солнечный или гелиосферный – сказать в настоящее время затруднительно, так как здесь необходимо специальное количественное исследование.

Картина рекуррентных возмущений в 2003 г. была довольно неустойчивой и изменчивой. Это объясняется причинами на Солнце – появлением и гибелью отдельных относительно стабильно расположенных или дрейфующих активных областей, корональных дыр и комплексов активности. Ясно, что вся эта динамика во многом зависит от структуры течений, а также тепловых и магнитных полей в подфотосферных участках Солнца. Соответствующие граничные условия для плотности, скорости, температуры плазмы и электромагнитных полей на фотосфере были и остаются важным контролирующими факторами, которые могут быть определены только из наблюдений и в настоящее время известны далеко не полностью. Тем самым определяется некоторый верхний предел по времени и точности для попыток прогнозирования гелиосферных условий исходя из наблюдений Солнца.

Рисунок 3 иллюстрирует наблюдавшуюся последовательность сильных возмущений на Солнце и вызванных ими геомагнитных бурь в октябре–ноябре 2003 г. На рис. 4–7 более подробно представлена ситуация на Солнце и в гелиосфере для отдельных наиболее интересных интервалов времени, а в табл. 2 геомагнитные возмущения с максимальным трехчасовым индексом $a_p > 100$ в октябре–ноябре 2003 г. соотнесены с породившей их ситуацией на Солнце и в гелиосфере.

Прямые измерения параметров солнечного ветра на космических аппаратах и спутниках во время очень сильных возмущений крайне затруднены, а порой становятся ненадежными или даже вовсе невозможными из-за нарушений и сбоев в нормальной работе приборов и их ограниченного динамического диапазона, что хорошо видно и на рис. 4–7. Поэтому, в частности, необходима известная осторожность при использовании публикуемых на регулярной основе в Интернете данных о скорости, температуре и плотности солнечного ветра для рассматриваемого интервала времени. Ввиду этих обстоятельств на рис. 8 показано сопоставление данных ИСЗ *ACE* о скорости солнечного ветра, обработанных и исправленных по специальной программе с учетом специфики функционирования плазменного анализатора в это время (частное сообщение R. Skoug), с рассчитанной скоростью солнечного ветра. Расчет производился А.В. Дмитриевым на основе магнитных данных пары спутников *ACE – Geotail*, находившихся в это время в солнечном ветре, путем деления известного расстояния между ними на время запаздывания в наблюдении магнитных структур, сносимых потоком солнечного ветра в предположении о сферической геометрии. Более гладкая кривая относится к первому случаю, а гистограмма – ко второму. Видно неплохое согласие в пределах заранее ожидавшейся точности порядка десятка процентов. Достоверность высоких значений скорости, достигавших ~2000–2200 км/с, и предположений о нормальности фронта распространения в районе Земли в рассматриваемый сильно возмущенный период времени подтверждается общим соответствием обеих кривых, включая и невозмущенные интервалы времени. Об этом же свидетельствует и согласие с оценкой скорости распространения межпланетных транзитов по времени запаздывания геомагнитных бурь относительно KBM, наблюдавшихся коронографом *SOHO/LASCO*. Это время было необычайно малым и составляло всего лишь 19–20 час.

Для большей части рассматриваемого периода 10.X–30.XI.2003 г. в Интернете есть достоверные данные по солнечному ветру, прежде всего, полученные прибором SWEPAM на КА *ACE* (см. рис. 3). Однако приведенные на общедоступном сайте данные *ACE* являются совершенно неверными для интервалов от середины 28.X до конца 30.XI и в течение 3.XI.2003 г. Второй из этих интервалов здесь не рассматривается, однако для первого могут быть предложены ориентировочные оценки для двух важнейших параметров – скорости и плотности солнечного ветра.

Обсудим имеющиеся данные. От начала 28.X.03 до 12 UT 28.X.03 вполне разумно выглядят показания спутника *Geotail* (прибор CPI) и близкие к ним данные аппарата *ACE*, так что они могут быть взяты за основу. После 12 UT 28.X.03 показания *ACE* стали сбойными: значения скорости нереально низ-

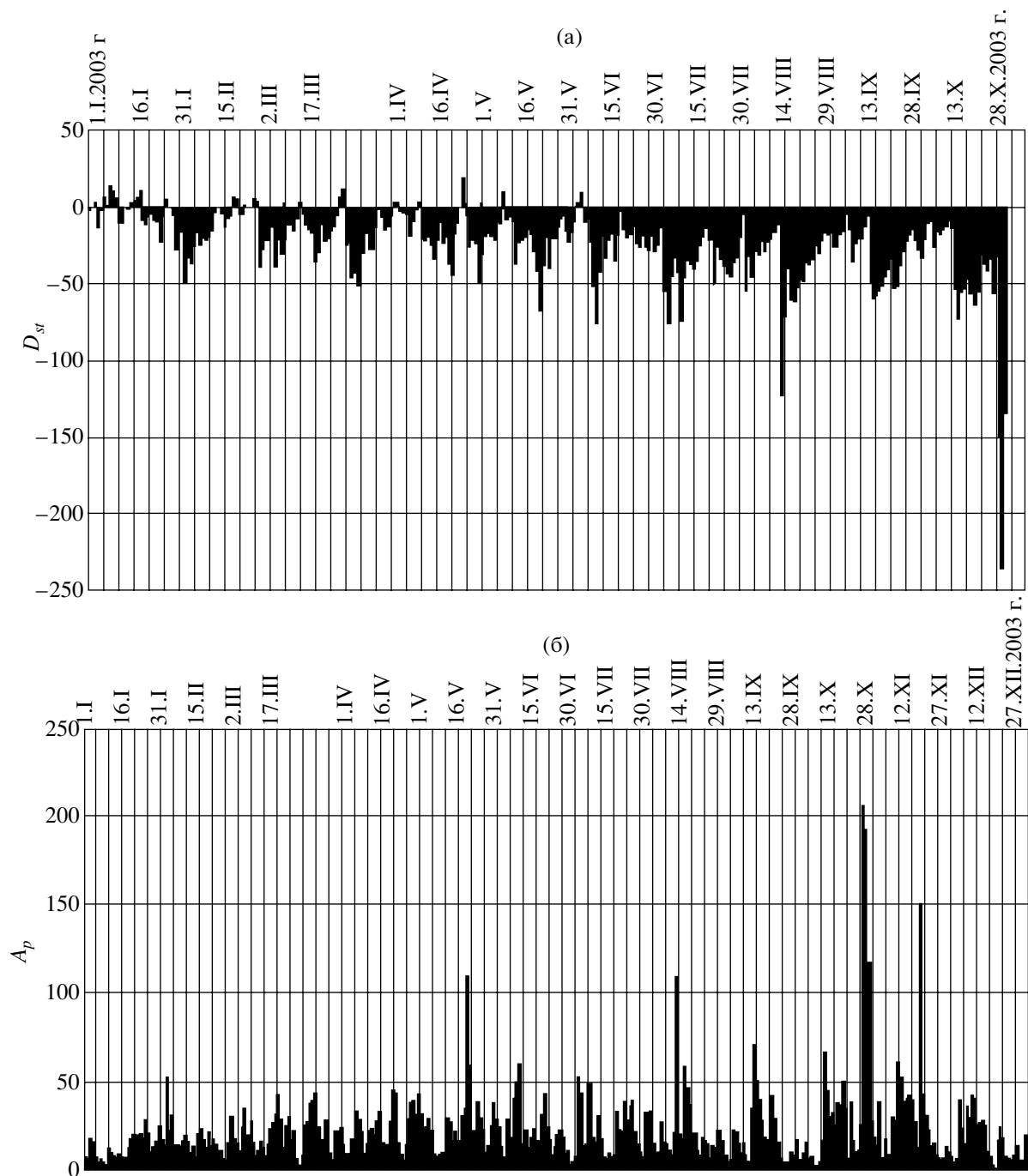


Рис. 2. Среднесуточные значения D_{st} -индекса геомагнитной активности в 2003 г. (а); среднесуточные значения A_p -индекса геомагнитной активности в 2003 г. (б)

кие вплоть до начала 31.X. Доверять этим данным нельзя. Показания спутника *Geotail* выглядят как будто бы неплохо, но на самом деле и здесь имеет место сбой аппаратуры, вызванный приходом энергичных частиц от Солнца – после сильнейшей вспышки (X17.2/4B) в 11.02 UT 28.X.03 (по данным *GOES-10* здесь виден очень сильный рост СКЛ). Поэтому к приведенным на сайте GSFC показаниям спутника *Geotail* для 28–29.X доверия также нет, тем

более, что они (по обоим приборам CPI и LEP) внутренне противоречивы.

На участке 12 UT 28.X–24 UT 30.X можно воспользоваться результатами моделирования движения межпланетных ударных волн, которое проведено группой М. Драйера. Конечно, это не измерения, а только модельные оценки, но многолетняя практика этой группы показала весьма высокую степень совпадения получаемых оценок

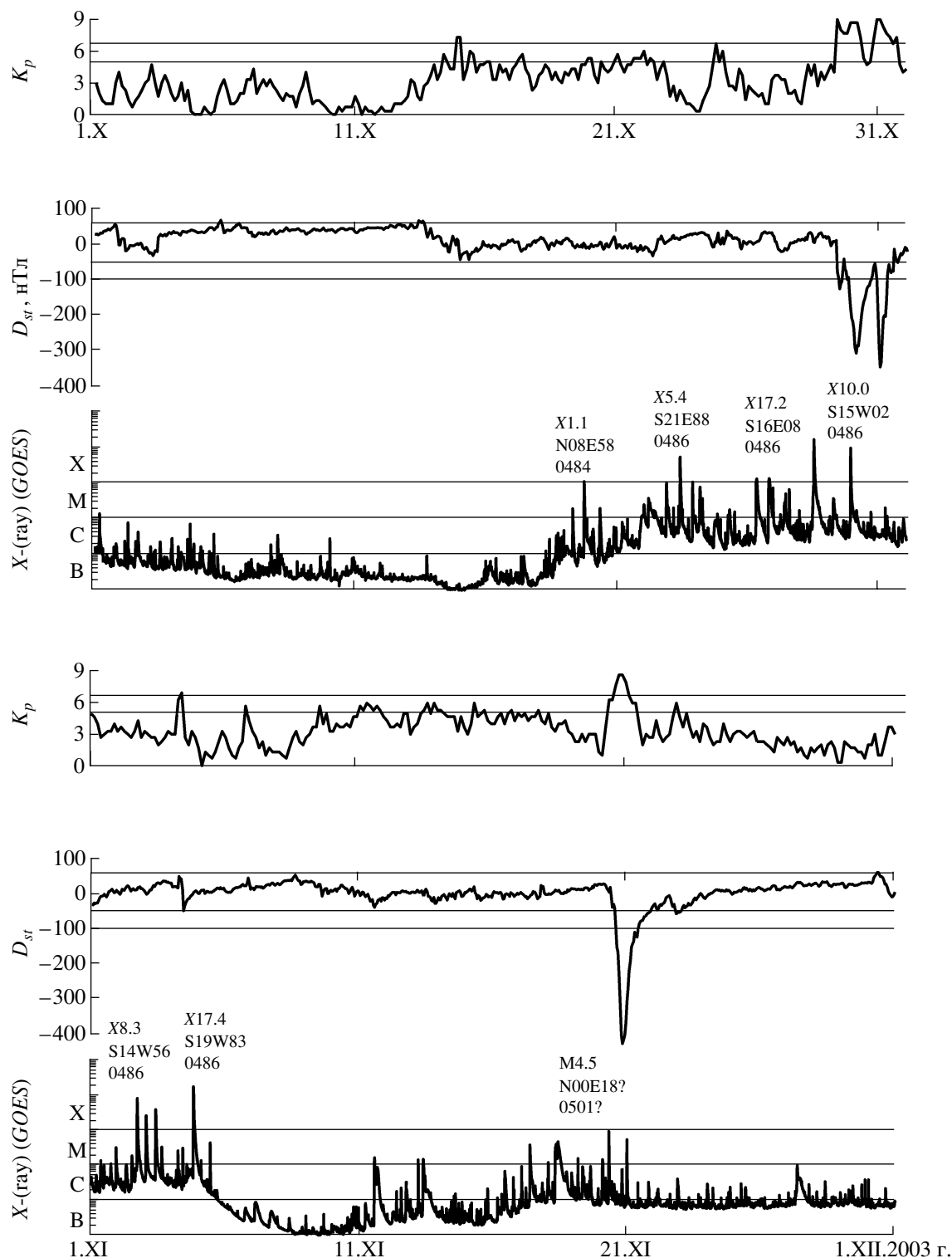


Рис. 3. Последовательность сильных возмущений на Солнце и на Земле в октябре (три верхние панели) и ноябре (три нижние панели) 2003 г. Сверху вниз представлены K_p и D_{st} – индексы геомагнитной активности и рентгеновское излучение по измерениям на ИСЗ *GOES-12* (буквами и линиями показаны классы вспышек). Для некоторых вспышек указан рентгеновский балл вспышки, ее координаты на сфере.

с реальностью для самых разных, в том числе и экстремальных, условий. Оценки группы Драйера для плотности солнечного ветра для интервала

12 UT 28.X–24 UT 30.X представлены на верхней панели рис. 8 сплошной линией. Начиная с ~11 UT 31.X все три спутника *ACE*, *SOHO* и *Geotail* дают

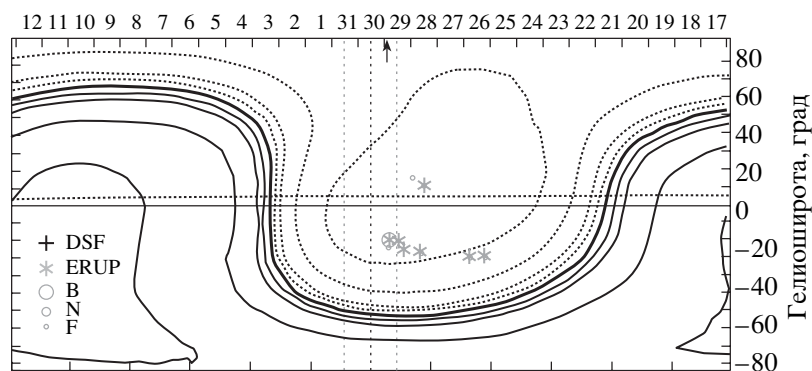


Рис. 4. Ситуация на Солнце, приведшая к сильным гелиосферным и геомагнитным возмущениям в октябре 2003 г. Синоптическая карта из базы данных APEV 428 (<http://alpha.sinp.msu.ru/aprev>). DSF – исчезающие волокна. Вспышки помечены соответственно их общепринятой классификации согласно оптическим баллам – яркие (B), нормальные (N), слабые (F). Эруптивные вспышки отмечены звездочкой.

одинаковые плотности. Следует отметить, что в отдельные моменты времени 29–31.X вклад гелия в плотность солнечного ветра мог быть весьма большим. Интересная структура пришла к Земле в ~11 UT 31.X, когда вклад гелия поднялся до 40%. Возможно, это было холодное волокно. Для скорости солнечного ветра на интервале 29–30.X имеются оценки по отрывочным (раз в 32 мин) данным прибора SWEPAM (частное сообщение Ruth Scoug, см. рис. 8), по движению магнитных неоднородностей (сообщение А. Дмитриева, см. рис. 8), по скорости альфа-частиц (прибор SWICS на КА *Ulysses*).

В итоге получается следующая картина. Для интервала от 12 UT 28.X до 06 UT 29.X можно только интерполировать между измеренными значениями в начале интервала $V \sim 750$ км/с, $n \sim 2$ см⁻³ и совпадающими оценками для 06 UT 29.X – близкие значения для скорости и плотности. В 05.58 UT 29.X к Земле (по многим данным) пришла межпланетная ударная волна, давшая резкий и большой рост плотности (до 15 см⁻³) и, особенно, скорости солнечного ветра (см. рис. 8) – до 2100–2400 км/с (1950 км/с по альфа-частицам) – рекордное значение, сравнимое только с величиной в 2000 км/с для события 4.VIII.1972 г. На ин-

Таблица 2. Геомагнитные возмущения с максимальным трехчасовым индексом $A_p > 100$ в октябре–ноябре 2003 г., соотнесенные с породившей их ситуацией на Солнце и в гелиосфере

Буревой период: Дата, Время UT	A_p	Межпланетная ситуация	Первое появление КВМ в поле зрения LASCO C2	Время начала и положение источника на Солнце по наблюдениям EIT	Максимум сопутствующей вспышки
24.X.2003 15.00–18.00	111	Ударная волна ~15.00 24.X, с последующим слоем $B_z < 0$	03.54 21.X, гало ¹	Димминги и ЕПТ-волна, 03.47 21.X на восточном лимбе (в будущем АО 10486)	Нет ²
29.X.2003 06.12–09.00	400	Ударная волна ~06.00 29.X, с последующим слоем $B_z < 0$, затем магнитное облако с ориентацией NS	10.54 28.X, гало, 2125 км/с	Димминги и ЕПТ-волна, 11.11 28.X, АО 10486	X17.2, 11.10 28.X
Второй пик 18.00 29.X–03.00 30.X 30.X.2003 18.00–24.00	300 400	Ударная волна ~16.00 30.X, затем магнитное облако с ориентацией SN	20.54 29.X, гало, 1950 км/с	Димминги и ЕПТ-волна, 20.48 29.X, АО 10486	X10.0, 20.49 29.X
4.XI.2003 09.00–12.00 20.XI.2003 15.00–21.00	132 300	Ударная волна ~06.00 4.XI, с последующим слоем ³ $B_z < 0$ Ударная волна ~07.30 20.XI, затем магнитное облако ESW	17.30 2.XI, гало, 1826 км/с 08.50 18.XI, гало, 1175 км/с	Димминги и ЕПТ-волна, 17.23 2.XI, АО 10486 Димминги и ЕПТ-волна, 07.58 18.XI, АО 10501	X8.3, 17.25 2.XI M3.2, 07.52 18.XI

¹ Хотя основной источник этого КВМ расположен за восточным лимбом, его видимая конфигурация имеет вид гало из-за распространения возмущения и ударной волны. Трудно оценить скорость распространения этого возмущения.

² Возможно, была залимбовая вспышка.

³ Источник был расположен вблизи западного лимба. Соответствующий КВМ прошел мимо Земли. Наблюдался только слой.

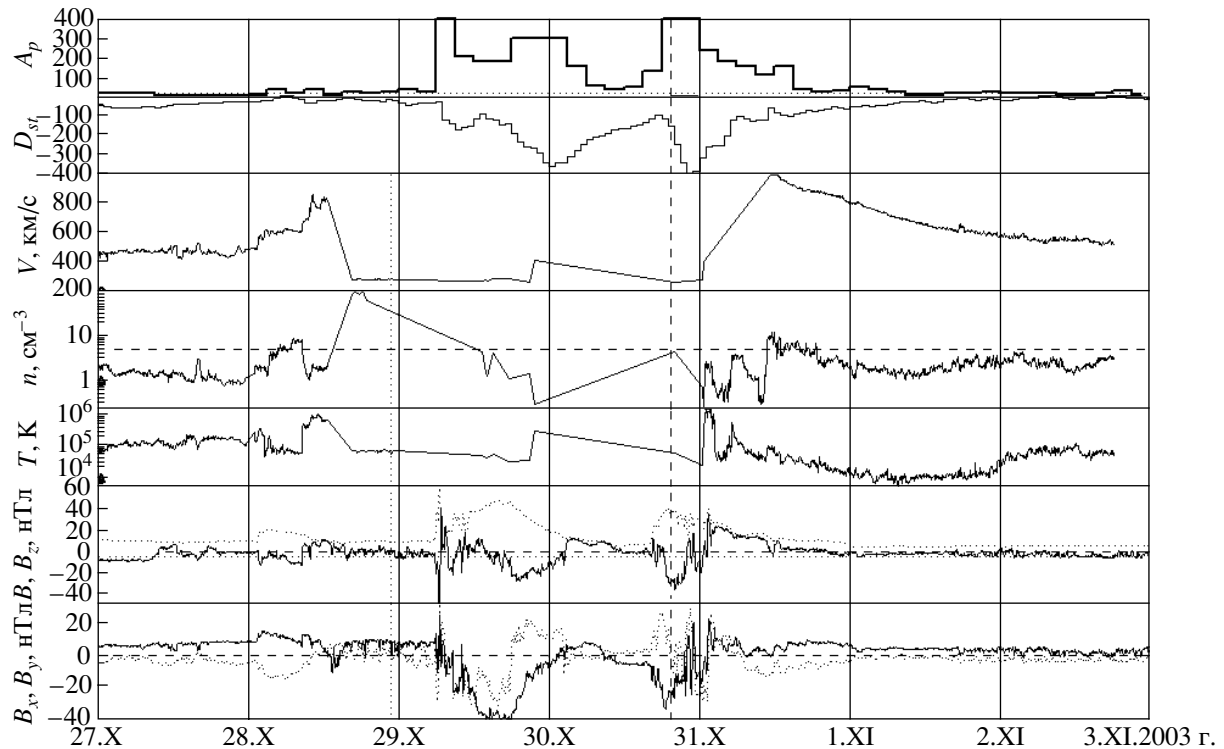


Рис. 5. Ситуация в гелиосфере, ответственная за сильные геомагнитные возмущения в октябре 2003 г. Взято из базы данных APEV 428 (<http://alpha.sinp.msu.ru/aprev>).

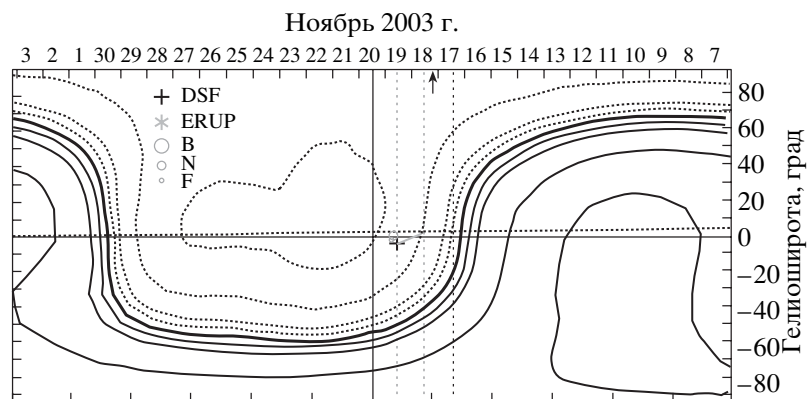


Рис. 6. Ситуация на Солнце, приведшая к сильному гелиосферному возмущению и геомагнитной буре в ноябре 2003 г. Синоптическая карта из базы данных APEV 431 (<http://alpha.sinp.msu.ru/aprev>).

тервале от до 06 UT до 24 UT 29.X плотность ветра довольно быстро (за 6–9 часов) упала от 15 см^{-3} до $\sim 1\text{--}2 \text{ см}^{-3}$ и далее оставалась такой низкой почти до конца 30.I. Для скорости солнечного ветра имеется оценка (рис. 8) – спад к концу 29.X примерно до 1000–1100 км/с, примерно такая же (1100–1300 км/с) оценка группы Драйера и такая же оценка (1100 км/с) по альфа-частицам. Судя по данным спутника *Geotail*, скорость солнечного ветра спадает к 18–22 UT 29.X до 900–1100 км/с, а плотность составляет в это время $\sim 2\text{--}5 \text{ см}^{-3}$. Далее после 22 UT снова идет сбой приборов на ИСЗ *Geotail* (по-видимому, вследствие прихода

энергичных частиц от вспышки X10/2B в 20.42 UT 29.X) и их данным доверять нельзя. После $\sim 04 \text{ UT}$ 30.X ИСЗ *Geotail* входит в магнитослой и до 31.X не дает сведений о солнечном ветре. Для 30.X хороших данных от ACE по-прежнему нет, пользуемся оценками. По оценке группы Драйера плотность солнечного ветра остается на уровне $\sim 2 \text{ см}^{-3}$ вплоть до прихода межпланетной ударной волны в 16.19 UT, когда она возрастает до $\sim 7 \text{ см}^{-3}$, а затем в течение 6–8 часов спадает снова до $\sim 2 \text{ см}^{-3}$. После прихода ударной волны скорость ветра возрастает (см. рис. 8) до 1400–1700 км/с. Однако имеющаяся оценка по данным об альфа-ча-

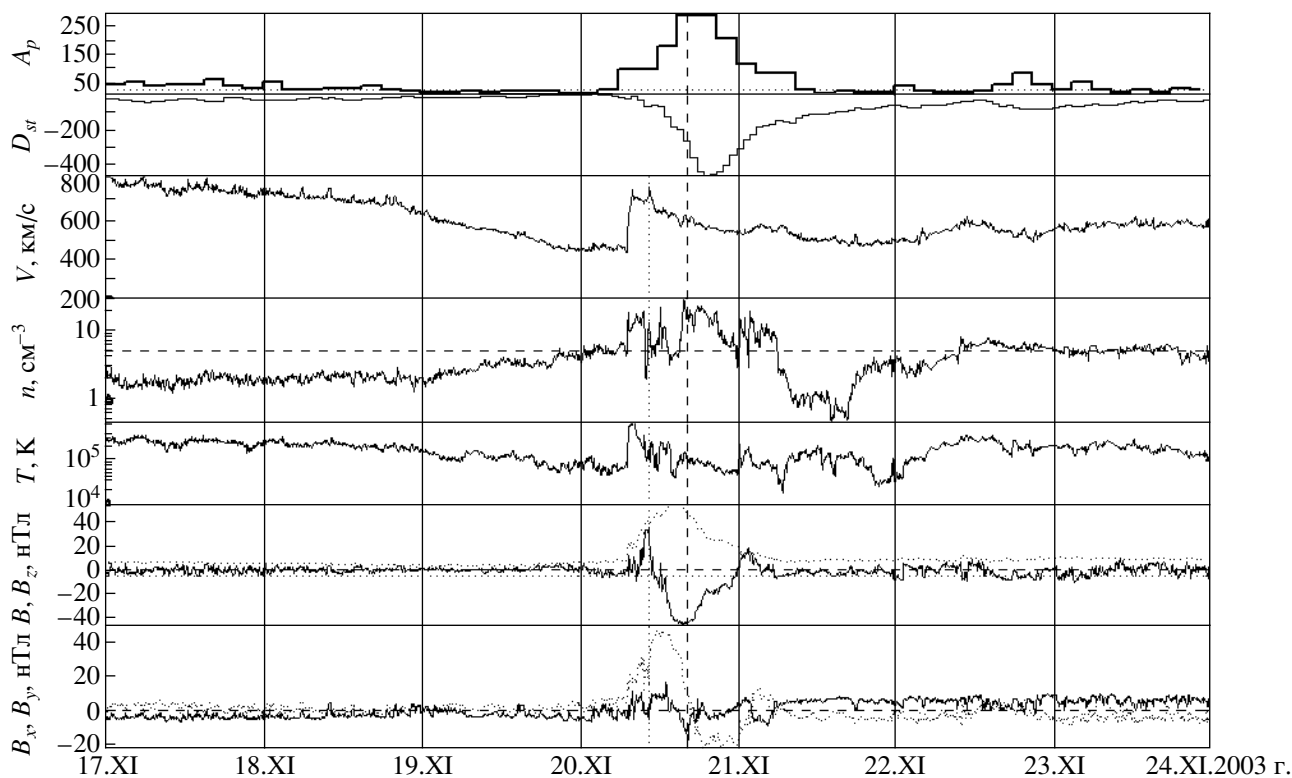


Рис. 7. Ситуация в гелиосфере, ответственная за сильную геомагнитную бурю в ноябре 2003 г. Взято из базы данных APEV 431 (<http://alpha.sinp.msu.ru/aprev>).

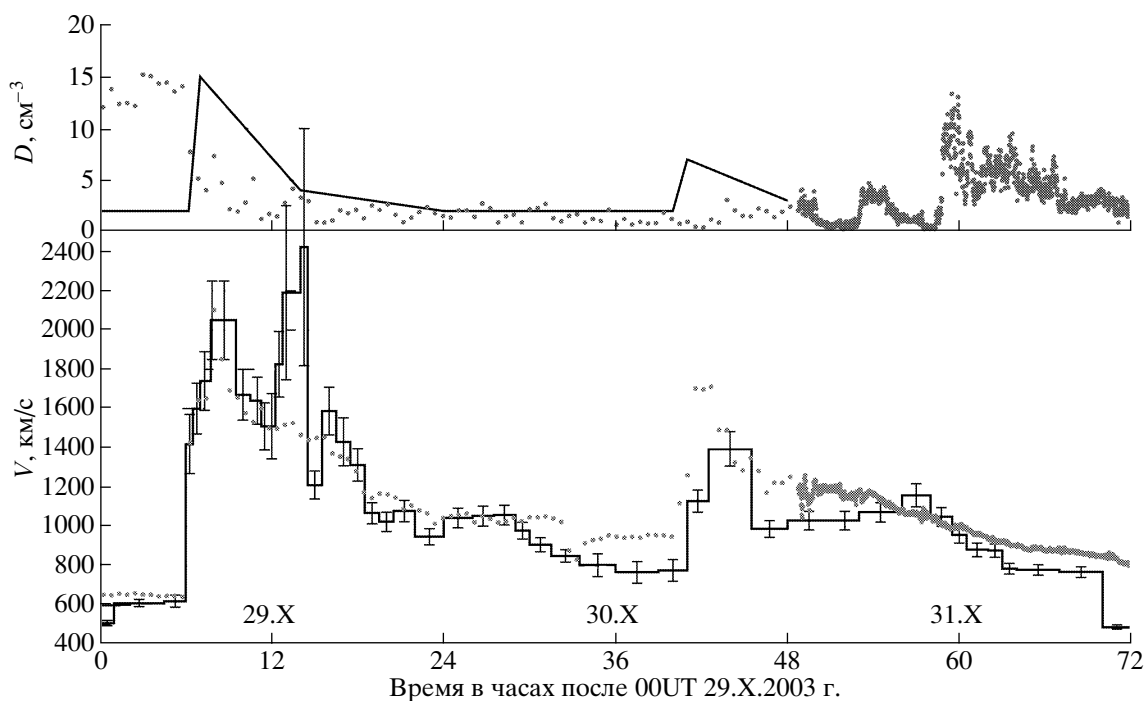


Рис. 8. Временные профили модельной плотности (верхняя панель) и скорости (нижняя панель) солнечного ветра. Скорость и плотность, полученные по плазменным данным ИСЗ ACE, показаны точками. Плотность, обозначенная линией, оценивалась по методике, описанной в тексте. Скорость, восстановленная по магнитным данным пары спутников ACE-Geotail 29–31.X.2003 г., показана в виде гистограммы с оценкой доверительных интервалов.

стицах (~2000 км/с) в данном случае представляется для области вблизи Земли завышенной, так как относится лишь к гелиодолготе, где располагался КА *Ulysses*. После резкого возрастания скорость солнечного ветра плавно падает до значения ~1200 км/с к 01 UT 31.X, где она уже стыкуется с регулярными измерениями по прибору SWEPV. В это время плотность ветра составляет около $3\text{--}5\text{ см}^{-3}$.

Для полноты картины можно отметить, что соответствующие сильные возмущения в гелиосфере распространялись, сохраняя отклонения от сферической симметрии и “память” о долготе и широте места их зарождения на Солнце. Это утверждение следует из сравнения с опубликованными данными КА *Ulysses*, который находился в это время на расстоянии около 5.3 а.е. от Солнца на гелиошироте около 5 градусов и гелиодолготе относительно Земли около 90 градусов. Октябрьские возмущения на Солнце породили несколько четко выраженных быстрых потоков плазмы и ударных волн на их фоне, которые достигли 6, 10 и 13.XI. Ступенчатые изменения скорости солнечного ветра имели место от 400 до 500 км/с, затем от 500 до 600 км/с, от 600 до 800 км/с. Все они сопровождалась явлениями уплотнения и разрежения плазмы между ними из-за различия в относительных скоростях движения и динамических процессов по пути распространения. Однако *Ulysses* по своей долготе находился на периферии соответствующих КВМ и ударных волн. Этим объясняется умеренная величина возмущений плазмы по сравнению с тем, что регистрировалось в этих событиях на Земле.

Очень сильная лимбовая вспышка 4.XI произошла практически на долготе расположения КА *Ulysses*. Поэтому плазменный выброс, достигший КА *Ulysses* через 10–12 дней, распространяясь со скоростью до 950 км/с, оказался направленным именно в эту сторону, а на Земле была зарегистрирована не очень сильная ударная волна. После этого на КА *Ulysses* в течение около двух недель наблюдалась протяженная область разрежения. Наконец, 29.XI сюда пришла ударная волна от вспышки 18.XI, которая была почти центральной для Земли и лимбовой для КА *Ulysses*. Скорость солнечного ветра за ее фронтом была здесь около 600–700 км/с, то есть далеко не рекордной по своей величине, даже с учетом заметного ослабления возмущения с удалением от Солнца. Вывод о ширине “возмущенного” конуса плазмы порядка 90 градусов по долготе во всех этих случаях представляется вполне естественным и достаточно обоснованным.

5. ГЛОБАЛЬНАЯ АСИММЕТРИЯ СОЛНЦА В ОКТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2003 г.

Глобальная асимметрия Солнца и проявлений солнечной активности в октябре–ноябре 2003 г. может быть непосредственно прослежена на всех

уровнях его атмосферы по опубликованным данным о магнитных полях на фотосфере, по данным о пятнах и волокнах, по данным об ультрафиолетовом и рентгеновском излучении, в том числе полученным на *Коронас-Ф* (рис. 9а,б), а также *SOHO* (рис. 9в), *GOES* (рис. 3), по многим другим признакам и, наконец, косвенно по геомагнитным данным.

Более яркая сторона Солнца с мощными активными областями была обращена к Земле с 19.X по 4.XI. Центральными датами в этом отношении могут служить 26–27.X. На предыдущем и последующем солнечных оборотах соответствующие центральные даты наиболее яркого и активного Солнца приходятся приблизительно на 30.IX и 28.XI. Более темная сторона Солнца с более слабыми магнитными полями была обращена к Земле 12.X и 11.XI. Таким образом, глобальная асимметрия Солнца, отчетливо наблюдавшаяся на фазе роста и вблизи максимума и солнечной активности в 23-м цикле [9], существует и на его спаде. Она хорошо выражена и играет свою важную роль в течение интересующего нас возмущенного периода времени. Все наблюдавшиеся наиболее сильные вспышки и КВМ в октябре–ноябре 2003 г. произошли именно на яркой стороне Солнца. Сильные геомагнитные бури 29–31.X и 20.XI также порождены спорадическими процессами на Солнце в окрестностях соответствующих центральных долгот. В указанном смысле эти геомагнитные возмущения можно считать рекуррентными, так как легко выделить и указать “активную долготу”. Однако, кроме того, на Солнце в целом как на звезде в октябре–ноябре происходило заметное усиление теряемой энергии в ультрафиолетовом и рентгеновском излучении за оборот, что хорошо видно в данных *Коронас-Ф*/СПИРИТ и *GOES*, если сравнить между собой обороты в сентябре–декабре. Иными словами, в октябре–ноябре происходил относительно кратковременный, но заметный глобальный всплеск всех проявлений солнечной активности.

Наблюдения в линии Лайман-альфа также подтверждают эти выводы о глобальной асимметрии Солнца и всплесках активности (рис. 9г). В период вспышек непосредственные наблюдения в оптическом диапазоне ВУСС и СУФР на *Коронас-Ф* показали отсутствие какого-либо роста потока излучения, а в диапазоне крайнего УФ излучения наблюдения оказались невозможными из-за резкого роста чувствительности аппаратуры в этот период. Однако оказывается возможным проследить изменение потоков излучения по косвенным – ионосферным – данным. В соответствии с [10], данные о параметрах *E*-слоя ионосферы могут быть использованы как показания природного детектора ионизирующего излучения и могут быть также представлены в виде эквивалентного потока излучения в линии L_{α} (121.6 нм). Вариации эквивалентного потока излучения, рассчитанные для периода с августа 2003 г. по январь 2004 г., представлены на

рис. 9а. Используются данные станции Слау, полученные через МЦД В1. Стрелками вверх отмечены даты вспышек, указанных в табл. 1, и ряд вспышек с величиной более М5.

Видно, что предвспышечные ситуации характеризуются значительным (на ~30%) ростом потока КУФ-излучения, затем наступает период, когда наблюдения отсутствуют из-за сильной возмущенности ионосферы. Столь значительное возрастание также, по-видимому, свидетельствует в пользу об изменении глобальных характеристик Солнца в период, предшествующий повышенной вспышечной активности – в частности, возможна резкая асимметрия светимости невозмущенной (вне активных областей) поверхности Солнца в ультрафиолетовой области.

Объяснение этих явлений может быть связано с мощными внутрисолнечными, точнее говоря, подфотосферными, причинами, приведшими к временному поступлению большого количества свободной энергии в атмосферу Солнца и рассеяния ее там, включая ее корону. В частности, важную роль при этом могут играть добавочные потоки тепловой энергии, превращающейся в тонком подфотосферном слое в излучение нагретого газа и другие формы энергии, в том числе и в магнитную энергию электрических токов. Относительно небольшого локального повышения температуры на доли процента из-за усиленной концентрации и ускоренного конвективного выноса энергии здесь было бы вполне достаточно, чтобы полностью обеспечить основную энергетику рассматриваемого электромагнитного излучения и магнитогидродинамических процессов в гравитационно удерживаемых и более высоких частках атмосферы. Генерация сильных электрических токов и магнитных полей, сверхзвуковые и сверхальвовенские движения плазмы, ускорение частиц и сопутствующее этому жесткое электромагнитное и нейтронное излучение, а также радиоизлучение в широком диапазоне частот вполне могут быть прямым следствием быстрого преобразования этого избытка свободной тепловой энергии, поступающей снизу. Присутствие нагрева на фотосферном уровне бывает видно только во время самых сильных вспышек, а в остальных случаях контраст для этого слишком мал. К сожалению, такой важный компонент, как вспышка в белом свете, исследован к настоящему времени совершенно недостаточно, что порождает не вполне обоснованные гипотезы о природе солнечных вспышек. Имеющиеся в литературе оценки выделения энергии в “белой вспышке” по порядку величины на уровне десятка процентов в полном энергетическом балансе нуждаются в уточнении и могут оказаться заниженными, так как в них учитывается только самая яркая и контрастная часть этого явления, на десятки процентов превышающая очень сильный фон. Возможно, что именно по этой иной причине видимая площадь “белых вспышек” представляется всегда относительно небольшой даже в самых мощных случаях.

Достаточно точные абсолютно калиброванные наблюдения в белом свете и инфракрасном диапазоне, то есть в районе главного максимума излучения, крайне сложны и до сих пор не были выполнены в необходимом объеме. Для этого потребуются специальные измерения из космоса, что является делом будущего. Эти соображения вовсе не исключают установленную ныне важную роль перераспределения запасенной свободной магнитной энергии в ходе этих процессов в атмосфере Солнца, хотя необходимые количественные оценки сделать крайне трудно и они всегда имеют весьма неопределенный характер даже по порядку величины. Тем не менее, говоря о “солнечных вспышках”, не следует забывать, что главный энергетический канал этих явлений по указанным выше причинам может вовсе ускользнуть от наблюдений и незаслуженно игнорироваться. Количественное исследование нелокальных и нелинейных связей на Солнце во время КВМ и вспышек, в том числе и “белых”, остается одной из центральных нерешенных экспериментальных задач. В частности, “белая вспышка”, даже если ее и не видно из-за относительно малой яркости и недостаточного контраста, должна всегда присутствовать по самой сути физического явления, связанного с усиленным выносом энергии из открытой физической системы, которая заранее не ограничивается какими-либо участками солнечной атмосферы. На рис. 10–15 представлены некоторые изображения Солнца, полученные в видимом и ультрафиолетовом излучении и иллюстрирующие сказанное о распределении активности на Солнце. Ниже эти наблюдения обсуждаются несколько более подробно.

6. КРУПНОМАСШТАБНАЯ АКТИВНОСТЬ В КРАЙНЕМ УФ-ДИАПАЗОНЕ

Рассматриваемые эруптивные события на Солнце включали в себя вспышки предельно высокого рентгеновского балла и значительные КВМ, в том числе, типа гало, зарегистрированные при помощи коронографов белого света *SOHO/LASCO*. Вспышки и КВМ (СМЕ) наблюдались также в крайнем УФ диапазоне на *Коронас-Ф*, *TRACE*, *SOHO*. На рис. 11 показаны четыре последовательных кадра из серии, полученной 28.X комплексом аппаратуры СПИРИТ [11] на ИСЗ *Коронас-Ф* [12] в канале 175 Å. Видны изменения от кадра к кадру – увеличение и уменьшение яркости отдельных участков изображения. Наиболее отчетливо прослеживается динамика длительной вспышки в сложной аркаде петель активной области 10486. Кроме этого, на большой поверхности диска, в особенности в южном полушарии, заметна целая совокупность образующихся на некоторое время областей с пониженной интенсивностью излучения (транзистентные корональные дыры или так называемые “димминги”).

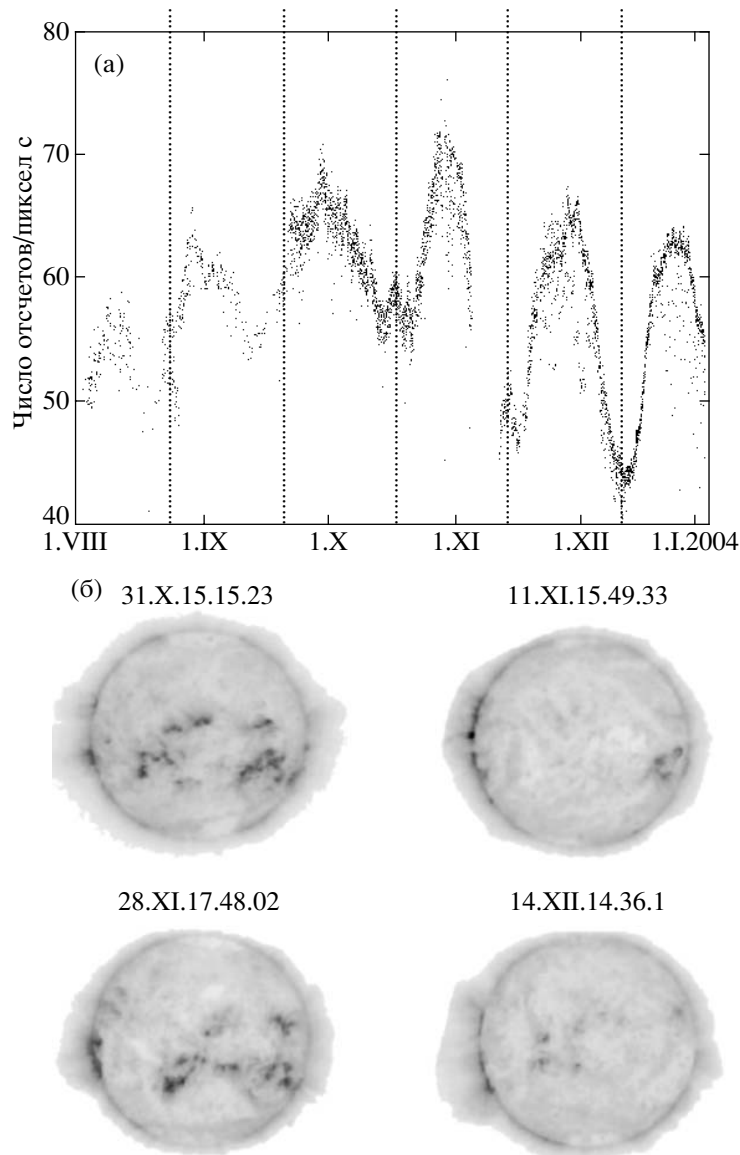


Рис. 9. Данные, иллюстрирующие глобальную асимметрию Солнца:

(а) – изменение интегральной по диску светимости Солнца в диапазоне $175 \pm 3 \text{ \AA}$ ($T \sim 1.3 \text{ MK}$) по данным аппаратуры *Коронас-Ф/СПИРИТ* в период с августа по декабрь 2003 г. Пунктирные линии показывают минимумы светимости с шагом, соответствующим сидерическому периоду вращения (27.275 дней); (б) – изображения Солнца в наблюдаемых максимумах и минимумах интегральной светимости по тем же данным; (в) – глобальная асимметрия излучения Солнца в линии $195 \text{ \AA}$ по наблюдениям *SOHO/EIT* на протяжении нескольких оборотов Солнца в сентябре–декабре 2003 г. (г) – модельный поток излучения Солнца в линии Лайман-альфа в августе–октябре 2003 г.: видны сильные спорадические вариации и изменения в течение нескольких последовательных оборотов. Верхний ряд стрелок – моменты вспышек балла X, нижний ряд – для вспышек балла более M5.

Обработка изображений по специальной разностной методике, о чем будет сказано ниже, позволяет сделать эти изменения более контрастными и лучше различимыми. Сходная картина глобальных и локальных изменений яркости наблюдалась в четырех УФ каналах телескопом *SOHO/EIT*, соответствующих различной эффективной температуре возбуждения соответствующих линий. Несмотря на всю сложность происходящих при этом локальных изменений, следует обратить внимание

на сохранение общей крупномасштабной топологии светлых и темных участков до и после рассматриваемых событий. Временное разрешение в данном случае недостаточно для детального наблюдения быстропеременных процессов, таких как корональные волны, часто называемые “EIT wave” (светящиеся фронты, распространяющиеся по диску от места эрупции со скоростью 100–200 км/с). Признаки фронта корональной волны имеет относительно яркая структура, протянувшаяся на изоб-

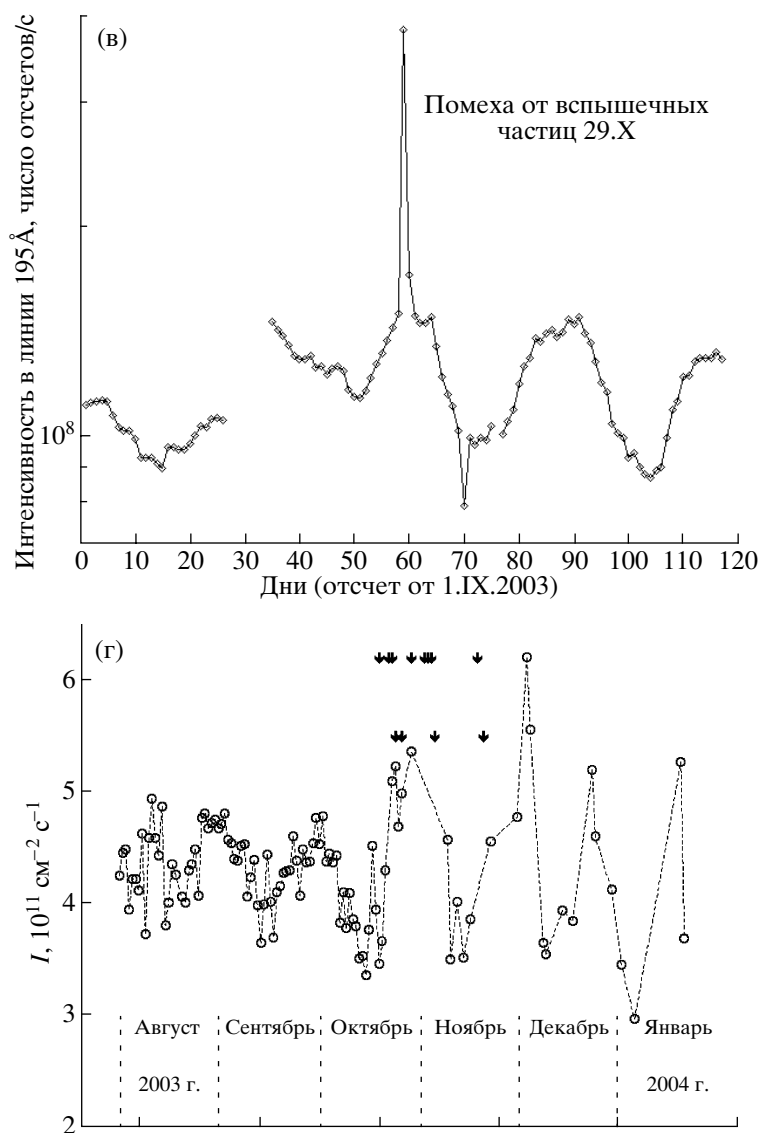


Рис. 9. Окончание.

ражении *SOHO*/EIT в 11.12 от восточного лимба к центральному меридиану и далее к югу.

В [13] проведен анализ диммингов и, частично, корональных волн по гелиограммам *SOHO*/EIT в корональном канале 195 Å с 12-мин интервалом, а также в корональных каналах 171, 284 Å и канале переходного слоя 304 Å с 6-ч интервалом. Материалы этого анализа в виде гелиограмм и фильмов можно найти на Web-сайте http://helios.izmiran.troitsk.ru/lars/Chertok/0310_11/index.html. Там же приведены общие сведения обо всем активном периоде в течение двух солнечных оборотов.

Во время первого прохождения по диску комплекса из трех активных областей (точнее, до 4.XI) СПИРИТ фиксировал гелиограммы полного диска в канале 175 Å, как правило, с интервалом 15–45 мин, с учетом захода спутника в тень Земли. Начиная с 11.XI и во время второго прохож-

дения аналогичные наблюдения осуществлялись также и в канале 304 Å. Гелиограммы СПИРИТ с указанными временными интервалами не позволяют проследить распространение корональных волн, но вполне подходят для анализа диммингов, время жизни которых измеряется часами. Результатам более подробного анализа и их сравнению с данными EIT посвящена статья [14].

Обработка гелиограмм с обоих телескопов производилась по методу деротированных фиксированных разностных гелиограмм, примененному ранее в [15, 16]. Этот метод включает в себя два этапа. Сначала осуществляется совмещение изображений путем компенсации вращения Солнца (“деротации”), то есть поворота всех гелиограмм, относящихся к конкретному событию, к одному и тому же моменту времени, обычно перед событием. Затем одно, фиксированное, фо-

новое изображение перед событием вычитается из всех рассматриваемых гелиограмм. Получаемые таким образом фиксированные разностные изображения дают реальную картину возмущений, связанных с КВМ, в частности диммингов, и в этом смысле принципиально отличаются от последовательных разностных изображений. Последние подчеркивают изменения интенсивности, структуры и локализации источников, произошедшие за время между двумя соседними гелиограммами, то есть скорее производную этих изменений по времени, чем саму величину изменений.

Из числа изученных в [13] событий в качестве примера рассмотрим событие 28.X. Вспышка балла 4В/Х17 с максимумом в 11.10 UT произошла в области 10486. Соответствующий КВМ имел вид гало со свечением вокруг всего затмевающего диска и особо интенсивной компонентой над южным лимбом, а скорость его распространения в картинной плоскости достигала 2125 км/с. На рис. 15 приведены фиксированные разностные гелиограммы СПИРИТ в канале 175 Å и ЕИТ в канале 195 Å. На кадрах (рис. 15а, б), близких к максимуму вспышки, видна яркая вспыхивающая область. ЕИТ показывает ее со значительными инструментальными искажениями: насыщением, протечкой заряда в CCD детекторе и сильным увеличением яркости на значительной площади вокруг этой области (рассеянным светом в телескопе). На гелиограмме СПИРИТ таких эффектов перегрузки не наблюдается, так как при очень высоких уровнях сигнала детекторы, в которых используются микроканальные пластины, переходят в нелинейный режим. В результате уровень насыщения СПИРИТ значительно превышает предел регистрации ЕИТ. Это позволяет также видеть на изображениях СПИРИТ более полную и отчетливую картину диммингов в момент максимума мощнейшей вспышки. Как данные ЕИТ, так и данные СПИРИТ показывают, что уже на этой стадии димминги охватывали практически всю южную половину диска и прилегающую часть северной полушария. При этом диммингами были соединены не только три основные области АО 10484, 10486, 10488, в которых в течение рассматриваемого периода происходили наиболее сильные вспышки, но и, по крайней мере, еще две удаленные области, находившиеся 28.X недалеко от восточного лимба. Следует обратить внимание также на протяженную димминговую структуру, которая видна в южной приполярной зоне. Тот факт, что димминги в северной половине диска были очень слабыми, объясняется наличием здесь крупной корональной дыры.

Все описанные димминги сохранялись в течение нескольких часов и к 12.46–12.48 UT имели вид, показанный на рис. 15 в,г. Эти и последующие изображения ЕИТ оказались во все возрастающей степени покрытыми “снегом”, т.е. яркими точками, возникающими в результате воздействия на детектор мощного потока генерированных в данном событии и приходящих к телескопу энергичных

частиц. Что касается гелиограмм СПИРИТ, то они оставались чистыми в течение всего события, поскольку *Коронас-Ф* летает на сравнительно низкой орбите внутри магнитосферы Земли и частично защищен от проникновения этих частиц.

Представленные здесь гелиограммы СПИРИТ 175 Å и ЕИТ 195 Å соответствуют близким температурам корональной плазмы порядка 1.3 и 1.5 МК. Проведенный в [11] аналогичный анализ этого события по данным ЕИТ в четырех каналах 304, 171, 195 и 284 Å, отвечающих существенно разным эффективным температурам возбуждения линий от 0.05 до 2 МК, показал, что основные димминги были подобными и в значительной степени совпадали во всех указанных каналах. Этот наблюдательный факт свидетельствует о присутствии на луче зрения тесно расположенных структур, испускающих весь этот набор линий. Глобальный характер диммингов в этом и других событиях данной серии означает, что в процесс эрупции КВМ вовлекалась значительная часть солнечной атмосферы. Примечательно, что картина диммингов во многом повторялась от события к событию, включая упоминавшиеся выше структуры между удаленными активными областями и в южном приполярном районе. Это свидетельствует о гомологии рассматриваемых эруптивных событий, т.е. о том, что каждый раз эрупция КВМ затрагивала примерно одни и те же структуры, которые, по-видимому, успевали восстановить свое магнитное поле и светимость за время между событиями.

7. РАЗВИТИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПО ДАННЫМ РАТАН-600

Наблюдения активных областей в октябре–ноябре 2003 г. в сантиметровом диапазоне длин волн на РАТАН-600 дают ценный экспериментальный материал для исследования пространственного распределения источников излучения на диске Солнца и их высотных зависимостей, а также возможных предвестников мощных процессов выделения энергии в солнечной короне по данным об интенсивности, спектрах и поляризации радиоизлучения.

В течение трех последних лет на РАТАН-600 был внедрен новый режим наблюдений, который позволяет обнаружить и исследовать особенности радиоизлучения вспыхивающе-продуктивных активных областей (ВПАО), производящих особо мощные вспышки [17]. Эти особенности выглядят в сантиметровом диапазоне в виде резких спектральных неоднородностей в поляризованном излучении. Подобные явления происходят в широком интервале потоков радиоизлучения (0.05–200 с.е.п.) в относительно узком диапазоне длин волн (2–5 см) и регистрируются в интервале времени от нескольких часов до нескольких дней перед мощной вспышкой, а также во время вспышки. Часто такие события предшествуют КВМ и потокам высокоэнергичных частиц (протонов),

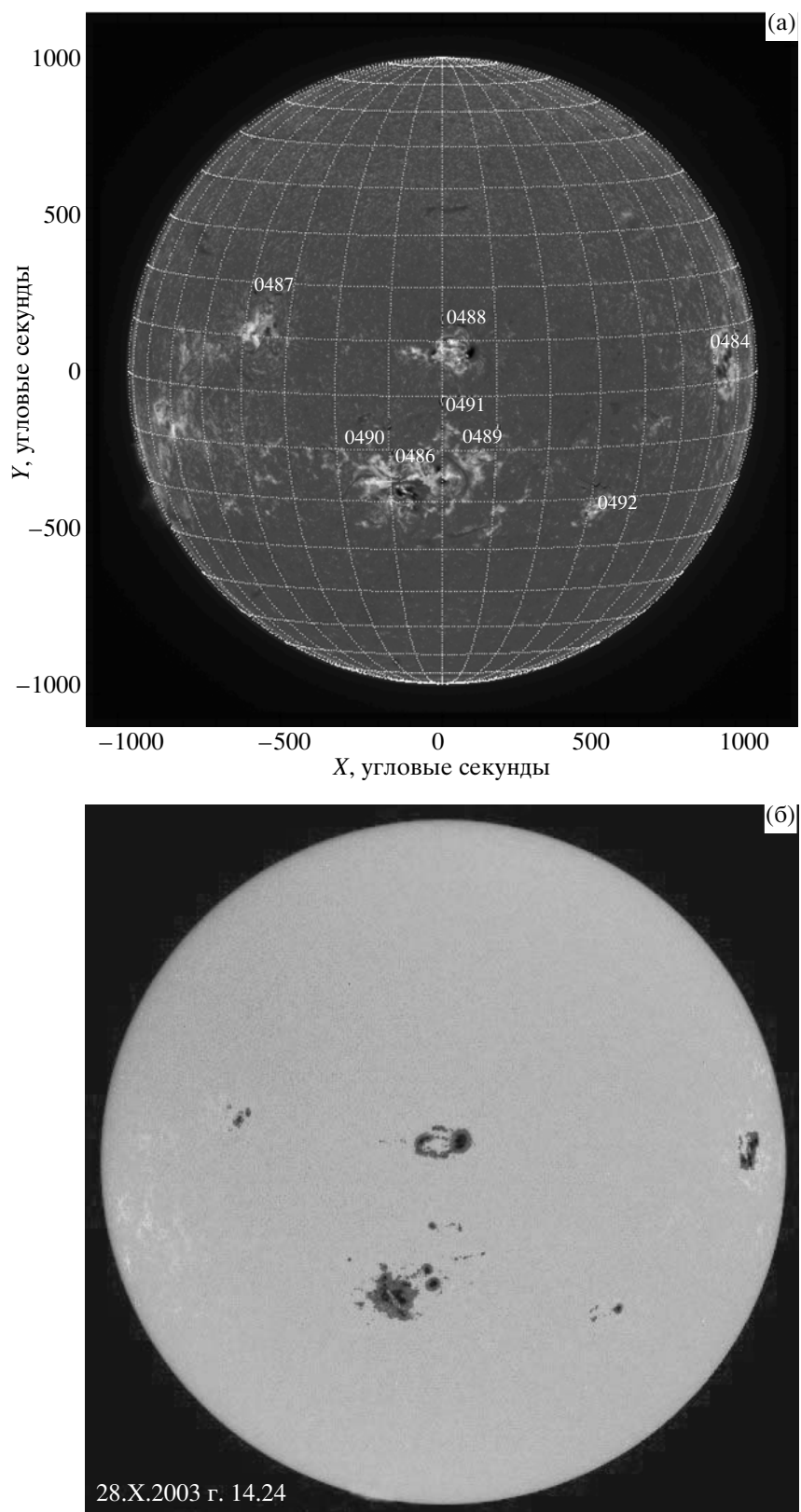


Рис. 10. Изображение Солнца в линии H -альфа 28.X.2003 г.

а – (http://beauty.nascom.nasa.gov/arm/20031028/halpha_fd.html); б – (<http://www.spaceweather.com/archive>).

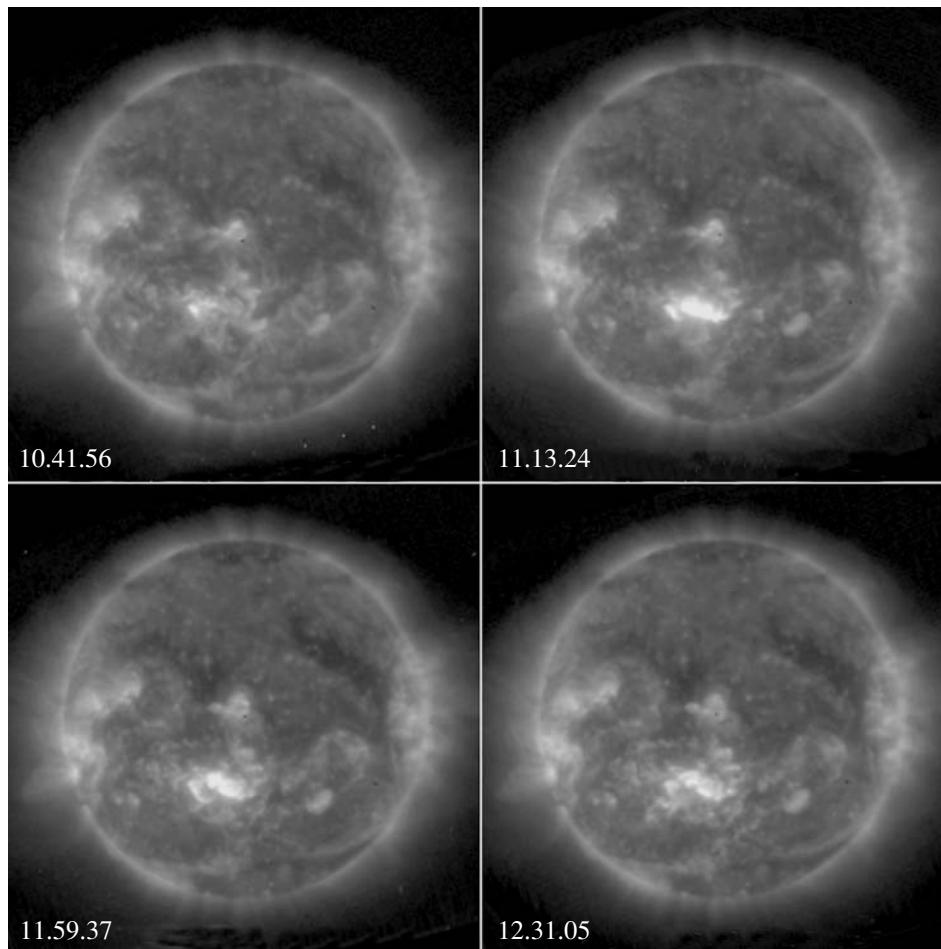


Рис. 11. Изображения Солнца в линии крайнего ультрафиолетового излучения $175 \text{ \AA}$ 28.X.2003 г. Четыре последовательных кадра из фильма, полученного на ИСЗ *Коронас-Ф* прибором СПИРИТ.

которые при достижении магнитосферы Земли вызывают ее возмущения. Ниже анализируются события, связанные с наиболее мощными вспышками, которые произошли 29.X и 4.XI. Наблюдения нескольких самых мощных активных областей АО 10484, 10486 и 10488 23-го цикла на РАТАН-600 начались лишь с 25.X (задержка была связана с техническим перерывом). На рис. 16 серым тоном показаны промежутки времени, когда проводились наблюдения на РАТАН-600 с 30.X по 5.XI. Они наложены на графики зависимости мощности рентгеновского радиоизлучения от времени по данным *GOES*.

Для исследования динамики активных областей были использованы регулярные спектрально-поляризационные измерения. Радиотелескоп имеет параметры, которые позволяют проводить измерения уже на ранних стадиях развития ВПАО. При этом наиболее важным качеством данного инструмента явилось сочетание мгновенного спектра частот от 1 ГГц до 16 ГГц (в данной работе использовался диапазон 4–16 ГГц) с частотным разрешением около 5–7% при высокой чувст-

вительности к измерению малых степеней круговой поляризации (около 0.05%) и высокой чувствительности к измерению потока излучения, достигающей нескольких Ян ($1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$). Такая высокая чувствительность достигается благодаря широкой полосе принимаемых частот (200–600 МГц), параллельному анализу спектра и большой собирающей поверхности 600–1000 м². Радиотелескоп РАТАН-600 имеет умеренное пространственное разрешение в горизонтальной плоскости ($< 15''$ на волне 2 см) и низкое разрешение в вертикальной плоскости (около $15'$ на волне 2 см). Размеры диаграммы направленности инструмента меняются пропорционально длине волны. Наблюдения выполнялись регулярно как в режиме одиночного сканирования (3–5 наблюдений в день), так и в режиме многократного сканирования (60 сканов в день с интервалом 4 мин в течение 4 ч). Такие часто повторяющиеся сканы с довольно узкой диаграммой в течение 4 часов позволяют четко выделять излучение от конкретных деталей структуры активной области

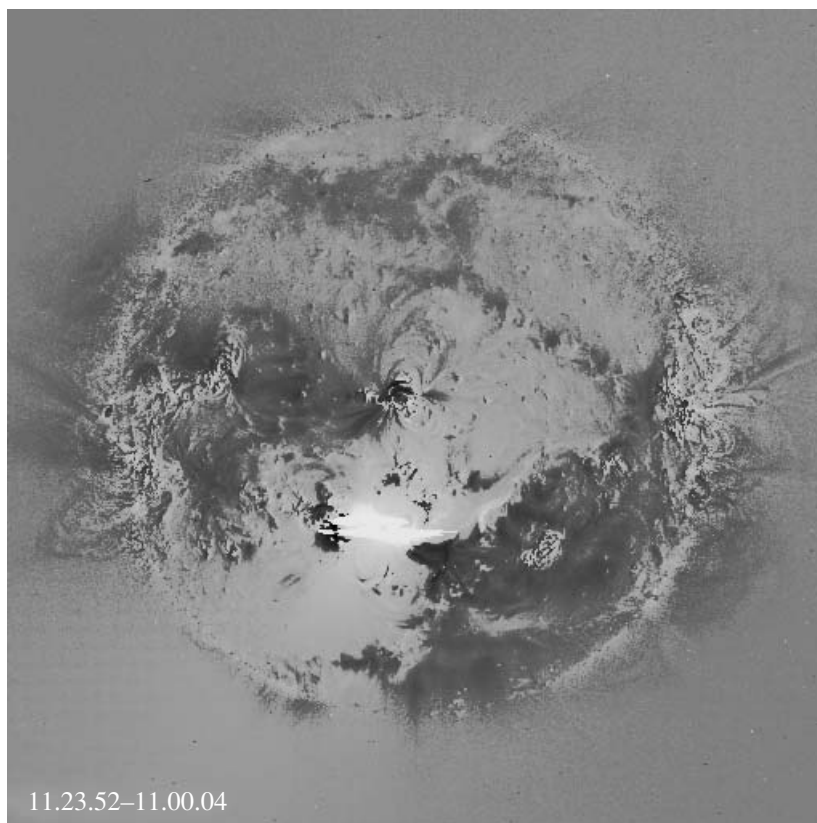


Рис. 12. Пример построения разностного изображения Солнца в линии крайнего ультрафиолетового излучения 28.X.2003 г., полученного путем вычитания друг из друга двух последовательных кадров фильма, снятого на космическом аппарате *SOHO* телескопом ЕИТ. Из изображения 11.23.52 вычтено 11.00.04.

(локальных источников над пятнами, межпятенные источники, флоккулы и др.).

Как видно из радионаблюдений, представленных на рис. 16–17, обе активные области АО 10484 и АО 10486 имели специфические особенности структуры в поляризованном излучении (рис. 17, слева), что позволяет их отнести к вспыхивающе-продуктивным областям, которые, как известно [17], производят как минимум несколько крупных вспышек класса М и X. В спектре поляризации (рис. 17) для группы АО 10484 наблюдается рост поляризованного потока на коротких волнах 2.03, 2.24 и 2.32 см и сложная неоднородная структура на более длинных волнах с 2.74 до 3.21 см. Для группы АО 10486, находящейся в восточном полушарии диска Солнца, сложная структура в поляризованном излучении с наличием неоднократной смены знака поляризации наблюдается в диапазоне от 3.21 до 7.59 см.

Обсудим ход спектров, которые представлены на рис. 18. Уже 30.X в спектре поляризации этой области видно наличие избытка излучения с отрицательной (правой круговой) поляризацией в диапазоне 12–14 ГГц. Это указывает на появление излучения, связанного с всплытием магнитного поля северной полярности. Спектр интенсивности для

30.X также показывает излом в этом диапазоне. В последующие дни 31.X и 1.XI в спектре также виден избыток правой поляризации, который постепенно смещается в сторону длинных волн. Интерпретация этого эффекта связана с прогревом более высоких слоев при всплытии нового магнитного потока. Однако, начиная со 2.XI и в последующие дни 3 и 4.XI, наблюдался устойчивый рост поляризованного излучения левой полярности на коротких волнах (от 10 ГГц до 17 ГГц), что соответствует всплытию магнитного потока южной полярности. По-видимому, этот процесс и привел к мощному выделению энергии, обусловленному поступлением нового магнитного потока и нарушением устойчивости магнитосферы активной области. После генерации мощной вспышки магнитная структура в активной области стабилизировалась. На коротких волнах (в диапазоне частот 10–16 ГГц) исчез избыток поляризованного излучения (рис. 18, внизу слева), а форма спектра в интенсивности (рис. 18, внизу справа) приобрела форму, типичную для стабильных активных областей и определяемую тепловым излучением плазмы.

Таким образом, рассмотрение спектрально-поляризационных свойств радиоизлучения мощных активных областей, существовавших на диске в пе-

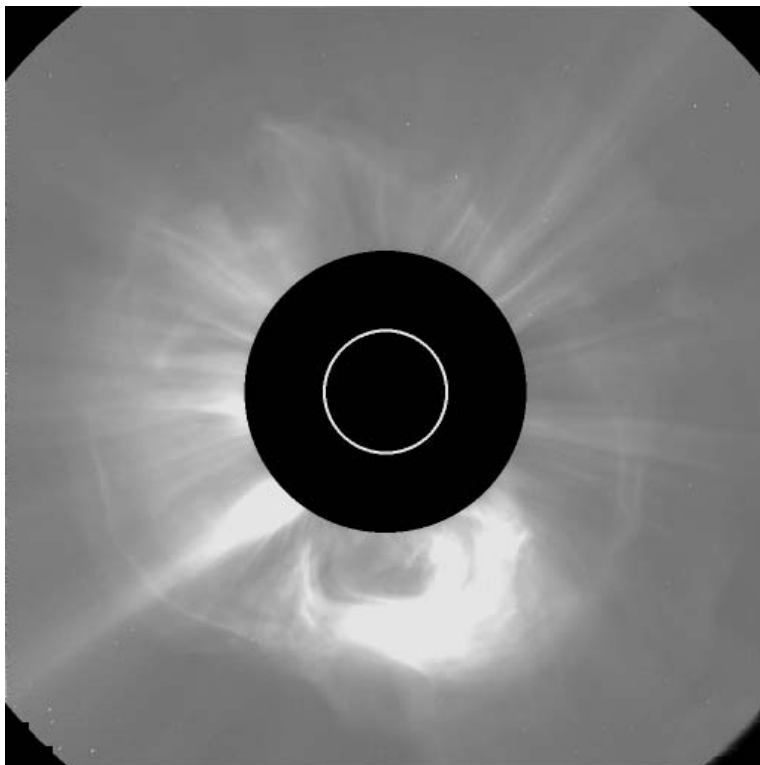


Рис. 13. Изображение короны Солнца в белом свете 28.X.2003 г. Кадр из фильма, полученного на космическом аппарате *SOHO* коронографом LASCO C2.

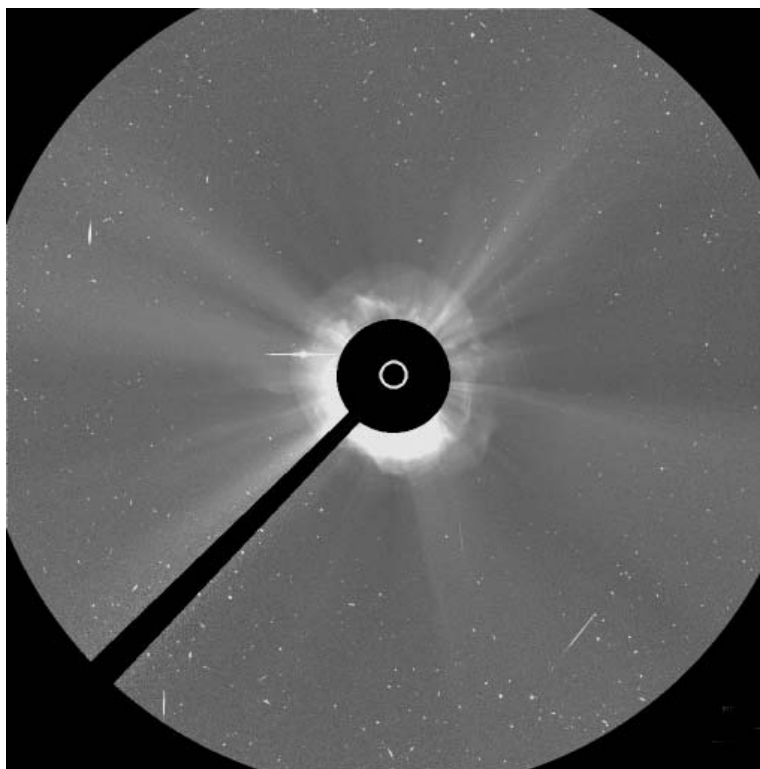


Рис. 14. Изображение короны Солнца в белом свете 28.X.2003 г. Кадр из фильма, полученного на космическом аппарате *SOHO* коронографом LASCO C3.

28.X.2003

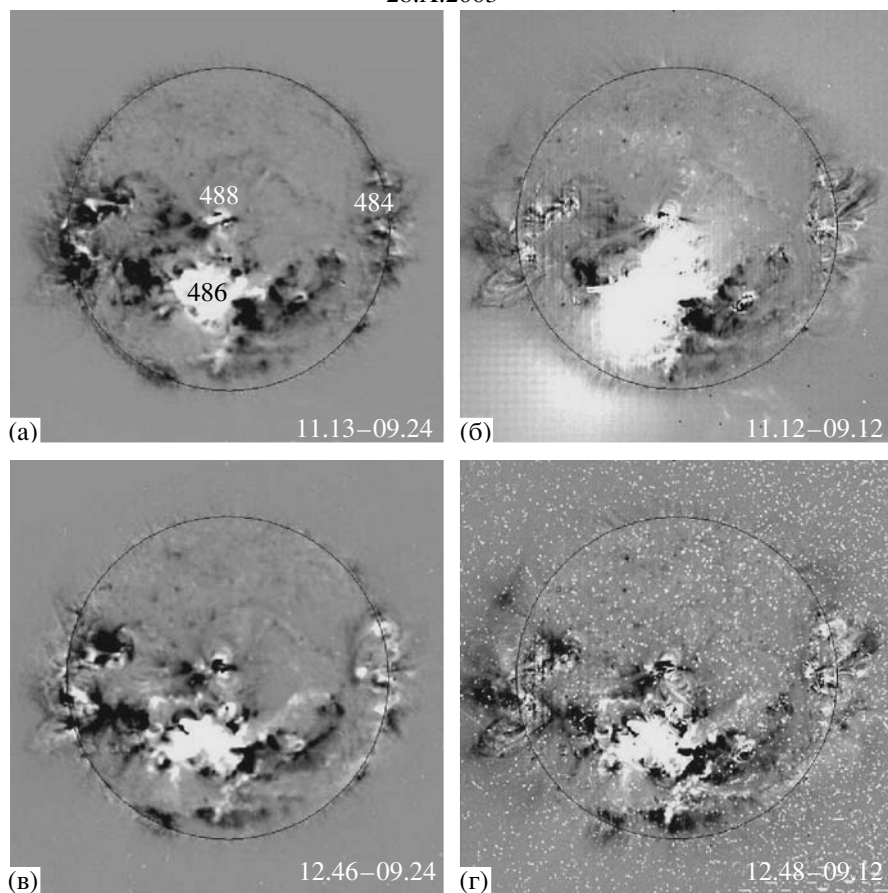


Рис. 15. Фиксированные разностные гелиограммы эруптивного события 28.X.2003 г. по данным двух телескопов крайнего УФ-диапазона *Корона-Ф/СПИРИТ* в канале 175 Å (а,в) и *SOHO/EIT* в линии 195 Å (б,г).

риод с 18.X по 5.XI.2003 г., показывает, что эти области относятся к классу вспышечно-продуктивных активных областей. Они обладают типичными для них свойствами, такими как рост поляризованного потока на коротких сантиметровых волнах (диапазон 1.7–5 см), неоднократными инверсиями поляризации в этом диапазоне и значительной переменностью излучения как на предварительной стадии, так и на основной стадии мощной вспышки.

8. МИКРОВОЛНОВЫЕ И МЕТРОВЫЕ РАДИОВСПЛЕСКИ ПО ДАННЫМ ИЗМИРАН

Наблюдения радиоизлучения Солнца проводились на комплексе аппаратуры ИЗМИРАН в режиме ежедневного мониторинга в интервалах 06–12 UT в октябре и 07–12 UT в ноябре. Комплекс включает в себя радиометры на фиксированных частотах 3000, 204 и 169 МГц, а также цифровые радиоспектрографы диапазона 270–25 МГц [18, 19]. Последние позволяют получать динамические спектры на разных временных шкалах, т.е. как сжатые во времени спектры за весь интервал

наблюдений для исследования крупномасштабных явлений, так и спектры с высоким временным разрешением для анализа тонкой структуры радиоизлучения. Обзорные динамические спектры за каждый день, а также подробные спектры и временные профили отдельных выдающихся событий представлены на сайте <http://helios.izmiran.troitsk.ru/lars/LARS.html>.

Прохождение по диску Солнца в октябре–ноябре быстро развивающихся крупных активных областей АО 10484, 10486 и 10488 сопровождалось высокой активностью в радиодиапазоне, связанной как с многочисленными КВМ, с высокой вспышечной активностью, так и с эволюцией самих областей. Так во время первого прохождения, в период с 19 по 30.X в метровом диапазоне наблюдалась интенсивная шумовая буря с сильным континуумом и многочисленными всплесками. Это свидетельствует о перманентном ускорении электронов в нижней и средней короне до энергий десятки кэВ над этими активными областями. На фоне шумовой бури удалось зарегистрировать ряд мощных радиовсплесков, связанных со вспышками рентгеновского балла X и КВМ ти-

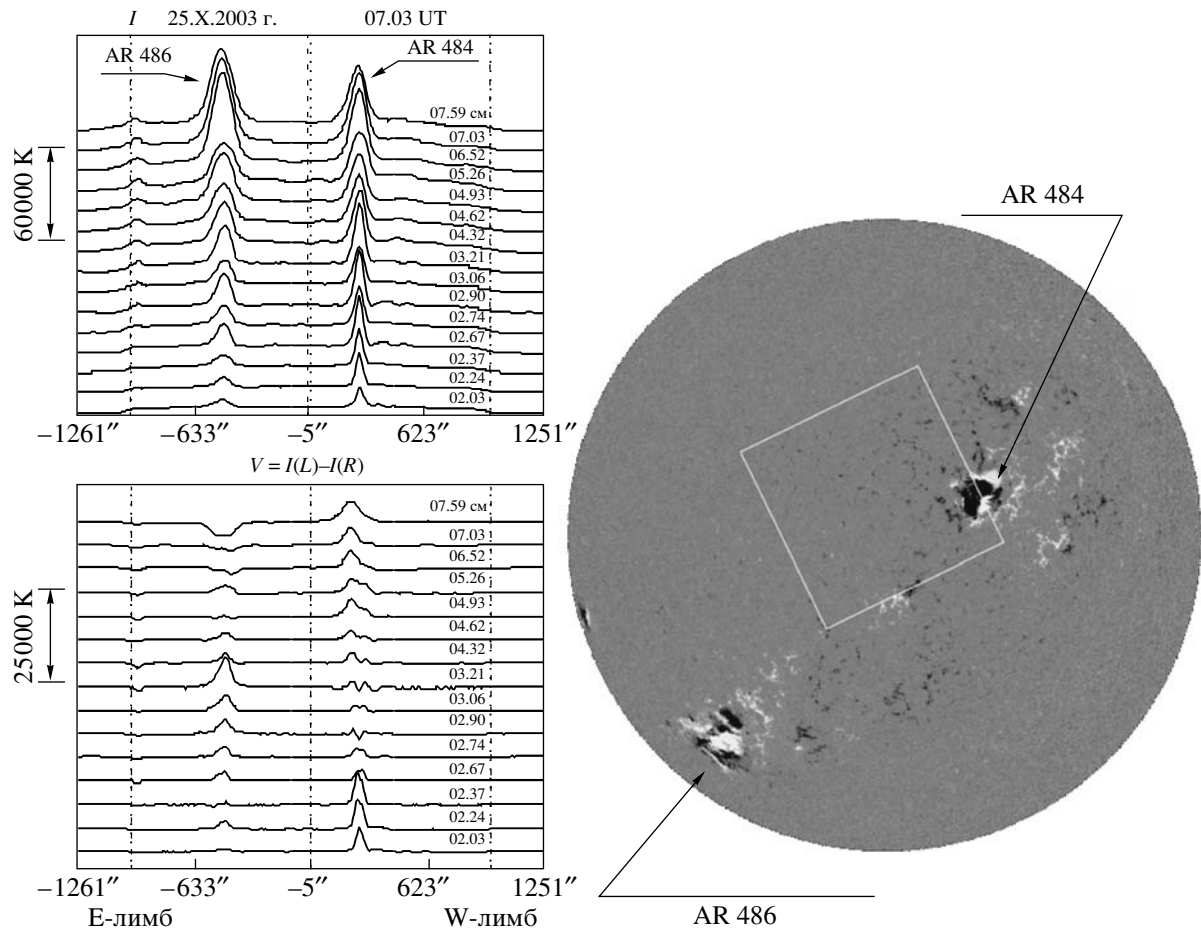


Рис. 16. Демонстрация ситуации на солнечном диске 25.X.2003г. Справа приведена магнитограмма по данным спутника *SOHO* MDI. Обе активные области AR484 и AR486 имеют сложную конфигурацию магнитных полей. Слева приведены многоволновые одномерные сканы РАТАН-600 для интенсивности $I = I(L) + I(R)$ (вверху) и для круговой поляризации $V = I(L) - I(R)$, (внизу). Левая поляризация имеет знак “плюс”. На сканах поляризации пунктиром выделены диапазоны частот для обеих АО, в которых структура неоднородна вследствие предвспышечных процессов.

па гало. Иллюстрацией такой активности может служить одно из мощнейших событий 28.X.2003 г.

Вспышка балла $4B/X > 17.2$ произошла в активной области АО 10486 (S16 E08) с максимумом в мягком рентгеновском диапазоне в 11.10 UT. Согласно данным коронографа *SOHO/LASCO*, в данном событии сначала (с 10.54 UT) наблюдался крупный КВМ над юго-восточным лимбом, а затем (в интервале 11.06–11.30 UT) начался еще один, гораздо более значительный КВМ типа гало с равномерным свечением вокруг всего затмевающего диска коронографа. Средняя скорость фронта главного КВМ в картинной плоскости на малых высотах была 1785 км/с, а на удалениях $>5R_s$ достигла 2125 км/с.

Как показано на нижней панели рис. 19, микроволновый радиовсплеск на частоте 3000 МГц характеризуется сложным временным профилем. В интервале 10.20–11.00 UT плотность потока составляла до 2500 с.е.п. Этот всплеск был связан с заметной активностью в АО 10486 и, по-видимому,

соответствовал первому из указанных выше КВМ. Намного более интенсивный всплеск начался в районе 11.00 UT. К 11.03 UT поток радиоизлучения достиг первого максимума порядка 10000 с.е.п. Затем после некоторого спада наблюдалась новая мощная и длительная компонента всплеска с плавным временным профилем и интенсивностью, которая в течение 4 мин (11.12–11.16 UT) превышала максимальный порог регистрации 13000 с.е.п.

Судя по сжатому динамическому спектру (верхняя панель рис. 19), в метровом диапазоне первому микроволновому всплеску соответствует континуальное излучение с медленным дрейфом излучения от высоких частот к низким. Начальная компонента основной вспышки сопровождалась мощной группой всплесков III типа. Эти всплески, как известно, возбуждаются потоками ускоренных электронов с энергией десятки кэВ, которые распространяются в короне вдоль открытых силовых линий магнитного поля. Затем, через 5 мин начался интенсивный структури-

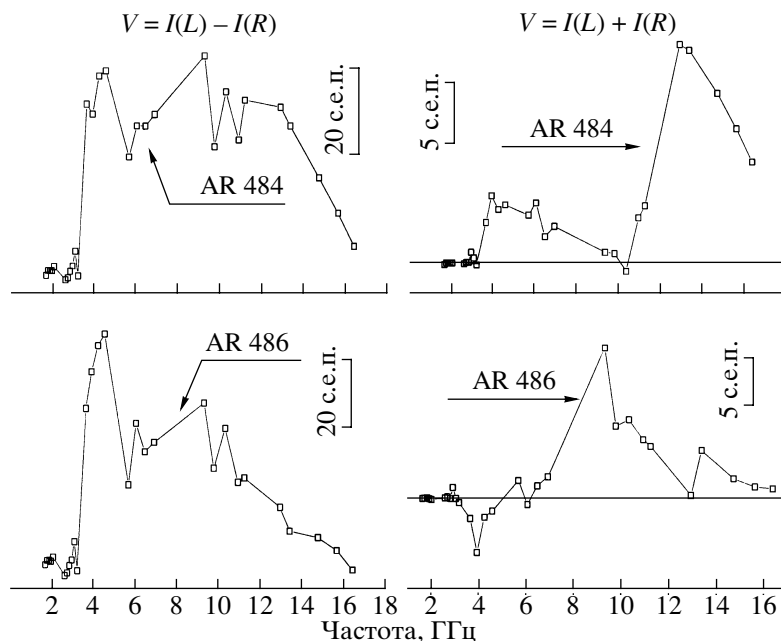


Рис. 17. Спектры излучения активных областей, присутствовавших на Солнце 25.X.2003г. Для группы AR 484 характерен рост спектра поляризованного потока на коротких волнах, а для группы AR 486 наблюдается смена знака круговой поляризации в диапазоне 6 см. Оба явления относят эти области к классу ВПАО.

рованный континуум, который продолжался до конца наблюдений.

Более детальный спектр в интервале 11.02–11.10 UT (средняя панель рис. 19) показывает, что на фоне интенсивной группы всплесков III типа выделяется сложная система полос с относительно более медленным частотным дрейфом, характерным для всплесков II типа. Имеются в виду полосы 1–2, а также несколько полос между точками 3 и 4. Сложный характер спектра указывает на множественность источников радиоизлучения и не позволяет однозначно указать место генерации, отождествив эти полосы как гармоники или расщепление.

Метровые радиовсплески II типа генерируются посредством плазменного механизма электронами, которые ускоряются на фронте ударных волн, распространяющихся в короне. Поршнем для этих волн может служить КВМ. Согласно оценкам, наблюдаемый в данном событии дрейф полос II типа соответствует весьма высокой скорости корональной ударной волны 3500–5000 км/с.

Эта величина превышает даже указанную выше и без того большую скорость КВМ. Такое отличие между скоростью ударной волны, рассчитанной по дрейфу всплеска II типа, и наблюдаемой скоростью КВМ может быть связано с двумя факторами: с весьма вероятным отличием реального распределения электронной плотности в короне от модельного в результате возмущений от предшествующей активности или с возможным наклоном излучающего участка фронта ударной волны по отношению к квазирadiaльному градиенту электронной плотности в короне.

В целом вся совокупность данных о событии 28.X.2003 г. свидетельствует о том, что главная вспышка включала в себя как импульсную, так и постэруптивную фазы. На импульсной фазе генерировались серия импульсных всплесков в микроволновом диапазоне и коррелирующие с ними всплески III и II типа в метровом диапазоне, т.е. имело место ускорение электронов и образование ударной волны. Во время постэруптивной фазы магнитное поле в обширном районе солнечной атмосферы, сильно возмущенное КВМ, релаксирует к новой квазиравновесной конфигурации посредством магнитного пересоединения в протяженных токовых слоях. Это сопровождается длительным энерговыделением и ускорением частиц. Именно с этим, по всей вероятности, связано появление на заключительной стадии события интенсивной и продолжительной микроволновой компоненты, зарегистрированной на частоте 3000 МГц.

Во многом аналогичная картина радиоизлучения наблюдалась и в других эруптивных событиях, которые удалось зарегистрировать в ИЗМИРАН в анализируемый период активности. Соответствующий анализ проводится в [20].

9. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОТДЕЛЬНЫХ СОБЫТИЙ 4.XI.2003 г.

Рекордная по своей мощности рентгеновская вспышка произошла 4.XI.2003 г. в АО 10487 на западном лимбе (S21 W88). Динамический диапазон приборов, работавших в это время в космосе,

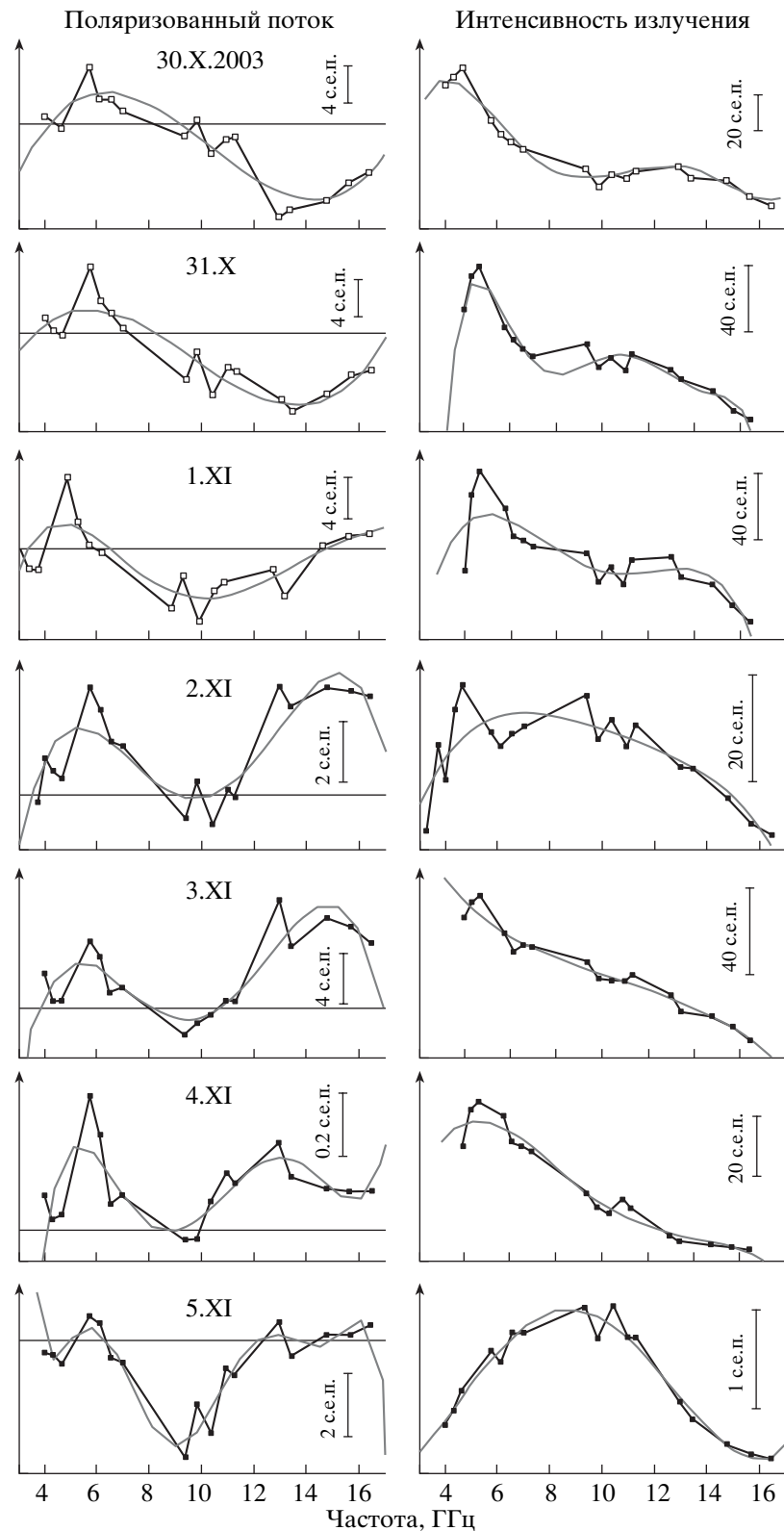


Рис. 18. Широкодиапазонные спектры поляризованного потока микроволнового радиоизлучения (слева) и временной профиль микроволнового радиоизлучения в течение периода с 30.X.2003 г. по 5.XI.2003 г. Справа – спектры интенсивности для того же периода.

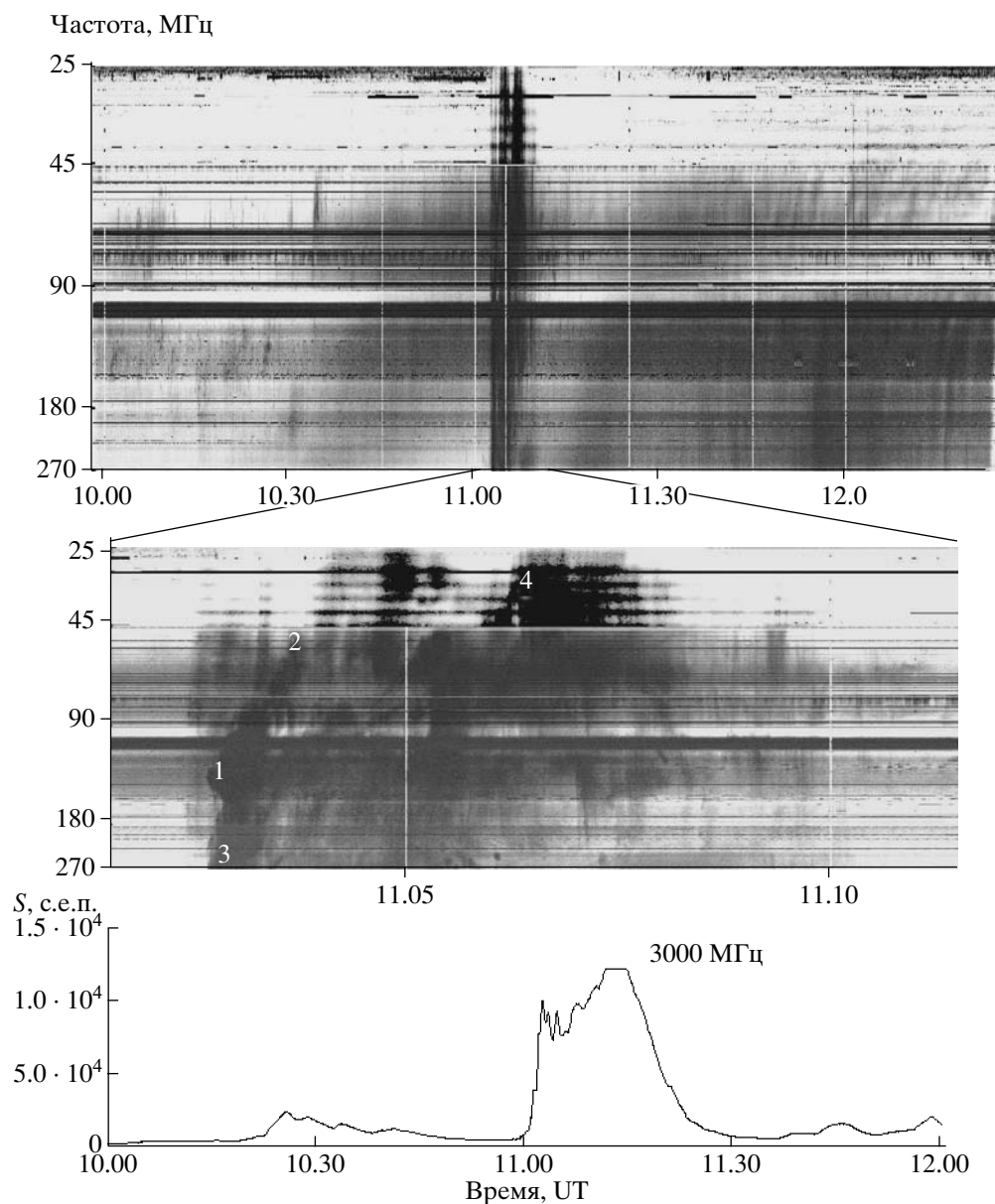


Рис. 19. Сжатый и подробный динамический спектр метрового радиоизлучения (верхняя и средняя панели) и временной профиль микроволнового всплеска (нижняя панель) в событии 28.X.2003 г. по данным ИЗМИРАН.

был недостаточен для получения качественных изображений из-за слишком большой амплитуды рентгеновского и ультрафиолетового всплеска в это время. В кинофильмах, снятых на ИСЗ, *TRACE* хорошо прослеживается динамика уярчений в большой аркаде петель после вспышки. Однако изображение самой вспышки в этом случае оказывается сильно искаженным из-за перегрузки приборов и растекания зарядов на соседние ячейки в ПЗС-матрицах. Такая же картина наблюдается для изображений с меньшим пространственно-временным разрешением на *SOHO/EIT* и в гораздо меньшей мере на *Корона-Ф/СПИРИТ*, так как там при регистрации изображения в телескопе СПИРИТ использовались микроканальные плас-

тины. Развитие вспышки в целом сопровождается появлением большого количества быстро изменяющихся мелкомасштабных деталей, а не одной какой-либо доминирующей особенности типа единственного односвязного токового слоя, магнитного острова, яркого плазмоида и т.п. КВМ, формирующийся на больших высотах, соответствует по своей геометрической конфигурации подъему скрученных магнитных жгутов и петель с электрическим током внутри них, что хорошо прослеживается по характеру изображений на фильмах, полученных телескопом СПИРИТ.

Вследствие ограниченного динамического диапазона используемых ныне приборов в рентгеновском и ультрафиолетовом участке спектра

большая мощность событий в этих и подобных случаях не позволяет получить качественных изображений. В самой интересной фазе максимального свечения этого нельзя сделать из-за перегрузок. Приборы просто не рассчитаны на качественную регистрацию изображений самых сильных и потому во многих отношениях интересных событий. Однако такие события происходят относительно редко. Поэтому можно было бы рекомендовать в будущем предусмотреть возможность автоматизированного снижения чувствительности приборов или использование каналов с низкой чувствительностью, которые желательно иметь в составе аппаратуры, если мы хотим получить надежную информацию о самых мощных солнечных вспышках. В связи с этим такое предложение было сделано недавно одним из авторов статьи для планируемой миссии *SDO*.

Комбинируя кадры, полученные в одном и том же спектральном участке телескопами EIT и SPIRIT для этого и других событий, можно попытаться несколько (приблизительно вдвое) улучшить временное разрешение. Результаты такой процедуры будут представлены в отдельном сообщении.

Совокупный геомагнитный сигнал от этой вспышки и обширного KBM, зарегистрированного коронографом LASCO, практически отсутствует из-за того, что мощный KBM был направлен в западную сторону и прошел мимо Земли. Этим же объясняется весьма слабый сигнал в нейтронных мониторах. Таким образом, рекордная по своим параметрам рентгеновская вспышка практически никак не сказалась в параметрах солнечного ветра и межпланетного поля на орбите Земли. Разумеется, ионосферный отклик на усиление коротковолновой электромагнитной радиации в это время также должен быть рекордным по своей величине, что действительно имело место и дало возможность косвенным образом в работе [21] оценить мощность пришедшего к Земле рентгеновского излучения на уровне 4.8 мВт/м^2 в канале регистрации ИСЗ *GOES*, что формально может соответствовать рентгеновскому баллу X48 по принятой ныне для сопоставления шкале ИСЗ *GOES*. Подробное исследование этого вопроса не входит в нашу задачу, однако здесь еще раз следует отметить всю условность используемой системы рентгеновских баллов для солнечных вспышек, о чем уже говорилось в разделе 1. Детальные описания ситуации на Солнце, в гелиосфере и в магнитосфере в рассматриваемый промежуток времени можно найти в Интернете на различных страницах по солнечно-земной физике, в том числе, поддерживаемых прогностическими центрами NOAA в Боулдере (США) и SIDC в Брюсселе (Бельгия).

10. НАБЛЮДЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ МЕТОДОМ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ

Радиоастрономический метод межпланетных мерцаний основан на измерении флуктуаций интенсивности излучения естественных радиоисточников достаточно малых угловых размеров. Модуляция интенсивности связана с присутствием на луче зрения движущихся неоднородностей концентрации плазмы. Ежедневные наблюдения межпланетных мерцаний большого числа (около 100) мерцающих радиоисточников позволяют следить за динамикой пространственного распределения уровня турбулентности в солнечном ветре и тем самым детектировать распространяющиеся крупномасштабные возмущения в солнечном ветре. Радиоастрономические исследования солнечного ветра в течение ряда лет проводятся в ПРАО ФИАН на антенне БСА ФИАН в метровом диапазоне волн (частота 111 МГц). Для каждого источника измеряется индекс мерцаний m (или относительная дисперсия временных флуктуаций интенсивности $\delta I(t)$) $m^2 = \langle \delta I^2(t) \rangle / \langle I \rangle^2$.

Основной вклад в модуляцию интенсивности источников в используемом диапазоне волн вносят неоднородности концентрации с характерными масштабами порядка нескольких сотен километров, расположенные в слое межпланетной среды, примыкающем к прицельной точке луча зрения на источник. Межпланетные мерцания имеют малые характерные времена (порядка 1 с), что позволяет выделять их на фоне сравнительно медленных (характерные времена порядка 10 с и более) ионосферных мерцаний. Прохождение через луч зрения возмущенных областей, содержащих повышенный по сравнению с невозмущенным фоном уровень турбулентности, сопровождается усилением мерцаний над известным для каждого источника калибровочным уровнем. Зондируемая область солнечного ветра для метрового диапазона волн охватывает широкую область гелиоширот от приэкваториальных до приполярных в диапазоне гелиоцентрических расстояний от 0.5 а.е. до 1 а.е.

Высокоактивный период в октябре–ноябре 2003 г. также был охвачен наблюдениями межпланетной плазмы, которые проводились на макете 16-лучевого базового радиотелескопа. В этих наблюдениях активные события на Солнце проявились в трех эффектах:

мощное и продолжительное радиоизлучение шумового характера на 111 МГц;

резкое усиление межпланетных мерцаний наблюдавшихся радиоисточников;

резкое усиление ионосферных мерцаний радиоисточников.

Радиоизлучение шумового характера умеренной силы (с потоком порядка потока радиоизлучения спокойного Солнца) обнаружилось уже

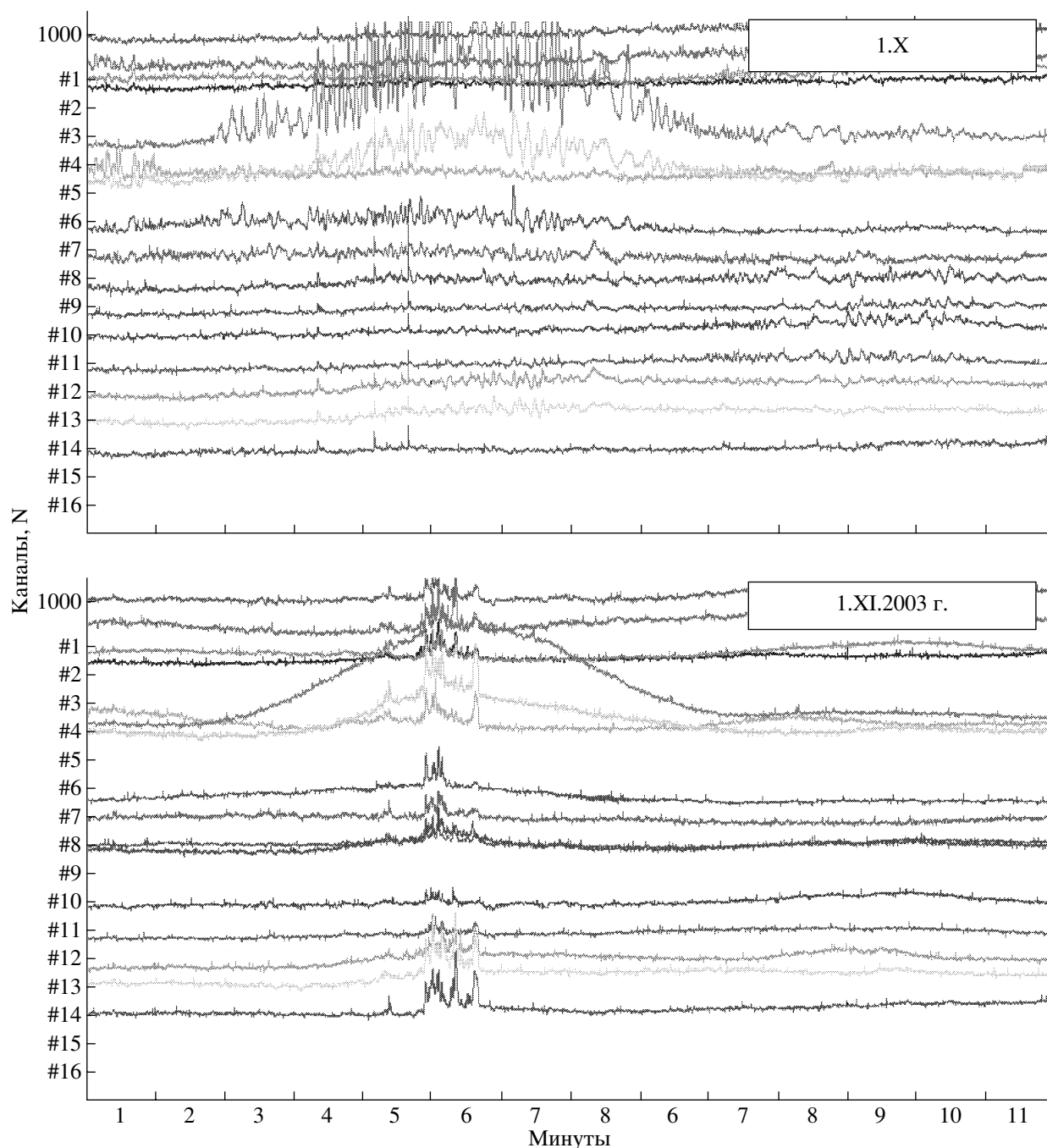


Рис. 20. Пример резкого усиления мерцаний, вызванного межпланетным возмущением от вспышки 29.X.2003 г. Наблюдаемый источник 3C352, время наблюдения (в максимуме источника) 11.58 UT.

18.X, когда AR 10486 еще только появилась на восточном лимбе. В последующие дни вплоть до 30.X все наблюдения радиоисточников в дневной части неба были полностью зашумлены мощнейшим радиоизлучением от Солнца, что свидетельствует о силе шумовой бури. Относительно слабое радиоизлучение от Солнца такого же характера регистрировалось вплоть до 2.XI.

В период после 30.X наблюдались уже и дневные источники. При этом значительное усиление межпланетных мерцаний (с возрастанием индек-

са мерцаний в два-три раза по сравнению с невозмущенными периодами) зарегистрировано практически для всех наблюдавшихся радиоисточников. Пример такого усиления мерцаний, вызванного межпланетным возмущением от вспышки 29.X, показан на двух панелях рис. 20, из которого видно, что усиленные мерцания, наблюдавшиеся 31.X, 1.XI сменились типичными для невозмущенных периодов слабыми мерцаниями. Здесь просвечиваемая радиоисточником 3C 352 область межпланетной среды соответствует удалению на

Таблица 3. Вспышки конца октября – начала ноября 2003 г. (СОНГ, СПР-Н)

<i>N</i>	Дата	Время, UT	Балл	Координаты	АО	Максимальная энергия, МэВ
1	23.X	08.17–08.43	X5.4/1B	S21 E88	10486	4–7
2	26.X	06.16–06.25	X1.2/3B	S15 E44	10486	0.15–0.5
3	26.X	17.21–18.19	X1.2/1N	N02 W38	10484	–
4	28.X	11.02–11.13	X17.2/4B	S16 E08	10486	60–100
5	29.X	20.38–20.55	X10/2B	S15 W02	10486	4–7
6	2.XI	17.03–17.25	X8.3/2B	S14 W56	10486	–
7	3.XI	01.17–01.29	X2.7/2B	N10 W83	10488	0.5–1.3
8	3.XI	09.47–09.58	X3.9/2F	N08 W77	10488	0.04–0.1
9	4.XI	19.32–19.57	X28/3B	S19 W83	10486	100–200

1 а.е. от Солнца. Из данных по межпланетным мерцаниям, в частности, из рис. 20 следует, что межпланетная плазма вблизи орбиты Земли через 40 часов, прошедших после вспышки 29.X, была сильно возмущена, а релаксация к невозмущенному состоянию происходила в течение последующих суток. Из этих данных также следует, что средняя скорость распространения возмущения от Солнца превосходила 1000–1100 км/с.

В возмущенный период для всех источников, даже для тех, которые на межпланетной плазме не мерцают, отмечалось значительное усиление ионосферных мерцаний, что свидетельствует о повышенном уровне флуктуаций плотности плазмы с масштабами порядка 1 км в среднеширотной ионосфере Земли.

11. ЖЕСТКОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА НА БОРТУ *КОРОНАС-Ф*

На подъеме и в максимуме 23 цикла солнечной активности солнечных вспышек класса X10 (по данным мягкого рентгеновского излучения *GOES*) не наблюдалось, и статистика γ -вспышек, накопленная за этот цикл, была существенно хуже, чем для 20–22 циклов. Тем более неожиданным было проявление экстремально высокой солнечной активности на спаде 23-го цикла: за период с 23.X.2003 по 4.X.2003 на Солнце произошло 9 вспышек класса X, в том числе вспышки X17.4 (28.X.2003), X10 (29.X.2003) и X28 (4.XI.2003). Приборами СОНГ и СПР-Н на борту космической обсерватории *Коронас-Ф* ($h_{\text{орб}} = 500$ км, $I = 82.5^\circ$, $T_{\text{обр}} = 94.5$ мин) были зарегистрированы 7 из них, в том числе три из четырех наиболее мощных вспышек. Данные об этих вспышках приведены в табл. 3. В колонке UT указано время начала и конца рентгеновского излучения с энергией 50–150 кэВ по данным СОНГ (или в случае отсутствия данных СОНГ, 40–100 кэВ по данным СПР-Н). Для двух вспышек, для которых данные *Коронас-Ф* отсутствовали (выделены курсивом),

указано время от начала до максимума вспышки в мягком рентгеновском излучении по данным *GOES*. В табл. 3 также приведены данные о максимальной энергии нейтрального излучения, зарегистрированного в данном событии приборами СОНГ и СПР-Н.

Из табл. 3 видно, что максимально продуктивной в плане вспышек класса X была область NOAA 10486 – шесть из девяти, причем за все четыре вспышки класса выше X8 была ответственна именно она.

На рис. 21 показаны временные зависимости возрастаний потоков рентгеновского и γ -излучения, полученные во время трех наиболее мощных вспышек приборами СОНГ и СПР-Н, а также данные *GOES-12* о потоках теплового рентгеновского излучения (SXR) (0.5–4 Å) и производная SXR по времени. Из рис. 21 видно, что вспышки 28.X и 4.XI были не только более интенсивными в SXR, но и имели значительно более жесткий спектр γ -излучения (вплоть до 100 МэВ). Во время вспышек 28.X и 4.XI прибором СОНГ были зарегистрированы солнечные нейтроны ($E_n > 20$ МэВ). Для вспышки 28.X их максимальный поток составил 0.07 ± 0.02 частиц на $\text{см}^2 \text{с}^{-1}$, что сопоставимо как с потоками, измеренными ранее на *SMM/GSR*, так и с данными *Коронас-Ф* для вспышки 25.VIII.2001 года.

Сопоставление всплесков рентгеновского излучения в диапазоне десятков-сотен кэВ по наблюдениям на *Коронас-Ф* со всплесками радиоизлучения от сантиметрового до субмиллиметрового диапазона по опубликованным наземным данным показывает хорошую синхронность их временного развития в наблюдавшихся солнечных вспышках. Синхронное изменение рентгеновского и субмиллиметрового радиоизлучения в течение импульсной фазы, длившейся во вспышке 4.XI.2003 г. несколько минут, свидетельствует об одновременности энерговыделения в этих спектральных диапазонах с точностью до временного разрешения измерений, которое составляло 4 с в случае регистрации рентгеновского излучения на *Коронас-Ф*. Временное разрешение радионаблюдений на ст. Леонидо в диапазоне частот 200–400 ГГц было значительно более высоким и поз-

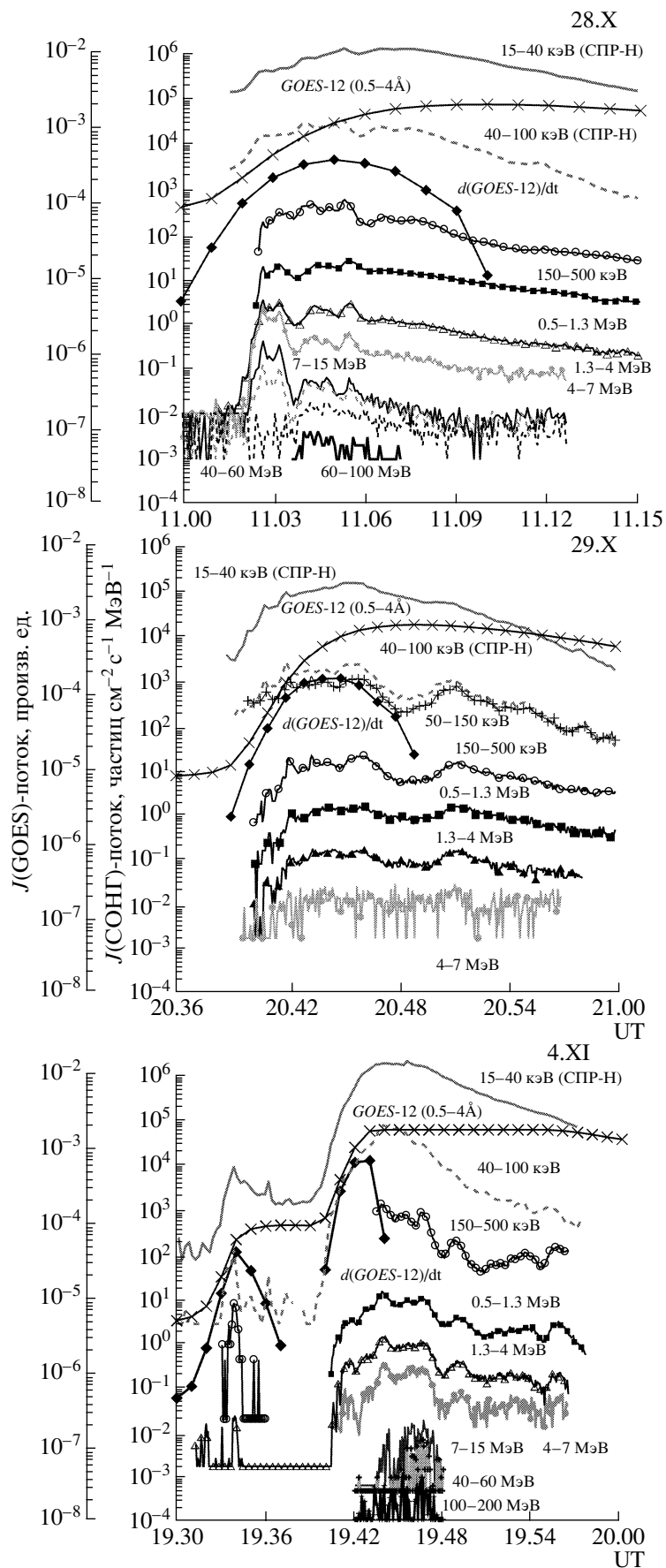


Рис. 21. Обзорные графики, построенные по данным приборов СОНГ и СПР-Н, установленных на борту ИСЗ *Корона-Ф*. В октябре–ноябре 2003 г. наблюдались случаи, когда сильно возрастали потоки жесткого рентгеновского и гамма-излучения Солнца в широком диапазоне энергий, указанных на графиках. Зарегистрированы потоки энергичных нейтронов от солнечных вспышек.

воляло регистрировать сильные вариации в миллисекундном интервале [22]. Физическая причина такого синхронизма связана с тем, что оба вида излучения вызваны одними и теми же агентами – электронными пучками в атмосфере Солнца. В тех и других данных прослеживается отчетливая синхронная модуляция излучения в минутном масштабе времени. Немонотонный характер изменений связан с последовательным развитием и угасанием отдельных дискретных очагов излучения в магнитных петлях вспышечной аркады, что особенно хорошо можно проследить по фильмам, снятым на ИСЗ *TRACE* во время этой рекордно мощной лимбовой вспышки 4.XI.2003 г.

12. ВСПЛЕСКИ ИНТЕНСИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Сильные вариации величины потоков СКЛ, их анизотропии, ионного состава и энергетических спектров содержат в себе информацию о процессах ускорения и распространения частиц на Солнце и в межпланетном пространстве.

26.X первая значительная рентгеновская вспышка на Солнце (X1.2; 3B) произошла в 05.57–07.33 UT в АО 10486 (S15E44). Быстрый приход частиц от этой вспышки в районе Земли не наблюдался. Небольшая ударная волна замечена в ~05 UT 28.X. Вторая вспышка того же дня, тоже класса X1.2, менее интенсивная в оптике и в микроволновом радиоизлучении, произошла в западной АО 10484 (N03W38) в 17.21–19.21 UT. Прибором СКИ-3 (кремниевый телескоп) на ИСЗ *Корона-Ф* измерялись потоки протонов и ядер He в энергетических интервалах 2.3–4.2 и 4.4–19 МэВ/нуклон. Для более тяжелых ядер измерения потоков в двух энергетических интервалах дополнялись измерениями энерговыделений в трех детекторах, что давало информацию о заряде и энергии каждого ядра в диапазоне от C до Si. Заметное возрастание потоков протонов в обоих энергетических интервалах наблюдалось в северной полярной шапке (СПШ) уже в 19.50 UT. Малое время задержки частиц, крутой фронт нарастания потоков, значительная анизотропия и заметная дисперсия по скоростям соответствуют быстрому распространению частиц в невозмущенном межпланетном пространстве. Измеренные потоки и идентификация событий показаны на рис. 22.

Наибольшие в этой серии вспышек потоки ядер СКЛ пришли после вспышки X17.2; 4B в АО 10486 (S16E08), наблюдавшейся 28.X в 09.51–11.24 UT. Распространение частиц от этой вспышки

происходило более сложно, поскольку потоки частиц модулировались мощной ударной волной (УВ).

Первый приход СКЛ от этой вспышки наблюдался в ЮПШ в 12.46 UT для протонов с энергиями 4.4–19 МэВ. Быстрый приход частиц, выраженная дисперсия по скоростям и быстрое нарастание потоков говорят о свободном распространении от места ускорения на Солнце вдоль ММП. Однако по достижении максимумов потоков, в ~18 UT, вместо спада наблюдается подъем, связанный с УВ и становящийся все более крутым по мере ее приближения. Основная масса частиц пришла вместе с УВ и за ее фронтом. Этот максимум, как обычно для событий такого типа, наиболее сильно проявляется в частицах меньших энергий и энергетический спектр в максимуме более крутой, чем спектр предшествующих потоков СКЛ. Показатель спектра для ядер кислорода в диапазоне 10–37 МэВ/нуклон равен –3.2 в максимуме и –(2.1–2.3) до прихода УВ (рис. 23).

Следующая сильная вспышка (X10; 2B) произошла в той же АО 10486 (S15W02) в 20.37–21.01 UT 29.X. Приход частиц от этой вспышки трудно визуально выделить на фоне значительных потоков СКЛ от вспышки 28-го. Но показатель энергетического спектра для усредненного потока ядер O в 02–10 UT 30.X был –2.1, т.е. такой же, как в первые часы возрастания от предыдущей вспышки. Возрастание потоков ядер после 19 UT 30.X связано с приходом KBM (CME) и так же, как и в предыдущем событии, спектр для ядер O стал заметно круче: показатель для потоков O в 20–24 UT 30.X равен –3.6. Обращает на себя внимание также повышенное содержание ионов неона в это время (табл. 4).

Еще одна сильная вспышка (X8.3/2B) в той же АО (S14W56) наблюдалась 2.XI в 17.03–17.39 UT. Начало возрастания потоков протонов и ядер He с энергиями 4.4–19 МэВ/нуклон было видно в ЮПШ в 19.45 UT. Это возрастание похоже на первое в этой серии событий СКЛ и его характер соответствует распространению СКЛ в слабо возмущенном ММП. Показатель энергетического спектра для суммированных по событию (до 15 часов 3.XI) потоков ядер O равен –3.7. Возрастание потоков СКЛ после 16 часов 3.XI может быть связано с менее сильными вспышками (X2.7/2B и X3.9/2F), наблюдавшимися в этот день в АО 10488 у западного лимба, и потоками KBM от вспышки 2.XI.

Временами отмечается весьма заметная анизотропия потоков СКЛ, наиболее отчетливо проявившаяся 26–27.X в различном заполнении ими обеих полярных шапок (рис. 24). Направление ММП в это время в течение нескольких часов

преимущественно к югу и к Солнцу способствовало образованию магнитных трубок, непосредственно соединявших ЮПШ с местом ускорения частиц вблизи Солнца. Невозмущенное магнитное поле на трассе распространения частиц во внутренней гелиосфере давало возможность для прямого прихода частиц в точку наблюдения без заметного рассеяния их назад за орбитой Земли. По истечении этого времени сильная анизотропия на орбите Земли исчезла и сменилась практически изотропным распределением. Аналогичная картина видна и в данных ИСЗ Метеор. Во многом сходная картина следует из наблюдений полных потоков протонов (флюенсов) с энергией более 30 МэВ на ИСЗ серии *GOES* (<http://spidr.ngdc.noaa.gov>) в течение рассматриваемого промежутка времени. Как обычно, приход протонов вдоль невозмущенного спирального магнитного поля бывает иногда виден уже через несколько десятков минут после мощной рентгеновской вспышки (http://sec.noaa.gov/ftpmenu/indices/2003_events.html).

Если ограничиться рассмотрением всего лишь нескольких или даже порядка десятка наибольших событий такого рода, зарегистрированных до сих пор, то все они наблюдались в годы, отстоящие обычно не более двух-трех лет по обе стороны от максимумов солнечных циклов, определяемых по сильно сглаженным числам солнечных пятен. Если же при этом использовать для характеристики солнечной активности другие индексы, например, числа солнечных пятен, не сильно усредняя и не сглаживая их по времени, то в них можно обнаружить квазидвухлетние вариации, особенно заметные вблизи максимумов одиннадцатилетних циклов в виде так называемых провалов Гневывшева. Естественно, что это явление может найти свое отражение и в наблюдаемых потоках протонов. Однако статистика не столь велика, чтобы делать какие-либо более определенные и детальные выводы о возможном группировании редких событий по годам внутри солнечных циклов. Разумеется, числа солнечных пятен по самой своей сути не являются лучшими или единственными индексами в этом отношении.

Таким образом, появление ряда больших протонных событий на спаде 23-го цикла солнечной активности в этом смысле не является исключительным явлением.

13. О ПОЛЯРИЗАЦИИ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ВО ВРЕМЯ ВСПЛЕСКА АКТИВНОСТИ В ОКТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2003 г.

Степень поляризации жесткого рентгеновского излучения (~10–100 кэВ) солнечных вспышек является одной из важнейших характеристик, измерение которой позволило бы судить о направ-

ленности потоков ускоренных электронов, генерирующих это излучение при торможении в атмосфере Солнца. Однако экспериментальные данные на сей счет до сих пор отсутствовали. Степень поляризации измерялась лишь в нескольких работах и только в диапазоне относительно мягкого рентгеновского излучения (длина волны около 0.8 Å) всего для нескольких вспышек. Полученные при этом значения лежат в пределах от нескольких процентов до 20–40%.

Для измерения поляризации жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек на солнечной космической обсерватории *Коронас-Ф* используется прибор СПР-Н [23]. Он позволяет определять степень поляризации рентгеновского излучения в диапазонах энергии регистрируемых фотонов E_γ : 20–40, 40–60, 60–100 кэВ. В основе метода измерения поляризации лежит томсоновское рассеяние солнечных фотонов в бериллиевых пластинах. Пять пластин металлического бериллия установлены внутри полой шестигранной призмы, по граням которой вокруг рассеивателя симметрично расположены шесть сцинтилляционных детекторов, в которых для исключения регистрации заряженных частиц используется фосвич: CsI(Na)/пластмассовый сцинтиллятор на основе полистирола. Геометрическая площадь каждого детектора составляет 8 см², с учетом поглощения в защитных материалах, эффективности рассеивания и регистрации в детекторе, эффективная площадь меняется от ~0.3 см² при $E_\gamma = 20$ кэВ до ~1.5 см² при $E_\gamma = 100$ кэВ.

Для неполяризованного излучения вероятность рассеяния под различными углами относительно первоначального направления движения фотона одинакова, поэтому оно будет рассеиваться азимутально-симметрично и детекторы в этом случае должны регистрировать одинаковую интенсивность. В случае плоско-поляризованного излучения большинство фотонов рассеивается перпендикулярно плоскости поляризации. Если считать, что при ориентации прибора в направлении на Солнце фотоны падают преимущественно под прямым углом к поверхности рассеивателя, то, очевидно, что плоско-поляризованное излучение будет рассеиваться в бериллиевых пластинах в основном вдоль плоскости пластин. При этом пары противоположно расположенных детекторов соответствуют плоскостям поляризации, повернутым на 60° друг относительно друга. Поскольку в случае плоско-поляризованного излучения имеет место азимутальная анизотропия рассеянных фотонов, должен наблюдаться неодинаковый счет в разных парах датчиков – наибольшее количество отсчетов должны показывать датчики, расположенные максимально близко (в пределах $\pm 60^\circ$) к плоскости, перпендикулярной плоскости поляризации. Таким образом, различие скоростей счета детекторов позволяет определить степень поляризации $P_{\text{изм}}$ регистрируемого излучения и, в

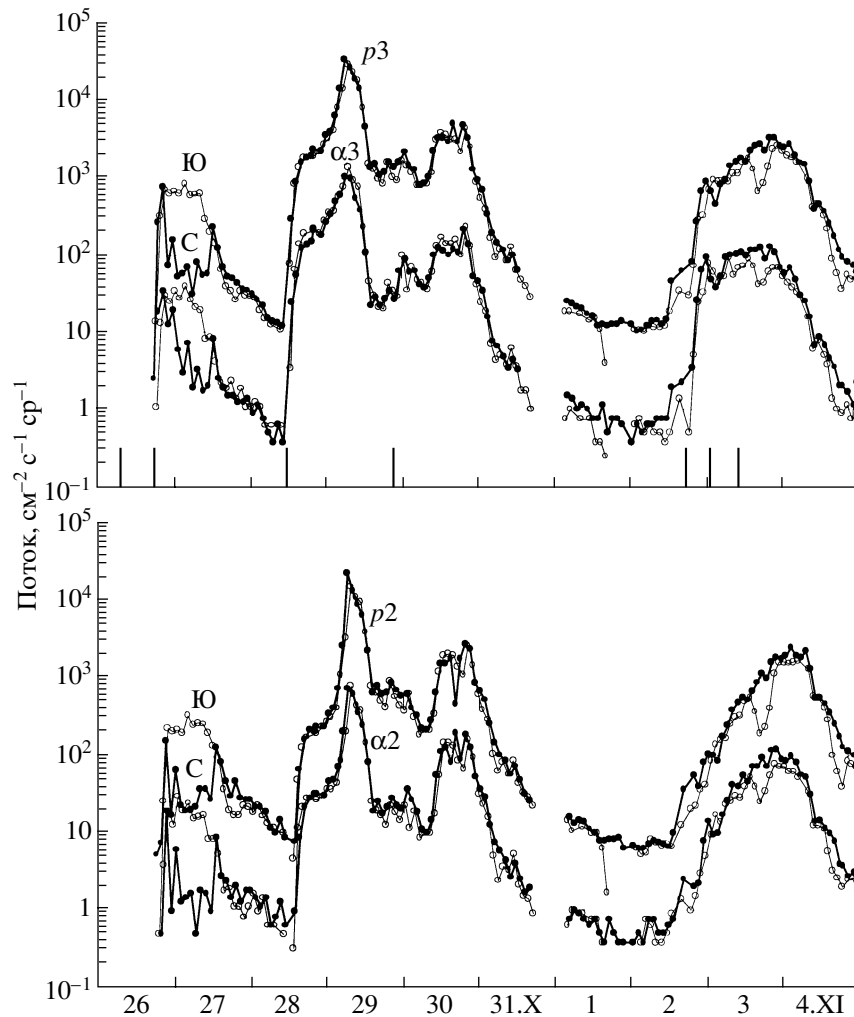


Рис. 22. Потоки ядер СКЛ в Северной и Южной полярных шапках в октябре–ноябре 2003 г. Вертикальными метками на оси абсцисс (верхняя панель) указаны времена сильных солнечных вспышек: X1.2, 3b в АО 0486 (S15E44); X1.2, 1n в АО 0484 (N02W38); X17.2, 4b в АО 0486 (S16E08); X10.0, 2b в АО 0486 (S15W02); X8.3, 2b в АО 0486 (S14W56); X2.7, 2b в АО 0488 (N10W83); X3.9, 2f в АО 0488 (N08W87); p2, α2: p, He (2.3–4.2 МэВ/нуклон); p3, α3: p, He (4.4–19 МэВ/нуклон).

принципе, угол ϕ поворота плоскости поляризации по отношению к паре детекторов.

Кроме того, прибор позволяет детально измерять временной профиль интенсивности рентгеновского излучения в диапазоне энергий 15–100 кэВ, определять величину потока и давать оценку жесткости спектра в указанном диапазоне энергий. Для этого используется узконаправленный патрульный детектор, выполненный на основе сцинтиллятора – кристалла CsI(Na) с эффективной площадью $\sim 1 \text{ см}^2$ ($E_\gamma = 40 \text{ кэВ}$).

Величины $P_{\text{изм}}$ и ϕ связаны с измеряемыми в каждой экспозиции числами отсчетов, относящимися к каждой паре детекторов N_i ($i = 1, 2, 3$)

$$P_{\text{изм}} = \frac{N_i^{\max} - N_i^{\min}}{N_i^{\max} + N_i^{\min}} \frac{N_i + N_j - 2N_k}{\sum_{i=1}^3 N_i} \frac{1}{\cos 2\phi},$$

где $N_i^{\max}$ и $N_i^{\min}$ – максимальный и минимальный отсчеты при регистрации полностью поляризованного излучения, $i \neq j \neq k$ выбираются так, чтобы $(N_i + N_j - 2N_k)/\cos 2\phi > 0$.

Для того чтобы по измеряемым величинам N_i определить $P_{\text{изм}}$, было проведено моделирование томсоновского рассеяния в бериллиевых пластинах для вертикально падающего плоско-поляризованного излучения. Для заданной величины поляризации падающего излучения P_0 (которая выбиралась в интервале от 0 до 100%) в зависимости от угла ϕ рассчитывались величины $N_i / \sum_{i=1}^3 N_i$, характеризующие долю рассеянного поляризованного излучения, попадающего в заданную пару детекторов относительно полного потока, падающего на рассеиватель. Полученные зависимости позволяют решать обратную задачу – по

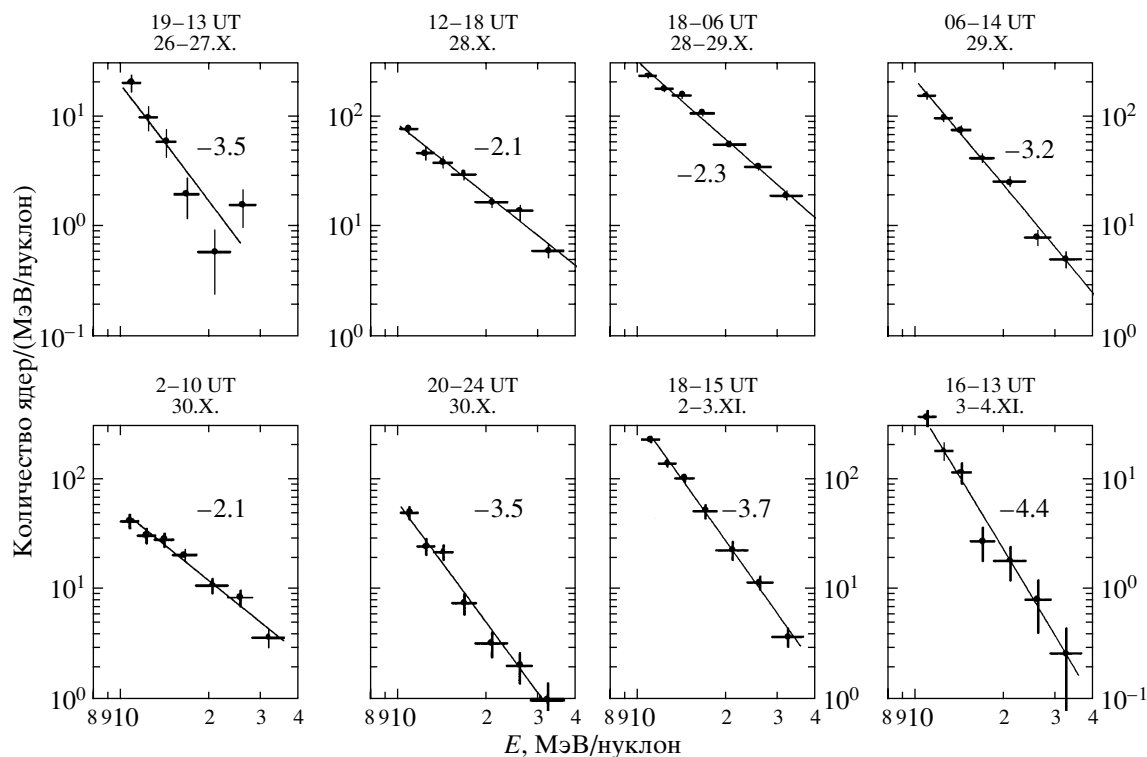


Рис. 23. Количество ядер СКЛ в полярных шапках 26.X–4.XI.2003: энергетические спектры ядер кислорода.

измеренным величинам определять степень поляризации $P_{\text{изм}}$ падающего излучения с учетом угла ϕ .

Поляриметром жесткого рентгеновского излучения СПР-Н зарегистрированы шесть рентгеновских вспышек в октябре–ноябре 2003 г., в том числе три из четырех наиболее мощных – 28 и 29.X, 4.XI. Источником вспышек 29.X.03 (X10/2В) и 4.XI.03 (X28/4В) являлась одна и та же активная область 10486, 29.X она находилась почти в центре солнечного диска (S15W02), 4.XI – на западном крае лимба (S19W83).

Для указанных вспышек на рис. 24 изображены временные профили показаний патрульного детектора СПР-Н, а также рентгеновских мониторов спутников *GOES*. Эти зависимости характеризуют изменение потока теплового и жесткого (тормозного) рентгеновского излучения во время вспышек. На рисунке представлены как исходные временные зависимости значений интенсивности, построенные по величинам скоростей счета в каналах патрульного детектора прибора СПР-Н, так и временные профили, “очищенные”

Таблица 4. Относительный химический состав ядер с энергией 11.4–23 МэВ/нуклон во вспышках СКЛ 26.X–4.XI 2003 г.

Время, дата	C	N	O	Ne	Mg	Si
19.00–13.00 26.X–27.X	43 ± 17	10.8 ± 7.1	100	10.8 ± 7.1	30 ± 14	24 ± 11
12.00–18.00 28.X	48.2 ± 6.7	12.0 ± 2.7	100	13.6 ± 2.9	24.4 ± 4.2	23.1 ± 4.1
18.00–06.00 28.X–29.X	46.5 ± 3.3	12.3 ± 1.4	100	11.4 ± 1.4	24.5 ± 2.2	21.1 ± 1.9
06.00–14.00 29.X	44.1 ± 4.8	12.6 ± 2.0	100	14.0 ± 2.2	20.6 ± 2.9	13.6 ± 2.2
14.00–10.00 29.X–30.X	41.8 ± 5.4	12.1 ± 2.4	100	17.3 ± 2.9	22.4 ± 3.6	19.3 ± 3.3
10.00–01.00 30.X–31.X	39.9 ± 5.6	14.9 ± 2.8	100	28.3 ± 4.2	30.4 ± 4.6	20.5 ± 3.5
18.00–15.00 2.XI–3.XI	33.2 ± 3.9	13.3 ± 1.9	100	13.4 ± 1.9	19.5 ± 2.5	14.9 ± 2.1
16.00–13.00 3.XI–4.XI	45 ± 13	11.6 ± 5.4	100	23.2 ± 8.6	29 ± 10	10.1 ± 4.1

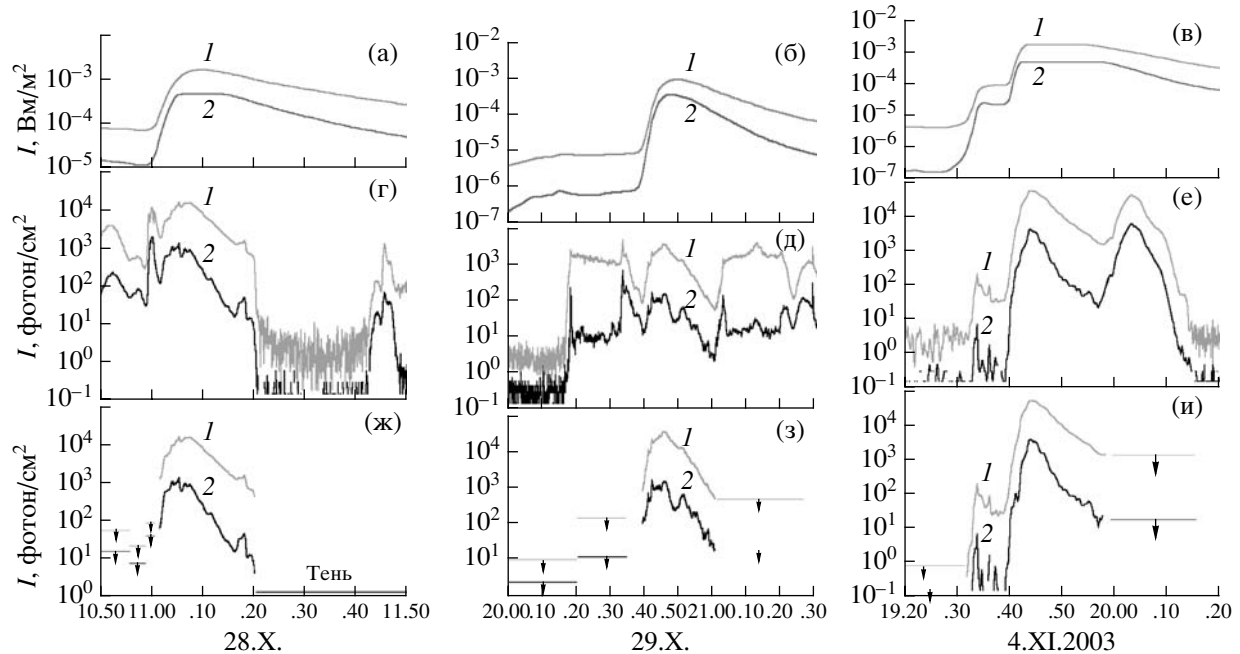


Рис. 24. Временной ход интенсивности рентгеновского излучения во время вспышек 28.X.03, 29.X.03, 04.XI.03. Приведены данные GOES (а, б, в, кривые 1 соответствуют каналу 1–8 Å, кривые 2 – 0.5–4 Å), показания патрульного детектора прибора СПР-Н (г, д, е, 1 – канал 15–40 кэВ, 2 – 40–100 кэВ) и показания патрульного детектора прибора СПР-Н после вычитания фона (ж, з, и, 1 – канал 15–40 кэВ, 2 – 40–100 кэВ).

от фоновых вариаций. Для этого из исходных значений скорости счета вычитались величины, измеренные во время предыдущего витка орбиты спутника в точках с геомагнитными координатами, наиболее близкими к тем, которые соответствовали моментам регистрации излучения вспышки. При пересечении областей захваченной радиации из-за сильной переменности фона погрешность в определении интенсивности собственно вспышечного излучения велика, поэтому в таких случаях указаны лишь верхние пределы. При попадании спутника в область тени солнечное излучение не регистрировалось. В силу указанных причин для всех трех вспышек надежные данные прибора СПР-Н имеются только для тех временных интервалов, в которых фон был почти постоянным (области геомагнитного экватора и полярных шапок). Поскольку для таких интервалов погрешность в определении интенсивности была невелика и определялась главным образом статистическим разбросом значений скорости счета, на временных профилях вспышек можно проследить вариации показаний патрульного детектора с характерными временами порядка десятков секунд, которые не являются аппаратными, а обусловлены реальными пульсациями интенсивности.

На рис. 25 можно видеть заметное возрастание поляризации над фоновыми значениями. Следует отметить, что в ходе всего полета спутника осуществлялась калибровка энергетических порогов детекторов поляризации с помощью светодиодов. Результаты калибровки показывают стабиль-

ность настройки порогов в пределах нескольких процентов. Об этом же свидетельствует практически неизменный фоновый счет в каналах детекторов поляризации, регистрируемый в районе геомагнитного экватора. Уровень этого фона должен меняться мало, поскольку он обусловлен в основном локальным и наведенным гамма-излучением, возникающим в результате взаимодействий галактических космических лучей высоких энергий, интенсивность которых можно считать постоянной.

Тем не менее, для более точного определения степени поляризации регистрируемого излучения было проведено нормирование показаний детекторов поляризации для исключения возможного различия числа отсчетов, связанного с разной эффективностью работы схем фосвича (то есть отбора событий, детектируемых пластмассовыми сцинтилляторами). При этом использовалось предположение, что на заключительной стадии вспышки поляризация должна быть пренебрежимо мала [24]. Показания отдельных детекторов поляризации нормировались на их же показания в конце вспышки. Кроме того, для снижения статистической ошибки было проведено сглаживание временных профилей методом скользящего усреднения по 5 последовательным экспозициям. Для каждого последовательного временного интервала длительностью 14 с данные аккумулировались в течение 4 с, то есть длительность экспозиции составляла 4 с при скважности $4/14 \approx 0.28$. Обработанные таким образом данные поляриза-

ционных измерений также изображены на рис. 25 вместе с данными патрульного детектора.

На рис. 25, в частности, представлены временные зависимости величин, характеризующих относительный вклад отдельных пар детекторов поляризации в суммарное число отсчетов всех детекторов. Эти величины представляют собой отношения $N_i / \sum_{i=1}^3 N_i$, $(N_1 + N_2) / \sum_{i=1}^3 N_i$, которые показывают, насколько число отсчетов, регистрируемое данной парой детекторов поляризации, отличается от уровней 0.33 и 0.67, соответствующих одинаковой загрузке детекторов, что должно иметь место в случае неполяризованного излучения. Заметно качественное различие поведения временного хода величин $N_i / \sum_{i=1}^3 N_i$, $(N_1 + N_2) / \sum_{i=1}^3 N_i$ в различных энергетических диапазонах. В канале 20–40 кэВ в пределах погрешности имеет место плавное уменьшение величины $N_i / \sum_{i=1}^3 N_i$ до уровня, соответствующего регистрации неполяризованного излучения. В то же время в каналах 40–60 кэВ и особенно 60–100 кэВ временной ход рассматриваемых отношений неравномерен: наиболее сильно величины $N_i / \sum_{i=1}^3 N_i$, $(N_1 + N_2) / \sum_{i=1}^3 N_i$ отличаются от уровней 0.33 и 0.67 в моменты ~20.42, ~20.44, ~20.46, ~20.51, ~20.56 UT, то есть когда наблюдались локальные максимумы интенсивности. Все это дает основания предполагать наличие поляризации жесткого рентгеновского излучения во вспышке 29.X, которая может быть очень высокой особенно в максимумах интенсивности.

Приведенные на рис. 25 значения $P_{\text{изм}}$ для вспышки 29.X были получены для независимых точек измерения (то есть отстоящих на интервал усреднения экспозиций). Погрешность в определении $P_{\text{изм}}$ может быть обусловлена двумя факторами – статистическим разбросом числа отсчетов за время экспозиции и систематической ошибкой в определении нормировочных коэффициентов. Для вспышки 29.X нормировочные коэффициенты определялись по интервалу 20.57–20.59 UT (в последующие моменты времени показания прибора были искажены из-за возможного вклада тормозного излучения электронов радиационного пояса, который начал пересекать спутник). Однако, вообще говоря, нельзя утверждать, что для этого интервала обеспечены условия полной термализации электронов в хромосферной плазме, то есть с какой-то вероятностью регистрируемое излучение могло содержать поляризованный компонент. Поэтому выбранные значения нормировочных коэффициентов могут рассматриваться в качестве максимальных, а соответствующие значения $P_{\text{изм}}$ как нижний предел. В качестве минимальных значений нормировочных коэффициентов могут быть выбраны величины, определенные по вспышкам, для которых заключительная тепловая стадия выделялась в показа-

ниях детекторов поляризации более или менее надежно. С учетом таких значений нормировочных коэффициентов верхний предел $P_{\text{изм}}$ оказался близок к 100% в каналах 40–60, 60–100 кэВ для некоторых экспозиций. При этом ошибка в определении нормированных значений числа отсчетов детекторов поляризации (а значит, и в определении $P_{\text{изм}}$) за счет систематического разброса значений нормировочных коэффициентов существенно перекрывает статистическую ошибку. Как и следовало ожидать, наиболее сильно излучение было поляризовано в начальной фазе вспышки, когда степень поляризации составила 50–60% в канале 20–40 кэВ и 70–100% в каналах 40–60 и 60–100 кэВ. Затем в канале 20–40 кэВ степень поляризации уменьшалась практически монотонно (с точностью до погрешности измерений) вдоль всего временного профиля вспышки. Что касается каналов 40–60 и 60–100 кэВ, то, как видно из рис. 25, изменение степени поляризации коррелировано с временным ходом интенсивности – она принимает наибольшие значения в максимумах интенсивности и минимальна между пиками.

Для вспышки 28.X и начального возрастания во время события 4.XI нет указаний на то, что излучение было сильно поляризовано. Для этих вспышек можно дать лишь верхний предел степени поляризации: для события 28.X.03 $P_{\text{изм}} < 20\%$ (20–40 кэВ), $P_{\text{изм}} < 20\%$ (40–60 кэВ), $P_{\text{изм}} < 25\%$ (60–100 кэВ). Для события 4.XI $P_{\text{изм}} < 40\%$ во всех энергетических диапазонах.

Динамика степени поляризации жесткого рентгеновского излучения во вспышке 29.X свидетельствует о том, что наблюдающаяся временная структура в виде отдельных возрастных интенсивности жесткого излучения, коррелированных с изменением степени поляризации, может быть связана с тормозным излучением сильно коллимированных пучков ускоренных электронов с энергиями выше 50 кэВ. При меньших энергиях существен вклад теплового неполяризованного излучения, доля которого непрерывно возрастала по мере развития вспышки, что отражало уменьшение степени поляризации излучения в диапазоне 20–40 кэВ.

Можно предположить, что в этом событии существовали хорошо сколлимированные пучки ускоренных электронов вдоль горизонтальных участков на вершинах магнитных арок и петель. Если это действительно так, то именно эти относительно высокие участки должны вносить основной вклад как в интенсивность, так и в поляризацию жесткого рентгеновского излучения в рассматриваемой области энергий в течение времени порядка десятка минут. Плоскость поляризации излучения в этом случае должна быть параллельна направлению распространения пучка. Определение плоскости поляризации требует проведения дополнительного анализа полученных экспериментальных данных и является пред-

метом дополнительного исследования, которое проводится в настоящее время. Если эта плоскость окажется совпадающей с направлением главной оси аркады, то это может служить указанием на индукционное ускорение вдоль имеющегося здесь сильного горизонтального электрического поля, обеспечивающего выброс плазмы вверх вследствие магнитного дрейфа в скрещенных полях. Если же эта плоскость будет скорее совпадать с направлением индивидуальных петель в аркаде, то это может служить указанием на роль ускорения продольными электрическими полями вдоль магнитного поля в отдельных петлях, что никак не связано с дрейфом плазмы. Трудность выбора между этими и другими возможностями состоит в том, что изображения вспышки в жестком рентгеновском излучении отсутствуют. “Привязка” к реальной геометрии в этих условиях может носить лишь косвенный и весьма приблизительный характер. Проникновение пучка вертикально вглубь хромосферы привело бы к сильному рассеянию электронов, разрушению пучка, и в основном к неполяризованному рентгеновскому излучению из этих областей в основаниях магнитных петель. Заметим, что циклотронное ускорение или какая-либо разновидность турбулентных механизмов ускорения вряд ли в состоянии без каких-либо специальных дополнительных условий обеспечить получение требуемого для объяснения поляризации анизотропного углового распределения ускоренных электронов. Не имея необходимых и достаточных данных, можно лишь предполагать из самых общих соображений, что в зависимости от высоты в атмосфере Солнца и ряда других свободных параметров вспышечный процесс может развиваться по-разному, ближе к тому или иному теоретическому сценарию.

Следует также отметить, что сильная поляризация жесткого излучения, генерируемого во вспышечных процессах в астрофизических объектах, не является экзотическим явлением в свете недавнего открытия на космической обсерватории *RHESSI* очень высокой (на уровне 80%) степени поляризации излучения космического γ -всплеска [25].

14. НЕКОТОРЫЕ ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ, СВОИ И НАРУШЕНИЯ В РАБОТЕ СПУТНИКОВОЙ АППАРАТУРЫ

Имеется несколько десятков сообщений о различных проявлениях рассматриваемых событий “космической погоды” в работе спутниковой аппаратуры, некоторая часть из которой была полностью или временно повреждена, выключена или переводилась в безопасный для нее режим работы (см., например, [26]). Как обычно в подобных случаях, отдельные научные измерения на спутниках и космических аппаратах в это время

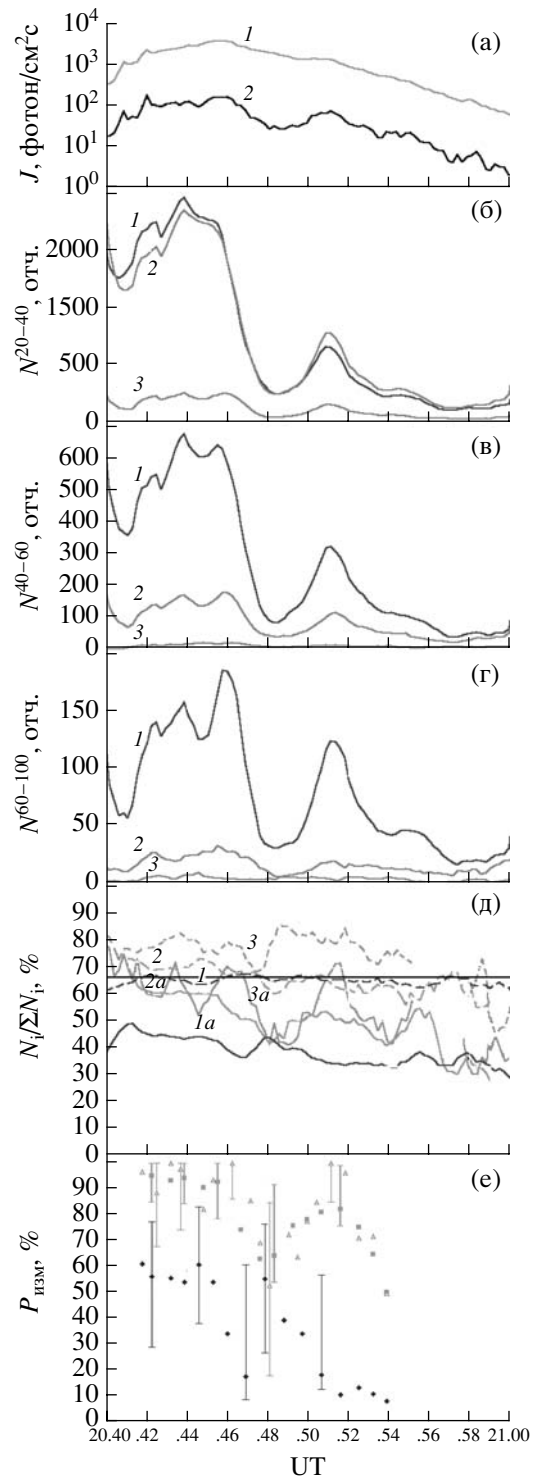


Рис. 25. Показания прибора СПН-Н во время вспышки 29.X.03 г. Временной ход интенсивности в каналах патрульного детектора (1 – 15–40 кэВ, 2 – 40–100 кэВ) (а); число отсчетов за время экспозиции 4 с трех пар (1, 2, 3) детекторов поляризации в каналах 20–40 кэВ (б); 40–60 кэВ (в); 60–100 кэВ (г). Кривые на панелях б, в, г сглажены методом скользящего усреднения по 5 последовательным экспозициям. Временной ход относительного вклада 1-й пары детекторов (1а – 20–40 кэВ, 2а – 40–60 кэВ, 3а – 60–100 кэВ) и суммы 1 и 2-й пар детекторов (1 – 20–40 кэВ, 2 – 40–60 кэВ, 3 – 60–100 кэВ) в полное число отсчетов детекторов поляризации (д); Временной ход степени поляризации $P_{изм}$ (е).

оказались осложненными, искаженными из-за эффектов насыщения и помех в датчиках или даже совсем невозможными. Целый ряд астрофизических наблюдений был прерван по этим причинам. Зарегистрированы многочисленные сбои в элементах полупроводниковой электроники, в том числе ошибки памяти и сбои в бортовых компьютерах, случаи потери телеметрии, снижения мощности питающих солнечных батарей, нарушения в системах ориентации, появление высоких электрических потенциалов и наводок, нарушения в радиосвязи и системах глобального позиционирования. Поступали сообщения об отключении некоторых систем электроснабжения в Швеции и об отдельных региональных проблемах в сетях электроснабжения США в этот промежуток времени, хотя из этих сообщений не вполне очевидна связь с факторами “космической погоды” в этих случаях. Космонавты на МКС переходили в модуль, защищенный от радиации. Были выпущены оповещения о радиационных условиях на самолетных высотах, а трассы некоторых трансатлантических перелетов были сдвинуты на более низкие широты, чтобы избежать попадания в зоны вторжения энергичных частиц в атмосферу. В данном сообщении не рассматриваются условия внутри земной магнитосферы и приводятся лишь отдельные результаты, относящиеся к условиям за ее пределами в гелиосфере.

Космический аппарат *Odyssey* в рассматриваемый период времени находился на орбите искусственного спутника вокруг Марса. Сам Марс в это время отстоял на угол около 23 градусов к востоку от линии Солнце – Земля. Установленный на борту этого космического аппарата прибор HEND (High Energy Neutron Detector) [27] регистрировал интересующие нас здесь события в различных энергетических каналах для жесткого электромагнитного излучения и нейтронов от нескольких долей электронвольта до 15 МэВ так, как это показано на рис. 26а. Большой пробел в данных соответствует периоду времени 28.X–6.XI, когда прибор был выключен во избежание повреждений вследствие больших потоков излучения после вспышек. Физическая природа сигналов 27–28.X (рис. 26б), 28–29.X (рис. 26в), 6.XI (рис. 26г) и 21–22.XI (рис. 26д) связана с солнечными событиями, имевшими место за несколько дней до того. Именно таково пролетное время для распространения солнечного ветра. Однако конкретная привязка к явлениям на Солнце не вполне очевидна и не столь проста из-за их множественности событий за пролетное время. Видно сильное возрастание потоков в указанные периоды времени, а также модуляция с периодом обращения спутника вокруг Марса.

При сравнении условий вблизи Марса и Земли после вспышечных возмущений следует иметь в виду их различное гелиоцентрическое и угловое расположение в гелиосфере, что дает возмож-

ность для частичного восстановления геометрии и скорости распространения межпланетных возмущений. С этими обстоятельствами связано запаздывание и различие в величине и форме возмущений на Марсе по сравнению с Землей. Детальный анализ формы сигналов, зарегистрированных прибором HEND, представляет самостоятельный интерес и будет выполнен и представлен в последующих публикациях.

Оценка флюэнсов, пиковых значений и спектров радиации в гелиосфере на трассе перелета к Марсу представляет значительный интерес для определения стратегии разрабатываемых миссий. Относительный вклад галактических, гелиосферных и солнечных популяций в полные спектры в течение различных фаз солнечного цикла до сих пор экспериментально известен не очень надежно, поэтому различные модельные экстраполяции и расчеты следует рассматривать с известной осторожностью. В частности, для решения важного практического вопроса о выборе наиболее безопасного периода времени с точки зрения радиационных условий приходится рассматривать сложные многопараметрические задачи, включающие в себя большое количество разнообразных дополнительных критериев, в том числе конкретных технических и биологических требований. Без этих уточнений поставленный вопрос не имеет простого и однозначного ответа, поскольку галактическая составляющая ослабляется в максимуме солнечного цикла, а две остальные возрастают, сильно отличаясь и варьируя по мощности, энергетическому распределению и составу частиц.

15. СОБЫТИЯ ОКТЯБРЯ–НОЯБРЯ 2003 г. В НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Период времени с октября по ноябрь 2003 г. оказался самым богатым по числу и мощности событий, зарегистрированных наземными нейтронными мониторами в 23-м цикле солнечной активности. Общее представление об этих событиях может дать рис. 27, на котором приведены данные приполярных нейтронных мониторов с 20.X по 22.X. Начало этого периода совпадает с появлением на солнечном диске группы пятен 10484, а конец приблизительно соответствует возвращению на диск группы 10486 в следующем обороте.

Рис. 29 построен на основе данных приполярных нейтронных мониторов ст. Туле и Мак Мердо, расположенных в северном и южном полушариях. Поскольку вариация δ скорости счета приполярных нейтронных мониторов определяется, в основном, изменениями плотности и северо-южной составляющей анизотропии КЛ, полусумма вариаций $(\delta_{\text{thul}} + \delta_{\text{mcnd}})/2$ станций, расположенных в противоположных полушариях, ведет себя приблизительно как вариация плотности КЛ. Разность же вариаций $\delta_{\text{thul}} - \delta_{\text{mcnd}}$ дает представление о поведе-

нии северо-южной анизотропии КЛ. Именно эти значения для полусуммы и разности изображены на рис. 29. Следует иметь в виду, что приведенные здесь вариации соответствуют эффективной жесткости первичных частиц 10–15 ГВ, если речь идет об эффектах в галактических КЛ, и 3–5 ГВ, когда мы говорим о солнечных космических лучах.

28 и 29.X, а также 2.XI нейтронные мониторы зарегистрировали три наземных возрастания солнечных КЛ (GLE), ставших 65, 66 и 67-м событиями этого рода в истории наземных наблюдений КЛ и отмеченных под этими номерами на рис. 27. Таким образом, за одну неделю к списку наземных возрастаний 23-го цикла добавилось сразу 3 события и их в цикле стало уже 13. Вспомним, что в девятнадцатом цикле зарегистрировано 10 GLE, в двадцатом – 12, в двадцать первом – 13, в двадцать втором – 15 [28]. Последнее ноябрьское возрастание произошло точно через 11 лет после 2.XI.1992 г., когда наблюдалось последнее GLE 22-го солнечного цикла. Вполне возможно, что в текущем цикле мы больше не увидим новых наземных возрастаний. Однако уже ясно, что по их количеству 23-й цикл мало отличается от предыдущих и может характеризоваться как типичный цикл. Следует учесть, что количество GLE, приведенное для 19-го цикла, почти наверняка занижено. Низкая статистическая точность нейтронных мониторов первого поколения и их отсутствие в приполярных областях существенно ограничивало возможности регистрации малых наземных возрастаний в то время. С учетом этого обстоятельства еще более очевидно, что число наземных возрастаний в последних пяти циклах очень мало меняется от цикла к циклу. Интересно, сохранится ли эта стабильность в следующих циклах.

На рис. 28 приведены 5-минутные данные некоторых нейтронных мониторов, полученные во время последних наземных возрастаний. Все три возрастания имеют общие особенности. Они явились результатом спорадических явлений в одной и той же активной области 10486 и наблюдались после исключительно мощных рентгеновских вспышек (X17.2/4B, X10.0/2B, X8.3/2B). Это первая в цикле серия из трех наземных возрастаний, хотя до этого дважды (в мае 1998 г. и в апреле 2001 г.) наблюдались по 2 GLE подряд. Все три возрастания оказались достаточно заметными, уступая в текущем цикле только событию 15.IV.2001 г. Первое из них – 28.X – на большинстве станций оказалось самым большим из трех и было близко по величине другому известному событию цикла – 14.VII.2000 г. Во всех трех событиях наблюдалась большая и продолжительная анизотропия потока солнечных частиц. При этом потоки, регистрировавшиеся в южном полушарии Земли, существенно превосходили потоки, наблюдавшиеся на северных станциях. Эта особенность хорошо видна и на рис. 27, и на рис. 28. Она вполне согласуется как с тем, что все связан-

ные с релятивистскими протонами вспышки произошли в южной части солнечного диска и имели координаты от S16 до S14, так и с тем, что в это время года Земля повернута к Солнцу южной стороной. Заметим, что такая же по знаку анизотропия в заполнении магнитосферы Земли солнечными космическими лучами с более низкими энергиями была обнаружена при последовательных пролетах ИСЗ *Коронас-Ф* над полярными шапками, о чем было уже сказано в разделе 11. Более детальный анализ этой информации может быть использован для диагностики состояния гелиосферы как среды для распространения в ней энергичных частиц.

Присутствие сильной анизотропии в потоке релятивистских СКЛ в событии СКЛ 28.X.2003 г. демонстрирует рис. 29а, где показано возрастание на нейтронных мониторах Апатиты и Баренцбург (Шпицберген) в сравнении со ст. Мак Мердо в Антарктике. Вертикальной стрелкой обозначено время начала радиоизлучения II типа (вероятный момент генерации релятивистских СКЛ). Обращает на себя внимание большое запаздывание начала возрастания относительно момента генерации. Ст. Москва, напротив, зарегистрировала быстрый приход солнечных частиц, так называемую “быструю компоненту” релятивистских солнечных протонов (РСП). Примечательно, что величина возрастания в Москве превышает таковую в Апатитах, несмотря на более высокий геомагнитный порог (рис. 29б). Станция Апатиты регистрирует в данном случае только медленную, запаздывающую компоненту РСП.

Объяснить эту и другие особенности события 28.X.2003 г. помогает анализ с использованием расчетных асимптотических направлений прихода протонов в диапазоне жесткостей от атмосферного обрезания ~ 1 ГВ (430 МэВ) до 10 ГВ (граничная жесткость в спектре солнечных космических лучей). Расчет проводился путем интегрирования уравнения движения частицы с отрицательным зарядом и массой протона с данной жесткостью, выпущенной вертикально вверх с высоты 20 км над данной станцией [29]. Высота 20 км выбрана как средняя высота образования вторичных нейтронов, которые дают вклад в счет нейтронного монитора [29]. Интегрирование уравнений движения проводилось методом Рунге-Кутты порядка 4–5. При расчетах использовалась модель магнитосферы Цыганенко 2002 г.

На рис. 29в показана полученная таким образом карта в солнечно-эклиптических (GSE) координатах для асимптотических конусов (АК), рассчитанных для некоторых станций в момент времени 12 час UT, близкий к максимуму возрастания (рис. 29а, б). Каждая точка на кривых АК соответствует направлению прихода к границе магнитосферы протона с данной жесткостью, который затем принимается данной станцией из вертикального направления. Одномерность расчетного АК связа-

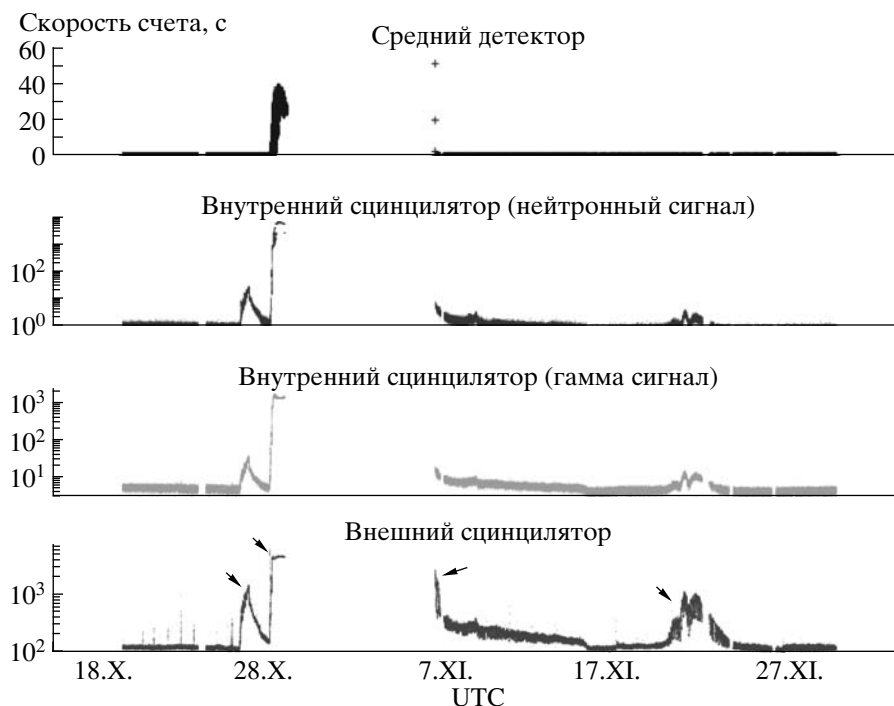


Рис. 26. Потoki жесткого электромагнитного излучения и нейтронов, измеренные в нескольких энергетических каналах прибором HEND на борту искусственного спутника Марса *Odyssey* за октябрь–ноябрь 2003 г. Обозначения см. [27].

на с тем, что рассматривались только вертикальные направления падающих на станцию частиц. Интенсивность КЛ, приходящих под углом к вертикали из-за поглощения в атмосфере сильно ослаблена. При учете наклонных траекторий с различными азимутами АК имели бы конечную ширину. На карте (рис. 29в) проведены также линии равных питч-углов относительно направления ММП (оценка по данным космического аппарата ACE, находившегося во время события в точке либрации на расстоянии около 1.5 млн. км от Земли). Максимальный поток СКЛ приходил из направления $\Phi = 215^\circ$; $\theta = -35^\circ$, как можно судить по данным станций Мак Мердо (рис. 29а), а также Терре Адели, асимптотические конусы которых повернуты близко к этому направлению (рис. 29в). Станции, принимавшие частицы с большими питч-углами (Туле) и из антисолнечного направления (Апатиты и Баренцбург) зарегистрировали небольшое возращание, начало которого запоздало на 15 мин относительно прямого потока. Тот факт, что ст. Москва зарегистрировала быструю компоненту, а Мак Мердо и Терре Адели нет, может объясняться узкой направленностью и жестким спектром быстрой компоненты. Из рис. 29в видно, что ст. Мак Мердо и Терре Адели могли регистрировать из направлений с малыми питч-углами только низкоэнергичные частицы, количество которых всегда относительно мало в быстрой компоненте. Напротив, эффект на этих же станциях в мягкой медлен-

ной компоненте, имевшей широкое питч-угловое распределение, был значительно большим.

Таким образом, если быстрая компонента имела жесткий энергетический спектр и узкое питч-угловое распределение, то медленная компонента характеризовалась двунаправленностью. Наблюдались потоки частиц, хоть и неодинаковые, но из двух противоположных направлений. Двунаправленная анизотропия в событии 28 октября, которое произошло во время форбуш-эффектов, по-видимому, связана с петлеобразной структурой ММП, обусловленной корональными выбросами вещества, ответственными за форбуш-эффекты. При этом инжекция частиц в оба основания петлеобразной структуры в солнечной короне от протяженного источника (корональная ударная волна) или от разнесенных локальных источников может быть причиной двунаправленной анизотропии.

Согласно одной из предварительных интерпретаций, релятивистские солнечные нейтроны были, возможно, зарегистрированы нейтронным монитором Цумеб, $S19.2^\circ$, $E 17.58^\circ$ (Южная Африка), $R_c = 9.21$ ГВ (рис. 30). Этот нейтронный монитор расположен на высоте 1240 м над уровнем моря и во время вспышки находился недалеко от полуденной точки. Согласно такой интерпретации, небольшое импульсное возращание в период с 11.10 до 11.15 UT может быть связано с солнечными нейтронами. На рис. 28 показаны данные этого прибора во время события 28.X.2003 г. в сравнении с данными ст. Москва.

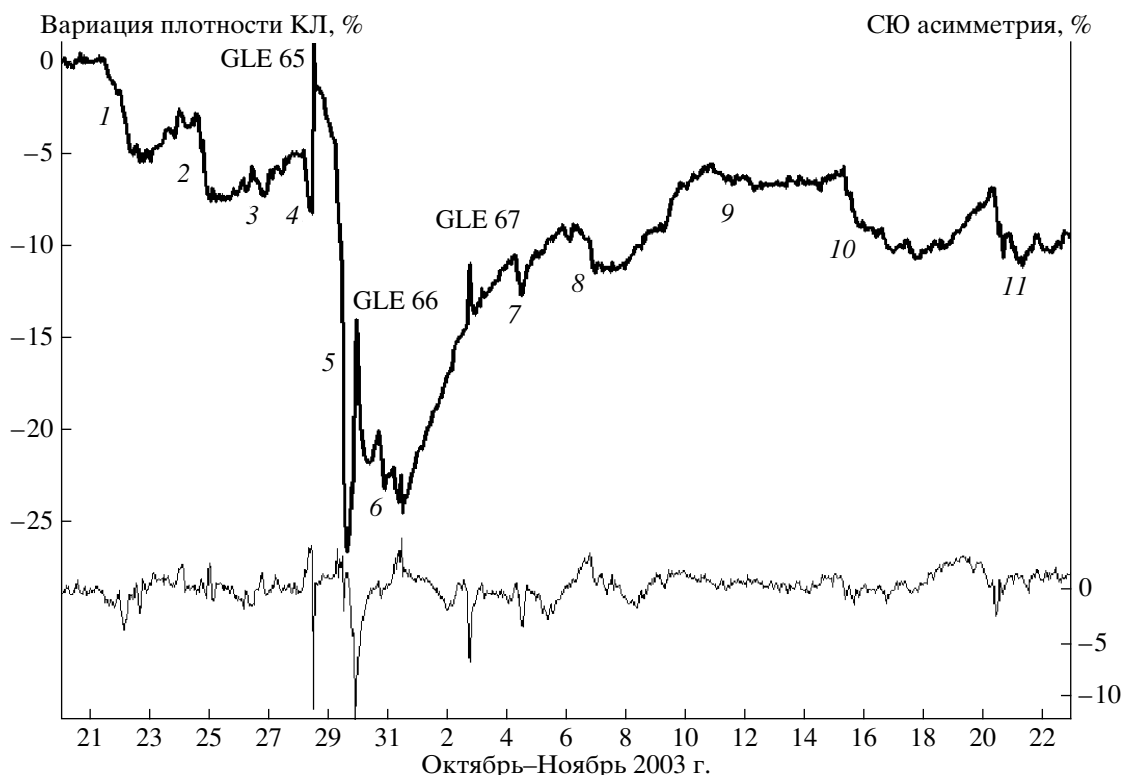


Рис. 27. Поведение плотности и анизотропии КЛ, наблюдавшихся приполярными нейтронными мониторами в октябре–ноябре 2003 г.

В это время РСП еще не пришли к Земле (профиль ст. Москва, 2.4 ГВ), а по данным КА *Коронас-Ф* с 11.04 по 11.12 UT наблюдалось гамма-излучение, свидетельствовавшее о генерации нейтронов. Согласно другой возможной интерпретации, в этом событии на Солнце имела место генерация СКЛ до энергий порядка 10 ГэВ, а запаздывание сигнала на различных станциях обусловлено особенностямиpitch-углового распределения ускоренных во вспышке энергичных частиц и различием конусов приема указанных станций. Для выяснения правильности той или иной интерпретации необходим более тщательный количественный анализ.

Между GLE 65, 66 и 67 видны и существенные различия. Временные профили первых двух из них очень сложны. Достаточно обратить внимание на данные ст. Норильск, которые в самом начале обоих событий содержат резко выраженный приблизительно 10-минутный пик интенсивности КЛ, намного превышавший по величине в это время эффект солнечных КЛ на станциях со сходными характеристиками. На некоторых других станциях в профилях октябрьских GLE наблюдалось по два далеко разнесенных максимума интенсивности. Временной профиль третьего (ноябрьского) возрастания намного проще. Однако в этом случае удивляет практически полное отсутствие эффекта на северной приполярной ст. Туле. Это возрастание во все время своего наблюдения

(2–3 часа) оставалось существенно изотропным, что, по-видимому, свидетельствует о крайне неэффективном межпланетном рассеянии релятивистских солнечных частиц 2.XI.

Различия в наблюдавшихся наземных возрастаниях должны объясняться значительной разницей в положении источника ускоренных частиц в межпланетных и магнитосферных условиях. В табл. 5 приведены гелиодолготы солнечных вспышек, связанных с наземными протонными возрастаниями, максимальные значения скорости солнечного ветра (*ACE/SWEPAM* и *ACE/SWICS*), максимальная напряженность межпланетного магнитного поля у Земли (*ACE/MAG*), максимальный K_p -индекс геомагнитной активности и минимальное значение D_{st} -индекса в часы наблюдения солнечных КЛ нейтронными мониторами.

Приведенные в табл. 5 индексы геомагнитной активности, а также данные о солнечном ветре и межпланетном поле достаточно полно характеризуют степень возмущенности гелиосферы только в локальной близости у Земли, а не на всем пути распространения рассматриваемых частиц космических лучей. К сожалению, прямая информация на сей счет, как всегда, отсутствует. Косвенные данные указывают, что состояние гелиосферы как в целом, так и в отдельных ее долготных и широтных участках внутри и вне орбиты Земли было сильно возмущенным в указанные

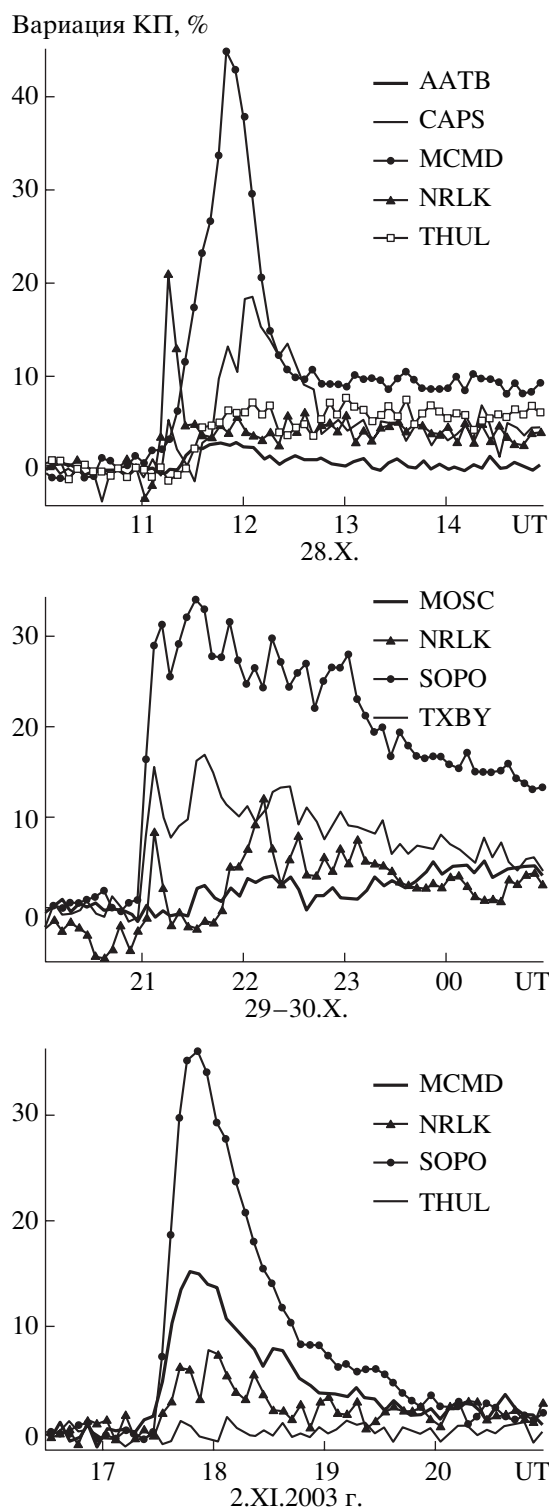


Рис. 28. Скорость счета некоторых нейтронных мониторов во время наземных возмущений солнечных космических лучей в октябре–ноябре 2003 г. Используются обычные сокращения для названий станций: AATB – Алма-Ата (3350 м.), CAPS – м. Шмидта, MCMD – Мак Мердо, MOSC – Москва, NRLK – Норильск, SOPO – Южный Полюс, THUL – Туле, TXBY – б. Тикси.

промежутки времени вследствие чрезвычайно высокой эруптивной активности Солнца на протяжении ряда дней. Об этом можно судить по наблюдениям сильных вариаций в активности солнечной короны по данным инструментов на космических обсерваториях *Корона-Ф*, *SOHO*, *GOES*. Тем не менее, из этих данных видно, что событие 67 было связано со значительно более удобно расположенной (западной) вспышкой и единственное из всех наблюдалось в относительно спокойных межпланетных условиях на орбите Земли, а не во время магнитной бури. GLE 65 наблюдалось на фоне возмущенного солнечного ветра, во время Форбуш-понижения и развивающейся магнитной бури. Особенно сложными были локальные условия для GLE 66: сильное межпланетное возмущение, исключительно большая магнитная буря и гигантский Форбуш-эффект. Все это, безусловно, существенно усложнит анализ данного явления. Даже 2.XI геомагнитная обстановка оставалась возмущенной. Солнечный ветер был в это время относительно спокойным только в окрестностях Земли, а ситуация в гелиосфере оставалась весьма сложной.

15.1. Форбуш-понижения (ФП). В конце октября наблюдалась самая значительная серия ФП за весь текущий солнечный цикл, превосходящая серии для июля 2000 г. и марта–апреля 2001 г. Отдельные ФП пронумерованы на рис. 27 в хронологическом порядке. Форбуш-эффекты ФП-1 и ФП-2 вызваны активностью в группе 10484 и восточными выбросами солнечного вещества. ФП-3 – самое маленькое событие в серии, но оно интересно тем, что это первое проявление активности группы 10486. Прилибмовая (S21 E88) вспышка X5.4/1B 23.X сопровождалась быстрым КВМ с настолько большим угловым размером (полное гало), что межпланетная ударная волна от этого сильно удаленного по долготе источника пришла к Земле. ФП-4–8 были, в основном, обусловлены активностью в этой же группе 10486 и около нее. Последнее из этих событий произошло после западной прилибмовой (S19 W83) рекордной вспышки X28/3B 4.XI. Вновь весьма удаленное расположение источника не воспрепятствовало наблюдению полного гало и приходу к Земле ударной волны. ФП-8–10 оказались полностью или частично связаны с высокоскоростными потоками солнечного ветра из корональных дыр, напомнив нам о том, что именно низкоширотные корональные дыры были главным источником рекуррентных межпланетных возмущений в 2003 г.

Отдельного рассмотрения, безусловно, заслуживает ФП-5, наблюдавшийся 29.X (рис. 31). Во время центральной вспышки X17.2, уже упоминавшейся в связи с генерацией ультрарелятивистских солнечных протонов, наблюдался исключительно быстрый СМЕ, со скоростью, оцениваемой по данным коронографа *SOHO/LASCO*,

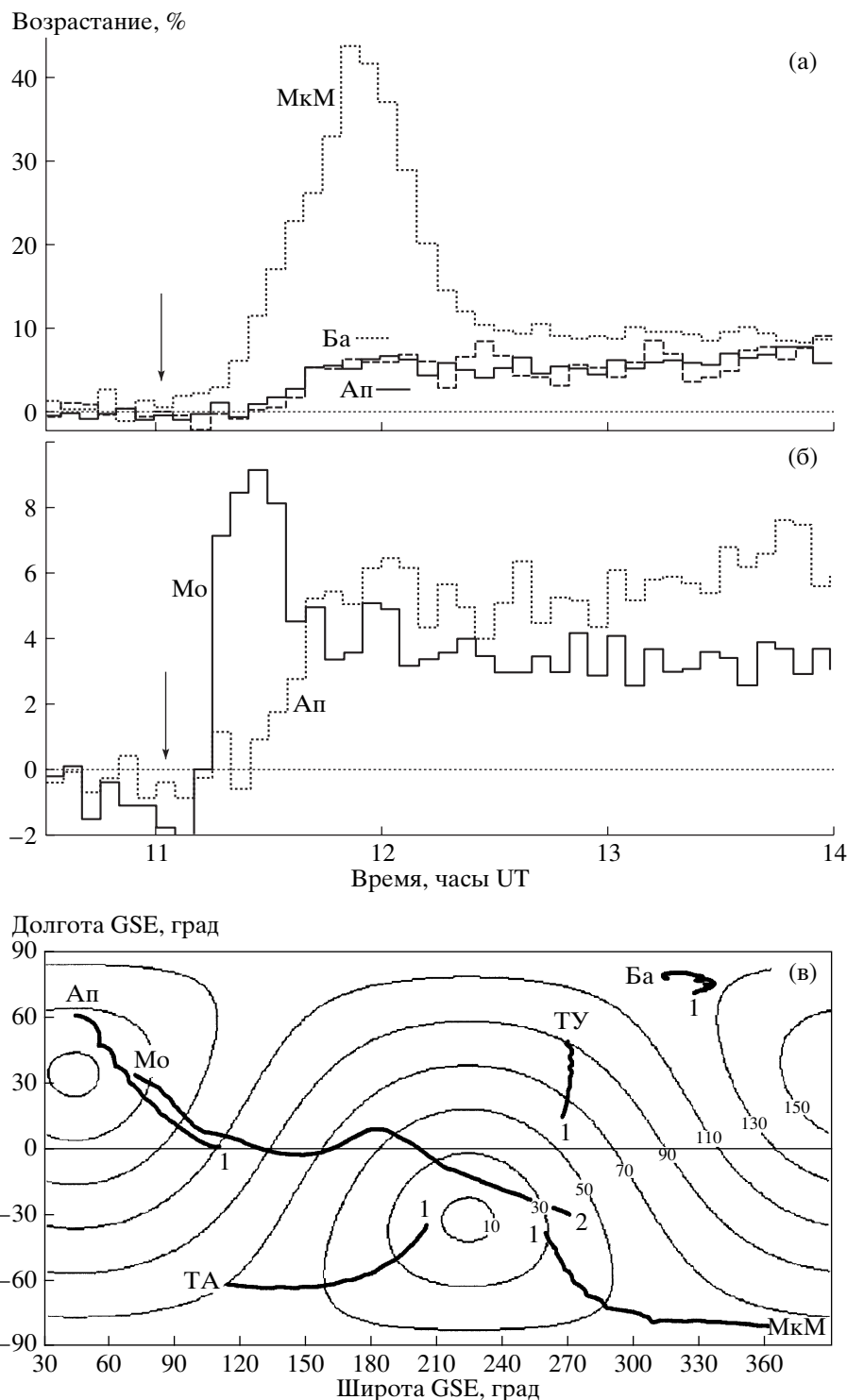


Рис. 29. Возрастание СКЛ на уровне Земли 28.X.2003 г. по данным нейтронных мониторов (а) – Мак Мердо (МкМ), Баренцбург (Ба) и Апатиты (Ап); (б) – Москва (Мо). Вертикальными стрелками показано предполагаемое время генерации частиц на Солнце. (в) – карта с асимптотическими конусами приема нейтронных мониторов: Апатиты (Ап), Москва (Мо), Терре Адели (ТА), Туле (Ту), Баренцбург (Ба), Мак Мердо (МкМ). Цифрами на асимптотических конусах обозначены жесткости в ГВ. Линии равных питч-углов проведены относительно направления межпланетного магнитного поля (данные КА ACE) в 12 час UT.

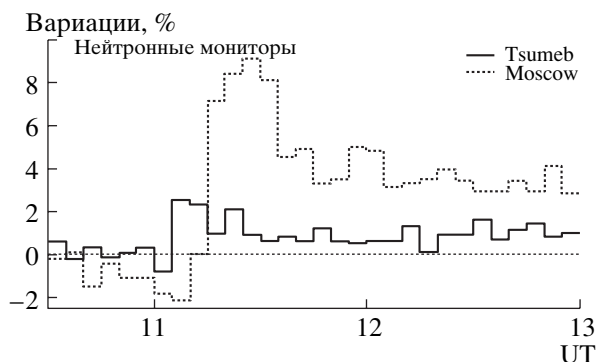


Рис. 30. Возрастание 28.X.2003 г. на нейтронных мониторах ст. Москва и Цумеб. Небольшой пик интенсивности на нейтронном мониторе Цумеб может быть связан с солнечными нейтронами, так как протоны пришли позднее (профиль ст. Москва).

несколько более 2100 км/с. Приблизительно такой же оказалась и средняя скорость распространения этого возмущения между Солнцем и Землей. Придя к Земле (SSC в 06.11 UT 29.X) за девятнадцать с небольшим часов, это возмущение стало самым быстро распространявшимся межпланетным возмущением с августа 1972 г. По данным ACE/SWICS (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/SWICS.html>), скорость солнечного ветра в первые часы после прихода ударной волны менялась от 1700 до 1900 км/с, а напряженность межпланетного магнитного поля по данным ACE/MAG (<http://www.sec.noaa.gov/ace/>) достигала 46.5 нТл. Из эмпирической зависимости, выведенной из анализа нескольких тысяч ФП [30], следует, что межпланетное возмущение с такими характеристиками должно создавать ФП с величиной 17.5% для частиц с жесткостью 10 ГВ. Наблюдавшийся 29.X эффект оказался еще больше. На некоторых станциях КЛ вариация скорости счета в этот день достигла 25%. Можно смело утверждать, что это событие стоит в ряду самых больших ФП за всю историю наблюдений. Оно превосходит все ФП текущего солнечного цикла по величине, как минимум, вдвое. В нашей базе данных собрано почти 4 тысячи ФП за 30 полных лет. Самым большим (25.0% для 10 ГВ) является известное событие 4–5.VIII. 1972 г. Рис. 31 показывает, что, по меньшей мере, нейтронный монитор ст. Москва наблюдал 29.X.2003 г. более сильную модуляцию КЛ, чем в августе 1972 г. Разделение вкладов солнечных и галактических КЛ представляется очень непростой задачей. Другим фактором, осложняющим анализ вариаций КЛ, является магнитная буря, совпавшая по времени и сильно изменившая состояние магнитосферного поля.

Основной спад интенсивности (на ~20%) происходил 29.X в течение 6 часов, при этом в отдельные часы интенсивность падала на 5% и более. Из такой скорости спада следует, что градиент КЛ (с энергией 10–15 ГэВ) в ведущей части

возмущения солнечного ветра был в это время не менее 100% на астрономическую единицу. Такой градиент должен создавать большую анизотропию галактических КЛ, и это подтверждает рис. 27. Однако предварительный анализ показывает, что анизотропия КЛ была в этом событии все-таки заметно меньше, чем в ФП в августе 1972 г. или в феврале 1978 г. В отдельные моменты исследуемого периода наблюдается двуправленная анизотропия большой амплитуды (десятки процентов) в угловом распределении частиц, что свидетельствует, во-первых, о выносе магнитных облаков и петлеобразных структур межпланетного магнитного поля (ММП) корональными выбросами вещества и, во-вторых, о высокой степени регулярности ММП в этих структурах. Максимальные амплитуды двуправленной анизотропии наблюдались 29.X и 1.XI (~60%), 2, 20 и 23.XI (~40%) для частиц с жесткостью $R = 4$ ГВ.

Подробные исследования описанных выше событий по данным спутниковых и наземных измерений космических лучей были проведены также в работе Дворникова В.М. и др. (http://www.iszf.irk.ru/documents/events/oct_nov.php), 2004. Здесь использовался оригинальный подход, в котором для описания спектра КЛ в широком диапазоне энергий применялось выражение для степенного жесткостного спектра галактических КЛ в предположении, что изменение их интенсивности в межпланетном пространстве происходит из-за изменения энергии в регулярных электромагнитных полях гелиосферы в соответствии с теорией Лиувилля, т.е. при условии постоянства плотности частиц вдоль траектории движения в фазовом пространстве [32]. С помощью метода спектрографической глобальной съемки [33] по данным мировой сети нейтронных мониторов была получена информация о вариациях углового и энергетического распределения первичных КЛ за пределами магнитосферы Земли (изотропная составляющая КЛ и анизотропия 1 и 2-го порядка), а также об изменениях планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений. Предварительные результаты показывают, что изменение интенсивности КЛ (в рамках используемой модели) происходит, во-первых, вследствие временных вариаций и пространственной неоднородности потенциала индуцированного электрического поля, во-вторых, вследствие ускорения частиц в петлеобразных структурах корональных и межпланетных магнитных полей, переменных во времени, и, в-третьих, из-за ускорения фоновых частиц поляризационными электрическими полями, возникающими при распространении ускоренных в солнечной короне и межпланетном пространстве частиц в неоднородных полях гелиосферы. При этом напряженность магнитного поля в этих структурах за счет временных вариаций изменяется относительно фоновой

Таблица 5. Различия в условиях наблюдения GLE 65, 66 и 67

GLE	День	Часы	Макс. эффект	Гелиодолгота вспышки	Скорость СВ, км/с	Напряженность ММП, нТл	K_p -индекс	D_{st} -индекс, нТл
65	28.X	11–13	45%	E08	790	11.0	5 ₋	–37
66	29.X	21–24	35%	W02	1100	29.3	9 ₋	–345
67	2.XI	17–20	36%	W56	536	5.2	4 ₊	–23

в 2–3 раза, а квадрат отношения напряженности поляризованного электрического поля к магнитному варьируется в пределах от ~ 0 до ~ 0.9 . Размер областей с нестационарными электромагнитными полями (пересчитанный к орбите Земли) в соответствии со значениями параметра R_0 составляет 10^{10} – 10^{11} см. Величина потенциала индуцированного электрического поля уменьшалась почти до нулевых значений, а увеличивалась – в ~ 1.5 раза относительно фоновых значений.

Интерпретация описанных выше событий в космических лучах и попытки установления на этой основе некоторых причинно-следственных связей на Солнце и в гелиосфере в данном случае сильно осложняются множественным характером возмущений и невозможностью рассматривать их как линейно независимые. Образно говоря, передаточная функция для “солнечного сигнала” ввиду его большой амплитуды в параметрах гелиосферного поля и плазмы оказывается нелинейной. Поэтому для рассматриваемого промежутка времени правильнее говорить не об индивидуальных неискаженных “сигналах”, событиях и явлениях, пытаясь нащупать эфемерные и порой несуществующие пространственные и временные границы между ними, а о сильно возмущенной ситуации на Солнце и в гелиосфере с нелинейными связями. Такой “ситуационный” подход представляется в данном сложном случае гораздо более адекватным по сравнению с “событийным”. Действительно, все плазменные и магнитные возмущения были настолько сильными и

тесно расположенными в пространстве и во времени, что имела место не только их линейная суперпозиция в гелиосфере (хотя именно это надо иметь в виду в первую очередь при качественных оценках и рассуждениях с учетом главного фактора – сверхмагнитозвукового характера расширения солнечного ветра). Нелинейный характер гелиосферного отклика на солнечные возмущения особенно заметно проявился и во всех обсуждавшихся выше характеристиках ФП и GLE.

Отличие “ситуационного” подхода от “событийного” по существу состоит в необходимости рассмотрения и учета более длительных интервалов времени и более крупных областей в пространстве на Солнце и в гелиосфере для описания сильных множественных возмущений с различными масштабами по сравнению с более простыми одномасштабными случаями. В некотором смысле здесь уместна аналогия с турбулентным и ламинарным состоянием.

15.2. Геомагнитные эффекты в модуляции ГКЛ на поверхности Земли. На октябрь–ноябрь 2003 г. пришлось 3 исключительно большие магнитные бури, возможно, самые большие в текущем солнечном цикле. В первой из них 29–30.X K_p -индекс геомагнитной активности возрастал до максимально возможного значения 9₀, а D_{st} -индекс падал до –363 нТл. Соответствующие величины для бури 30–31.X 9₀ и 401 нТл, а для бури 20.XI они были 9 и 465 нТл. Только две из предшествующих бурь цикла можно сравнивать с бурями 2003 г.:

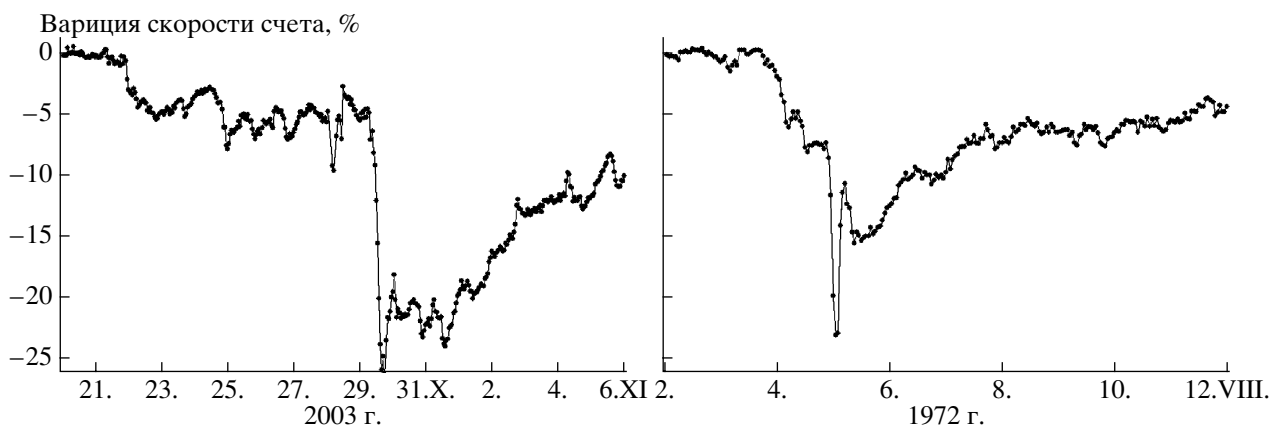


Рис. 31. Вариации космических лучей, зарегистрированные нейтронным монитором ст. Москва в октябре–ноябре 2003 г. и августе 1972 г.

15.VII.2000 г., когда экстремальные значения K_p и D_{st} -индексов достигали 90 и 300 нТл соответственно, и 31.III.2001 г. ($K_p = 9$ и $D_{st} = -387$ нТл). Только один раз ранее в этом цикле (в марте 1989 г.) D_{st} -индекс опускался еще ниже, чем 20.XI.2003 г. Обычно во время таких больших магнитных бурь в наземных наблюдениях КЛ проявляются эффекты непосредственного воздействия возмущенной магнитосферы на заряженные частицы [34]. В основном, геомагнитный эффект в КЛ связан с изменением эффективной жесткости геомагнитного обрезания в пункте, где наблюдаются космические лучи [35].

Признаки геомагнитных эффектов, выражающиеся в больших отличиях вариаций КЛ на среднеширотных мониторах от вариаций на высоких и низких широтах, видны во время всех трех магнитных бурь. Самая сложная ситуация создавалась во время первой бури в ночь с 29 на 30.X, когда геомагнитный эффект совпал с вариациями плотности и анизотропии галактических КЛ в гигантском ФП и с изменениями потока солнечных КЛ в GLE 66. Уменьшением жесткости обрезания, видимо, объясняется рост скорости счета на нейтронном мониторе ст. Москва около полуночи (рис. 28, средняя панель). В этом необычном случае изменения жесткости обрезания затрагивают не только галактические, как обычно, но и солнечные космические лучи.

Самый большой и очевидный геомагнитный эффект КЛ наблюдался 20.XI. На высокоширотных нейтронных мониторах в этот день зарегистрировано Форбуш-понижение на ~5%. Учитывая, что в это время наблюдалось рекордное возрастание напряженности ММП (до 55.7 нТл – ACE/MAG), можно было бы ожидать и большего эффекта. Среднеширотные станции практически не наблюдали понижения, зарегистрировав вместо него значительный рост скорости счета, как это видно на рис. 29а. Чтобы выделить и изучить геомагнитный эффект в данном случае, мы использовали данные всех нейтронных мониторов, которые удалось оперативно собрать (всего 40 станций), и методику, предложенную в работе [36]. Для каждой станции за каждый час были найдены изменения жесткости геомагнитного обрезания ΔR_c и соответствующий им геомагнитный эффект. Вариации КЛ на ст. Афины и Потчестром, исправленные на геомагнитный эффект, обусловленный сдвигом жесткости обрезания, приведены на рис. 32. Можно видеть, что в некоторые часы (совпавшие с максимальным понижением D_{st} -индекса) геомагнитный эффект на этих станциях достигал 6–8 %. Вполне возможно, что это самый большой когда-либо наблюдавшийся нейтронными мониторами геомагнитный эффект в космических лучах. Даже в марте 1989 г. он был меньше.

Поведение полученных для 20.XI ΔR_c демонстрирует ясную широтную зависимость (рис. 33) и

очень хорошо согласуется с D_{st} -вариацией. Максимальные изменения геомагнитного порога в данном случае наблюдаются на необычно низких широтах, соответствующих жесткости геомагнитного обрезания около 8 ГВ.

15.3. Долгопериодные вариации КЛ. 29–31.X скорость счета на нейтронных мониторах падала до такого низкого уровня, какого не наблюдалось с июня 1991 г. Это относится и к среднечасовым, и к среднесуточным данным. Такая глубокая модуляция не могла не сказаться и на долгопериодных вариациях космических лучей. К тому же следует учесть, что после ухода огромных активных областей 10484, 10486 и 10488 с видимой части солнечного диска в начале ноября солнечная активность не исчезла, а переместилась на невидимую сторону Солнца. Коронोगрафы SOHO/LASCO наблюдали большие выбросы солнечного вещества 4, 6, 10, 11, 12.XI с противоположной от нас стороны. Эти выбросы создавали межпланетные возмущения и модулировали космические лучи.

Обратимся к среднемесячным данным (рис. 34). В каждом из последних циклов солнечной активности, пожалуй, за исключением 20-го, который был вообще относительно слабым, можно видеть два минимума интенсивности галактических космических лучей: первый после достижения максимума числа солнечных пятен, более глубокий второй – через пару лет. В 21-м цикле хорошо выраженный второй минимум ГКЛ зарегистрирован в июле 1982 г., в 22-м цикле – в июне–июле 1991 г. В текущем цикле первый минимум наблюдался в июле 2000 г. Второй минимум пришлось ждать 3 года и 4 месяца (заметно дольше, чем в предшествующих циклах), пока мы не увидели его в ноябре 2003 г. Он оказался не столь глубоким, как в 1991 г., но вновь значительно глубже первого. Модуляция КЛ в 23-м цикле глубже, чем в 21-м цикле (не говоря о 20-м), и интенсивность держится на низком уровне уже более 4 лет (с конца 1999 г.). Можно заметить, что минимум интенсивности КЛ в нечетных циклах продолжительнее, чем в четных. Это обстоятельство было, по-видимому, впервые указано А.Н. и Т.Н. Чарахчян, а его объяснение ныне связывается с циклом Хейла в глобальном поле Солнца и ролью магнитного дрейфа в распространении КЛ. По-видимому, сейчас (начало 2004 г.) мы находимся в конце этого минимума, и в ближайшие месяцы начнется фаза восстановления интенсивности ГКЛ.

В итоге этого рассмотрения наземных данных о КЛ можно заключить, что в октябре и ноябре 2003 года в космических лучах произошли события, которые заслуживают быть названными самыми выдающимися в 23-м солнечном цикле. В это время мы наблюдали самую длинную серию наземных возрастных солнечных космических лучей, самую значительную серию форбуш-эффектов, самую низкую интенсивность КЛ, самый

большой форбуш-эффект, самый большой магнитосферный эффект в космических лучах. Форбуш-эффект 29.X и геомагнитный эффект 20.XI являются самыми большими не только для текущего цикла, но и для всей истории наземных наблюдений космических лучей. В этом цикле Солнце приберегло главные сюрпризы на фазу спада. Однако такое бывало и раньше. Самый яркий пример тому – август 1972 г.

15.4. Измерения ионизирующей радиации в атмосфере. Физический институт им. П.Н. Лебедева в течение многих лет проводит практически ежедневные измерения ионизирующего излучения в атмосфере Земли от уровня моря до высот 30–35 км [37]. В конце октября – начале ноября 2003 г. в стратосфере полярных областей (Мурманская область и обл. Мирный, Антарктида) наблюдалось вторжение солнечных протонов с энергией более 100 МэВ. Радиационный фон в стратосфере был заметно повышен вплоть до высот ~15 км (остаточное давление атмосферы ~120 г/см²), а на высотах 30–35 км (остаточное давление атмосферы ~12–5 г/см²) потоки заряженных частиц возросли в 10–20 раз. На рис. 35 приведены результаты измерений всенаправленных потоков заряженных частиц в атмосфере Мурманской области (68°57'N, 33°03'E) во время событий октября–ноября 2003 г. Измерения выполнены газоразрядным счетчиком с толщиной стенок 50 мг/см² стали. Возрастания радиационного фона, показанные на рисунке, вызваны солнечными протонами в интервале энергий 100–600 МэВ. Потоки и энергетические спектры этих протонов, пересчитанные к границе атмосферы, хорошо согласуются с данными космических аппаратов со стороны меньших энергий и с потоками протонов с энергией выше 500 МэВ, оцененными из данных нейтронного монитора Апатиты.

16. ВОЗМОЖНЫЙ СЦЕНАРИЙ СОБЫТИЙ НА СОЛНЦЕ И В ГЕЛИОСФЕРЕ В ОКТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2003 г.

Рассмотренные наблюдения в совокупности с другими сведениями подтверждают известные выводы о непотенциальности и сложном динамическом характере магнитного поля ВПАО, то есть о протекании здесь сильных и переменных электрических токов. Так, например, скрученные петли в аркадах магнитного поля в короне визуализируются в наблюдениях *TRACE*, *SOHO/EIT*, *SOHO/LASCO* и *Корона-Ф* перед выбросом, при подъеме эруптивного протуберанца и в поле зрения коронографа. По степени скрученности наблюдаемых петельных структур в аркадах и измеренным фотосферным магнитным полям в основании арок можно оценить по порядку величины величину тока в корональном электроджете в 1 ТА для случая на лимбе 4.XI.2003 г. Развитие этой вспышки и KBM сопровождалось усложне-

нием всей структуры и появлением большого числа хорошо различимых динамических деталей, то есть турбулизации плазмы и магнитного поля. Однако роль этих процессов в данном случае, по-видимому, не является первостепенной, так как налицо явная динамика более крупномасштабных магнитных полей и плазменных структур с более высоким и переменным содержанием свободной энергии. Предварительные оценки показывают, что энергетический каскад в данном случае направлен от самых крупных масштабов порядка геометрических размеров и времени жизни глобальных комплексов корональных дыр и активных областей в сторону более мелких и быстропеременных масштабов, а не наоборот. Иными словами, энергетический каскад прямой, а не обратный. Это означает сильную делокализацию энергонесущей области во время данного события.

Корональные выбросы массы и солнечные вспышки возникают вследствие локального и достаточно быстрого преобразования свободной энергии в движение плазмы и электромагнитное излучение. Как уже отмечалось ранее, эти явления не являются причиной, следствием или независимыми по отношению друг к другу. В действительности они представляют собой две стороны, два энергетических канала единого диссипативного процесса, поддерживаемого имеющейся свободной энергией в атмосфере Солнца. В рамках радиационной магнитной гидродинамики возможно четкое количественное разграничение по величине мощности и энергии в каждом из двух указанных энергетических каналов. Удобной количественной мерой для этого служит безразмерный параметр V_e , являющийся отношением соответствующих мощностей (так называемое отношение “velocity-emission”). Если преобладает энергия движения плазмы, то процесс носит черты коронального выброса ($V_e \gg 1$). Если же преобладает энергия излучения, то речь идет о вспышечноподобном явлении ($V_e \ll 1$). Во многих случаях $V_e \sim 1$. Тогда оба явления сопутствуют друг другу. Они развиваются взаимосвязано, практически одновременно и совместно. Оба канала всегда конкурируют между собой на Солнце в той или иной мере. Помимо этого важную роль играют и другие каналы диссипации свободной энергии, например, тепловые потоки, переносимые в основном электронами вдоль поля в более низкие и холодные участки солнечной атмосферы. Некоторая, в целом меньшая, доля энергии уходит на развитие различных других кинетических процессов, в том числе на ускорение надтепловых хвостов в функциях распределения заряженных частиц и образование многочисленных мелкомасштабных неоднородностей и быстропеременных процессов, в том числе конвективных и волновых возмущений в верхней атмосфере Солнца. Нет сомнений в том, что в целом в атмосфере Солнца преобладают прямые энергетические каскады,

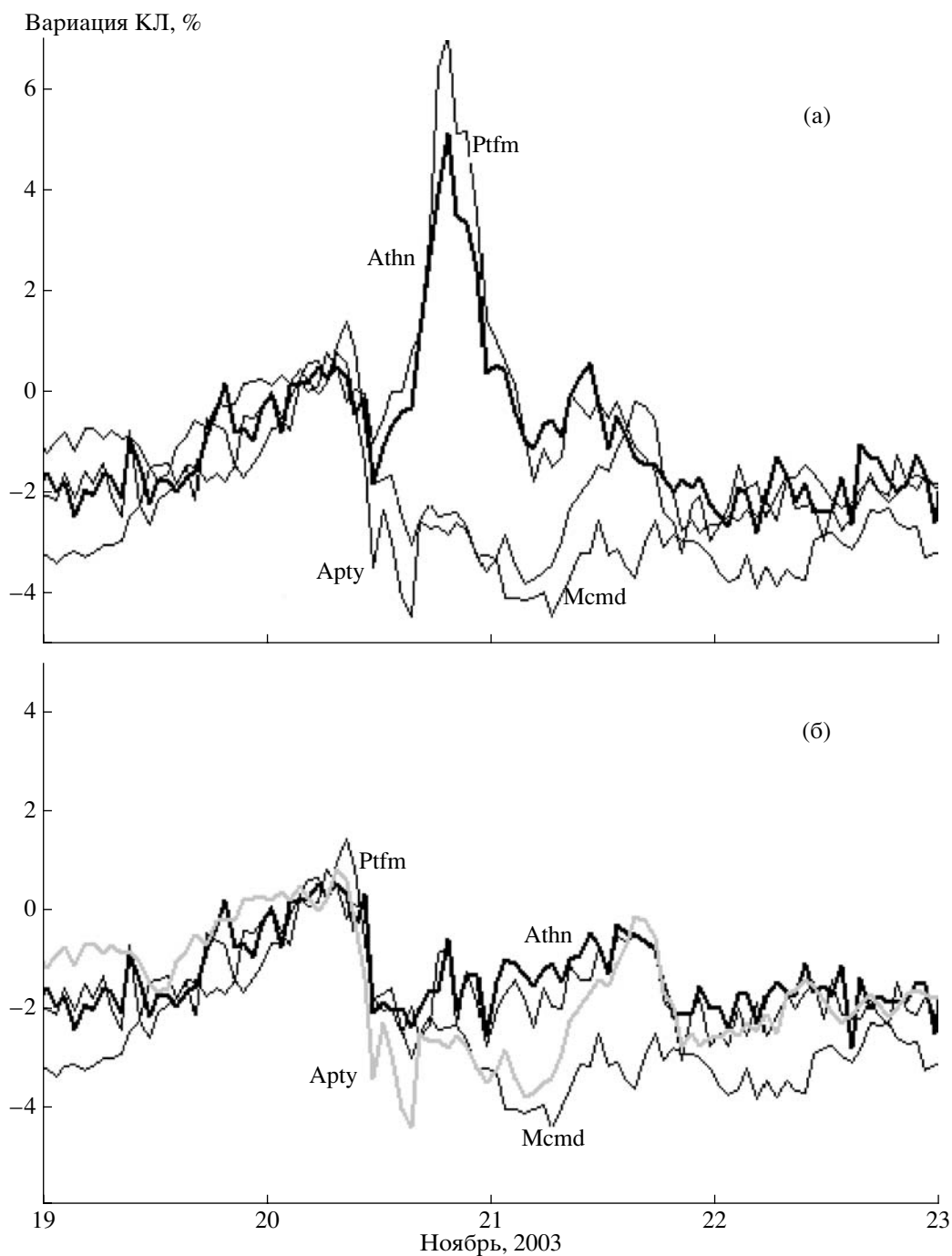


Рис. 32. Неисправленные (а) и исправленные на магнитосферный эффект (б) вариации КЛ, зарегистрированные среднеширотными нейтронными мониторами ст. Афины (Athn) и Потчестром (Ptfm) вместе с вариациями на высокоширотных мониторах ст. Апатиты (Apty) и Мак Мердо (Mcmd).

поскольку свободная энергия в различных ее видах в конечном счете поступает из недр Солнца и уходит в открытый космос главным образом в виде излучения. Однако и обратные энергетические каскады, несомненно, имеют свое место и играют важную роль в перераспределении свободной энергии и образовании динамических структур в атмосфере Солнца. Примером может служить спектральная

область вблизи пятиминутных колебаний в фотосфере. Соотношение и баланс между прямыми и обратными энергетическими каскадами на Солнце пока еще изучены недостаточно полно.

Второе важное замечание состоит в том, что адекватное описание физики происходящих при этом процессов возможно лишь с учетом переноса энергии, импульса и массы в рассматрива-

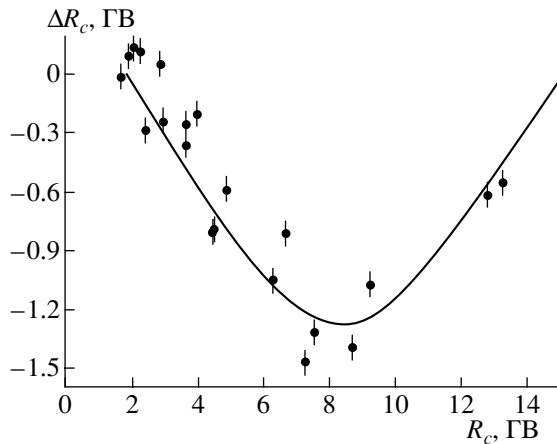


Рис. 33. Пример широтного распределения изменений жесткости геомагнитного обрезания в различных пунктах в 20-й час 20.XI, когда D_{st} -индекс опускался до -465 нТл.

емых открытых системах с их сложной пространственно-временной структурой соответствующих потоков. При этом представления о равновесии и устойчивости изолированных систем могут служить полезной идеализацией лишь в простейших случаях, так же как и представления о подпитке снизу, сверху или сбоку от рассматриваемого участка. В целом же основная сложность состоит в том, что из-за недостатка наблюдательных данных трудно вычленивать подобную изолированную систему и локализовать таким образом рассмотрение причин и следствий. Для количественной оценки степени открытости тех или иных морфологических элементов в будущем удобно использовать так называемые триестские числа, представляющие собой отношения внутренних, внешних и связующих потоков вещества, импульса и энергии.

Для описания процессов распространения энергичных частиц, особенно в тех случаях, когда длина свободного пробега частиц сравнима или велика по сравнению с масштабом рассматриваемых магнитных структур, важно иметь представление о топологии межпланетного магнитного поля. О существовании длинных магнитных петель в гелиосфере известно давно. Некоторые из таких петель имеют оба конца на Солнце и простираются далеко за орбиту Земли. Наблюдения анизотропии космических лучей позволяют обнаружить проявления подобной петлевой структуры возмущенного магнитного поля в анизотропии КЛ в гелиосфере и в рассматриваемых событиях.

Оценим напряженность электрического поля и силу тока в гелиосферном электроджете 29.X вблизи орбиты Земли. Для оценки по порядку величины примем скорость солнечного ветра равной 1 Мм/с, напряженность магнитного поля 20 нТл, длительность пересечения электроджета порядка 10 час. Отсюда следует поперечный размер электроджета порядка 0.1 а.е. и полная величина тока в нем порядка 1 ГА, а индукционное электрическое поле в солнечном ветре порядка 20 мВ/м. Неэкранированная электродвижущая сила на поперечнике магнитосферы около 40 земных радиусов составит при этом порядка 5 МВ. Внутри магнитосферы это внешнее электрическое поле экранируется из-за разделения зарядов и конечного сопротивления, что приводит к его уменьшению, грубо говоря, на порядок величины.

Межпланетное магнитное возмущение в этом событии имело вид не вполне регулярного цуга из трех или даже более периодов колебаний с увеличивающейся длительностью этих периодов от $1-2$ часов в начале цуга до суток в его конце с несколькими переходами через нуль и максимумами в северо-южной составляющей магнитного поля. Такая структура, по-видимому, зародилась



Рис. 34. Долгопериодные вариации КЛ, наблюдавшиеся на нейтронном мониторе ст. Москва.

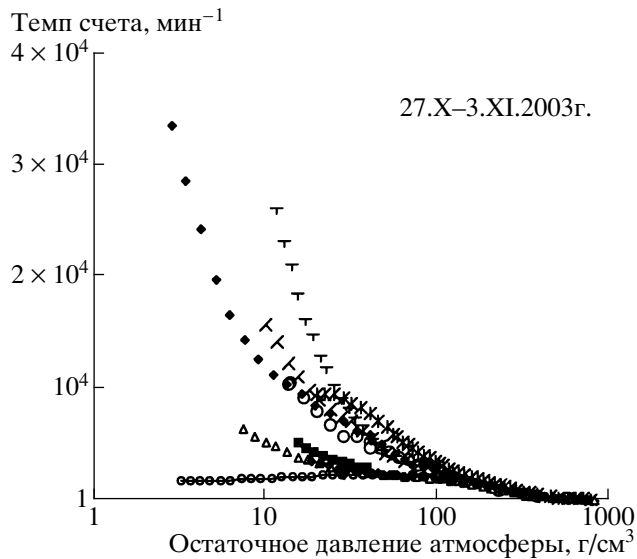


Рис. 35. Результаты измерения потоков заряженных частиц на баллонах в стратосфере Мурманской области. Различные значки соответствуют разным запускам радиозондов. Нижняя кривая относится к фоновым потокам частиц, измеренным 24.X.2003г.

вблизи Солнца и формировалась по дороге в межпланетном пространстве вследствие динамических процессов сжатия на переднем фронте и разрежения на заднем фронте распространяющегося возмущения. Короткопериодическая составляющая внешнего по отношению к магнитосфере Земли переменного электрического поля вызывает суббуревые интенсификации, а три наиболее длинные осцилляции находят свое четкое выражение в индексах глобальной геомагнитной активности. Каждый поворот магнитного поля к югу на время порядка нескольких часов сопровождается развитием новой главной фазы магнитной бури, а поворот к северу приостанавливает такое развитие. Важность процессов усиления и поворотов магнитного поля за счет свободной энергии плазмы в гелиосфере иллюстрирует рис. 36, на котором в качестве примера представлены результаты расчета “драпировки” межпланетного магнитного поля вокруг сверхмагнитозвукового коронального выброса массы [3].

Полученный наблюдательный материал позволяет сделать некоторые обобщающие выводы относительно физической природы рассматриваемых процессов и некоторых их параметров. Вспышки и КВМ – сопутствующие друг другу явления. Они развиваются спонтанно и одновременно как два наблюдательных проявления единого диссипативного процесса в атмосфере Солнца. В ходе этого процесса на высотах порядка 10 Мм и выше на масштабе времени порядка десятка минут возникает и существует индукционное электрическое поле, направленное вдоль главной оси аркады магнитных петель длиной порядка несколь-

ких десятых долей гигаметра. Напряженность электрического поля достигает порядка 10 В/м, а эффективная электродвижущая сила порядка нескольких гигаВольт. Плазма в этих полях переносит электрические токи порядка нескольких тераампер и дрейфует вверх со скоростью от десятков до многих сотен километров в секунду. Эти грубые оценки в целом соответствуют общепринятым типичным значениям полной мощности и диссипируемой энергии в верхних слоях солнечной атмосферы во время сильных вспышек и КВМ. Отдельные группы частиц могут ускоряться при этом до предельно высоких энергий, допускаемых имеющейся электродвижущей силой. Весь этот плазменный и электродинамический процесс локально носит ярко выраженный нелинейный характер с большим количеством сложных и еще более быстропеременных деталей. Приводимые оценки применительно к обсуждаемым событиям имеют грубый ориентировочный характер и основаны на совокупности наблюдательных данных. Подчеркнем, что оценка рекуперированной свободной энергии, возвращающейся в нижние слои атмосферы, в настоящее время не может быть сделана достаточно надежно и требует более точных измерений параметров плазмы и излучения. Важно отметить, что существует не один, а целая иерархия важных управляющих безразмерных параметров, связывающих между собой временные и пространственные масштабы в различных комбинациях, сочетание которых делает наблюдаемые явления столь сложными и разнообразными, причем ламинарные и турбулентные структуры сосуществуют и перемежаются друг с другом в пространстве. Пролетное время на шкале высот определяет основную длительность развития КВМ на данной высоте, однако помимо этого инерционного масштаба важную роль играют и другие факторы.

Причиной возникновения индукционного электрического поля является изменение электрических токов и магнитных полей на масштабах времени порядка часов и суток в недрах Солнца под фотосферой, что проявляется как “быстрое всплытие” нового магнитного потока с напряженностью полей порядка сотен Гаусс и более в районе активных областей. Этот процесс затрагивает не только активные области, но и их окружение, где он носит более делокализованный, крупномасштабный и линейный характер. Разумеется, помимо индукционных электрических полей развиваются и потенциальные электрические поля, направленные преимущественно вдоль магнитного поля в отличие от индукционных полей, которые возникают и действуют поперек поля. Вместе они образуют общую электрическую цепь солнечной вспышки и КВМ. Продольные электрические токи замыкают глобальную цепь индукционных токов, являющихся в этом смысле видимой первопричиной рассматриваемых явлений. Выяс-

нение структуры и динамики этой электрической цепи остается одной из актуальных задач.

Расположение и эволюция активных областей демонстрируют глобальную асимметрию на Солнце и в свою очередь контролируются более долгосрочными изменениями конвективных тепловых потоков. Эти изменения по своей относительной амплитуде являются гораздо более слабыми, однако резервуар свободной энергии в них огромен и служит основным источником всех наблюдаемых проявлений солнечной активности, в том числе вариаций светимости, вспышек и КВМ. В этом смысле более глубокую первопричину рассматриваемых явлений следует искать именно здесь.

“Тепловая машина” Солнца тесно связана с конвективным и лучистым переносом свободной энергии в недрах, который осуществляется в основном при низких числах Маха – Альвена, то есть при относительно малой роли магнитного поля. “Динамо-машина” Солнца в этом смысле сама является продуктом, а вовсе не первопричиной солнечной активности, понимаемой в этом более широком плане как фундаментальное свойство звезды с относительно небольшой переменностью выделения и переноса энергии в недрах на фоне гораздо большего стационарного потока энергии, поддерживаемого термоядерными процессами в гравитационно удерживаемом ядре Солнца. С этой точки зрения, рассматриваемые явления на Солнце представляют пример сложной самоорганизации в неравновесной открытой физической системе с потоками свободной энергии и вещества. “Магнитная степень свободы” при таком взгляде выступает как подчиненная и управляемая другими более мощными глобальными процессами, однако локально в некоторых участках и в отдельные промежутки времени эта степень свободы может доминировать над остальными, что и наблюдается при вспышках. Мы имеем дело здесь со всеми проявлениями известных общих физических закономерностей, характерных для нелинейных процессов с диссипацией.

Таким образом, во вспышках и КВМ ясно прослеживается цепочка передачи энергии от глобальных и крупных масштабов к мелким, от медленных изменений к быстрым. Одновременно с этим существует и конкурирует обратный процесс – слияние и диссипация мелких и быстропеременных структур с образованием новых крупномасштабных и медленно меняющихся неоднородностей. Само существование горячей солнечной короны как целого может служить простым и наглядным свидетельством важности обратного энергетического каскада. Иными словами, ситуация типична для неустановившихся и неоднородных турбулентных состояний. Количественное динамическое описание турбулентных процессов и прогнозирование их развития, как известно, сильно ограничено целым рядом обстоятельств, связанных с большим числом возможных степеней

свободы и трудностью их контроля. Поэтому исследование горизонтов прогнозирования солнечных и гелиосферных процессов представляется актуальной научной и практической задачей.

В настоящее время мало что можно сказать о вероятности появления экстремально мощных событий типа наблюдавшихся в октябре–ноябре 2003 г. в будущей солнечной активности или об их апостериорной вероятности в прошлом, поскольку уровень наших реальных знаний в этой области остается совершенно недостаточным. В наблюдательном отношении речь идет о малом объеме сведений о редких явлениях, не поддающихся по этой причине статистическому рассмотрению, а в теоретическом – об имеющихся трудностях в понимании, описании и моделировании движущих сил и энергетики этих процессов. Тем не менее, во многом легендарная солнечная вспышка, наблюдавшаяся Кэррингтоном, и последовавшая за ней геомагнитная буря 1–2.IX.1859 г. [31], ситуация в августе 1972 г. и рассмотренные в данной статье явления в октябре–ноябре 2003 г., несомненно, имеют в своей природе и параметрах очень много общего и сходного, однако далеко не полностью исчерпывают все потенциальные возможности и “сюрпризы” Солнца в этом отношении. Дальнейшие исследования экстремальных событий на Солнце, в гелиосфере и магнитосфере представляются интересными и важными как в практическом, так и в научном плане.

ВЫВОДЫ

1. Собраны и проанализированы новые данные об экстремально сильных проявлениях солнечной и гелиосферной активности в октябре–ноябре 2003 г. Эти проявления оказались рекордными по величине целого ряда параметров.

2. Помимо многих хорошо известных ранее явлений, во вспышке 29.X впервые обнаружена сильная поляризация жесткого рентгеновского излучения, которая может быть связана с тормозным излучением достаточно узко направленных электронных пучков в вершинах петельных и арочных структур в атмосфере Солнца во время вспышки. Зарегистрировано излучение гамма-квантов и нейтронов.

3. 2003 год соответствует фазе спада 23-го солнечного цикла, определяемого по сглаженному числу солнечных пятен. Однако помимо одиннадцатилетнего цикла отчетливо проявляются сравнимые по амплитуде циклические и нерегулярные изменения во многих проявлениях солнечной и гелиосферной активности на масштабах времени короче нескольких лет, нескольких месяцев и даже нескольких дней. Не менее сильные изменения происходят и на большей временной шкале от одного цикла к другому.

4. Выявлены и исследованы проявления глобальной асимметрии Солнца в исследуемый промежуток времени, обусловленные процессами в

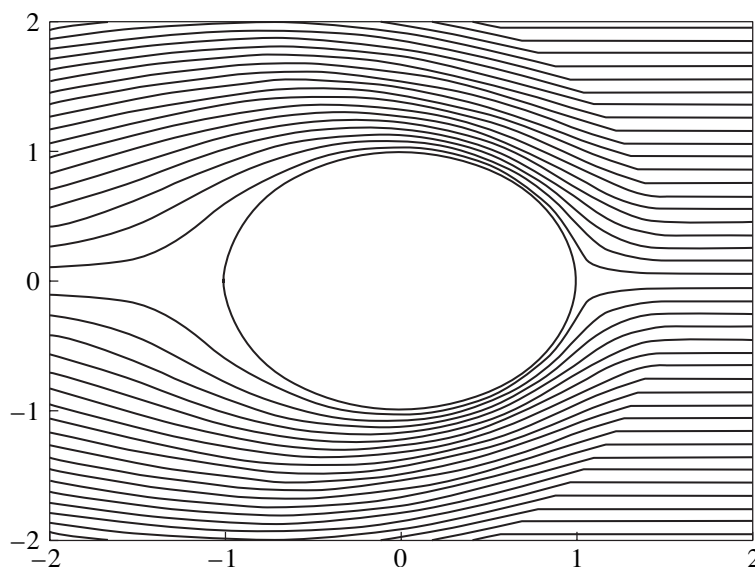


Рис. 36. Искривление и усиление межпланетного магнитного поля на быстром сверхмагнитозвуковом облаке, движущемся вправо вдоль горизонтальной оси. Усиление может составить до 5–6 раз, то есть, если внешнее невозмущенное поле было ~5–10 нТл, то на флангах облака возмущенное поле может достигать ~25–60 нТл, что вполне достаточно для генерации сильной геомагнитной бури.

его недрах и видимые в солнечной атмосфере и гелиосфере благодаря вращению Солнца как частично повторяющиеся рекуррентные события.

5. Наиболее мощные быстропеременные и локализованные процессы выделения свободной энергии в атмосфере Солнца проявляют себя в виде корональных выбросов масс и сопутствующих им солнечных вспышек, которые доступны для непосредственного наблюдения и тесно связаны друг с другом единой физической причиной – диссипацией свободной энергии. Эта энергия поступает из-под фотосферных слоев Солнца и резервуаров накопления в верхних слоях атмосферы, где она перераспределяется между плазмой и электромагнитными полями, в том числе, в виде энергии регистрируемых частиц и излучения.

6. Ситуация на Солнце и в гелиосфере в октябре–ноябре 2003 г. была сложной и сильно возмущенной. Она характеризуется множественностью сравнимых по мощности событий и процессов, тесно расположенных в пространстве и во времени и не всегда допускающих их изолированное рассмотрение из-за нелинейных плазменных и электродинамических взаимодействий между ними.

7. Причиной сильных геомагнитных бурь в октябре–ноябре 2003 г. явились порожденные этой нестационарной ситуацией на Солнце корональные выбросы масс, принесшие с собой быстрые потоки плазмы с достаточно сильными и длительными магнитными полями подходящей южной ориентации в гелиосфере.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (коды проектов 02-02-16201, 02-02-17272, 03-02-16049, 03-02-16591, 04-02-16131, 04-02-16736) и Минпромнауки РФ (Госконтракт 40.0221.1.1105,

гранты НШ 477.2003.2, НШ 1455.2003.2, НШ 2046.2003.2), а также Программы “Нестационарные процессы в астрономии” РАН, Программы ОФН РАН № 16 “Солнечный ветер”, “Университеты России” (грант 1877-04), INTAS 03-51-6206. Авторы благодарны В.Н. Ораевскому за большой вклад в проект Коронас. Авторы также благодарны всем лицам и организациям, предоставившим данные спутниковых и наземных наблюдений в Интернет, сотрудникам всех станций космических лучей, данные которых были использованы в данной работе: Алма-Ата, Апатиты, Баренцбург, Ереван, Иркутск, Магадан, Москва, м. Шмидта, Новосибирск, Норильск, Тикси, Якутск, Athens, Calgary, Climax, Haleakala, Hermanus, Jungfraujoch, Kiel, Larc, Lomnický štít, McMurdo, Oulu, Potchefstroom, Rome, Sanae, Tsumeb, Kergelen, Terra Adelie. Авторы благодарны консорциумам *SOHO/EIT* и *SOHO/LASCO* за использованные данные. К. Кудела благодарит агентство APVT Словакии за поддержку в рамках проекта 0259.

Работа российских станций космических лучей частично поддержана грантами РФФИ 03-07-90389, 04-02-16763, станций США – грантом NSF ATM-0000315.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zastenker G.N., Temnyi V.V., d'Uston C., Bosqued J.M., The form and energy of the shock waves from the solar flares of August 2, 4, and 7 // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. № A3. P. 1035–1041.
2. Cliver E.W., Hudson H.S. CMEs: How do the puzzle pieces fit together? // *J. of Atmosph. and Solar-Terr. Phys.* 2002. V. 62. P. 1071.
3. Romashets E., Vandas M., Nagatsuma T. Evolution of geoeffective disturbances in interplanetary space // *Proc.*

- Space Weather Workshop: Looking Towards a European Space Weather Space Programme. 2003. ESTEC. The Netherlands. P. 59–62.
4. Preliminary Report and Forecast of SOLAR – GEOPHYSICAL DATA. Space Environment Services Center; Boulder. Colorado. USA; SESC PRF. 1991. 823. 824. P. 1.
 5. Bothmer V., Veselovsky I.S., Dmitriev A.V. et al. Solar and heliospheric reasons for geomagnetic perturbations during the growth phase of the solar cycle 23 // Solar System Research. 2002. V. 36. P. 498–505.
 6. Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. О некоторых статистических взаимосвязях солнечных, межпланетных и геомагнитосферных возмущений в период 1976–2000 годов. 3 // Космич. исслед. 2003 Т. 41. С. 539.
 7. Панасюк М.И. и др. Магнитные бури в октябре 2003 г. // Космич. исслед. 2004. Т. 42. Наст. выпуск.
 8. Veselovsky I.S. Heliospheric electrojets: their structure and magnetospheric impacts // Proc. 10th European Solar Physics Meeting. ESA SP-506. 2002. P. 37–40.
 9. Zhukov A.N., Veselovsky I.S., Clette F. et al. Solar wind disturbances and their sources in the EUV solar corona // Solar Wind Ten/Eds. M. Velli, R. Bruno, F. Malara, AIP CP 679. Melville. New York. 2003. P. 711–717.
 10. Нусинов А.А. Ионосфера как природный детектор для исследования долговременных изменений потоков солнечного геоэффективного излучения // Геомагнетизм и аэронавигация. 2004. Т. 34. № 5.
 11. Zhitnik I.A., Bougaenko O.I., Delaboudiniere J.-P. et al. SPIRIT X-ray telescope/spectroheliometer results // Proc. of the 10th European Solar Physics Meeting. ESA SP. 2002. V. 506. P. 915–918.
 12. Ораевский В.Н., Собельман И.И. Комплексные исследования активности Солнца на спутнике *Корона-Ф* // Письма в Астрон. журн. 2002. Т. 28. С. 457–467.
 13. Черток И.М., Гречнев В.В. Крупномасштабная активность в эруптивных событиях октября–ноября 2003 г. // Астрон. журн. 2004.
 14. Grechnev V.V., Kuzin S.V., Slemzin V.A., Chertok I.M. Solar eruptive events of October–November 2003 by data of the EUV complex SPIRIT aboard of the *CORONAS-F* satellite // Space Weather. 2004.
 15. Черток И.М., Гречнев В.В. Крупномасштабные канализированные димминги, вызываемые корональными выбросами массы на Солнце // Астрон. журн. 2003. Т. 80. С. 162–174.
 16. Черток И.М., Гречнев В.В. Крупномасштабные “димминги”, вызываемые корональными выбросами массы на Солнце, по данным *SOHO/EIT* в четырех линиях крайнего УФ-диапазона // Астрон. журн. 2003. Т. 80. С. 1013–1025.
 17. Богод В.М., Тохчукова С.Х. Особенности микроволнового излучения активных областей, генерирующих мощные солнечные вспышки // Письма в Астрон. журн. 2003. Т. 29. № 4. С. 305–316.
 18. Gorgutsa R.V., Gnezdilov A.A., Markeev A.A., Sobolev D.E. An upgrade of the IZMIRAN’s digital radio spectrograph: first results // Astron. and Astrophys. Transactions. 2001. V. 20. P. 547–549.
 19. Горгуца Р.В., Соболев Д.Е., Фомичев В.В., Черток И.М. Эруптивное событие с быстро дрейфующим радиовсплеском II типа // Активные процессы на Солнце и звездах. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2002. С. 28–32.
 20. Chertok I.M., Fomichev V.V., Gnezdilov A.A. et al. Solar radio emission in extreme events of October–November 2003 by IZMIRAN data. // Space Weather. 2004.
 21. Thomson N.R., Rodger C.J., Dowden R.L. Ionosphere gives size of greatest solar flare // Geophys. Res. Lett. 2004. V. 31.
 22. Kaufmann P., Raulin J.-P., Gimeñez de Castro C.G. et al. A new solar burst spectral component emitting only in the terahertz range. // The Astrophysical J. 2004. V. 603. L121–L124.
 23. Денисов Ю.И., Кузнецов С.Н., Логачев Ю.И. и др. Жесткое рентгеновское излучение солнечных вспышек во второй половине 2001 г.: Предварительные результаты эксперимента с прибором СПР-Н на станции “*Корона-Ф*” // Астрон. вестник. 2003. Т. 37. С. 127.
 24. Тиндо И.П., Иванов В.Д., Мандельштам С.Л. и др. Обнаружение поляризации рентгеновского излучения солнечных вспышек // Космич. исслед. 1971. Т. 9. С. 116.
 25. Coburn W., Boggs S.E. Polarization of the prompt gamma-ray emission from the gamma-ray burst of 6 December 2002 // Nature. 2003. V. 423. P. 415.
 26. Lopez R.E., Baker D.N., Allen J. Sun unleashes Halloween storm. // EOS. 2004. V. 85. № 11. P. 105–108.
 27. Митрофанов И.Г., Литвак М.Л., Козырев А.С. и др. Поиск воды в грунте Марса по данным глобального картографирования потоков нейтронов российским прибором ХЕНД на борту пекта НАСА 2001 Mars Odyssey // Астрон. вестн. 2003. Т. 37. № 5. С. 400–412.
 28. Shea M. A., Smart D. A summary of major solar proton events. // Solar Physics. 1990. V. 127. P. 297–320.
 29. Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. Космические лучи в магнитном поле Земли. М.: Наука, 1971. 400 с.
 30. Belov A.V., Eroshenko E.A., Oleneva V.A. et al. What determines the magnitude of Forbush decreases? // Adv. Space Res. 2001. V. 27. P. 625–630.
 31. Tsurutani B.T. et al. The extreme magnetic storm of 1–2 September 1859 // J. Geophys. Res. 2003. V. 108(A7).
 32. Дворников В.М., Сдобнов В.Е., Юдина М.В. Механизм модуляции космических лучей регулярными электромагнитными полями гелиосферы // Астрон. вестн. 2004а.
 33. Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Variations in the rigidity spectrum and anisotropy cosmic rays at the period of Forbush effect on the 12–25 July 1982 // International J. Geom. Aeron. 2002. V. 3. № 3. P. 217–228.
 34. Debrunner H., Flueckiger E., von Mandach H., Arens M. Determination of the ring current radii from cosmic ray neutron monitor data for the 17 December 1971 magnetic storm // Planetary and Space Science. 1979. V. 27. P. 577–581.
 35. Flueckiger E.O., Smart D.F., Shea M.A. On the effect of magnetospheric current systems on cosmic ray cutoff rigidities // Proc. 17th ICRC. Paris. 1981. V. 4. P. 244–247.
 36. Baisultanova L., Belov A., Yanke V. Magnetospheric effect of cosmic rays within the different phases of magnetic storms // Proc 24-th ICRC. 1995. V. 4. P. 1090–1094.
 37. Чарахчян А.Н. Исследование флуктуаций интенсивности космических лучей в стратосфере, вызываемых процессами на Солнце // УФН. 1964. Т. 83. Вып. 1. С. 35–62.

Solar and Heliospheric Phenomena in October–November 2003: Causes and Effects

I. S. Veselovsky¹, M. I. Panasyuk¹, S. I. Avdyushin², G. A. Bazilevskaya³, A. V. Belov⁴,
S. A. Bogachev³, V. M. Bogod⁵, A. V. Bogomolov¹, V. Bothmer⁶, K. A. Boyarchuk⁴,
E. V. Vashenyuk⁷, V. I. Vlasov⁸, A. A. Gnezdilov⁴, R. V. Gorgutsa⁴, V. V. Grechnev⁹,
Yu. I. Denisov¹, A. V. Dmitriev^{1, 10}, M. Dryer¹¹, Yu. I. Yermolaev¹², E. A. Eroshenko⁴,
G. A. Zherebtsov⁹, I. A. Zhitnik³, A. N. Zhukov^{1, 13}, G. N. Zastenker¹², L. M. Zelenyi¹²,
M. A. Zeldovich¹, G. S. Ivanov-Kholodnyi⁴, A. P. Ignat'ev³, V. N. Ishkov⁴, O. P. Kolomiitsev¹,
I. V. Krasheninnikov⁴, K. Kudela¹⁴, B. M. Kuzhevsky¹, S. V. Kuzin³, V. D. Kuznetsov⁴,
S. N. Kuznetsov¹, Viktoria G. Kurt¹, L. L. Lazutin¹, L. N. Leshchenko⁴, M. L. Litvak¹²,
Yu. I. Logachev¹, G. Lawrence¹³, A. K. Markeev⁴, V. S. Makhmutov³, A. V. Mitrofanov³,
I. G. Mitrofanov¹², O. V. Morozov¹, I. N. Myagkova¹, A. A. Nusinov², S. N. Oparin³,
O. A. Panasenco¹, A. A. Pertsov³, A. A. Petrukovich¹², A. N. Podorol'sky¹, E. P. Romashets⁴,
S. I. Svertilov¹, P. M. Svidsky², A. K. Svirzhetskaya³, N. S. Svirzhetsky³, V. A. Slemzin³, Z. Smith¹¹,
I. I. Sobel'man³, D. E. Sobolev⁴, Yu. I. Stozhkov³, A. V. Suvorova¹, N. K. Sukhodrev³, I. P. Tindo³,
S. Kh. Tokhchukova¹⁵, V. V. Fomichev⁴, I. V. Chashey⁹, I. M. Chertok⁴, V. I. Shishov⁹,
B. Yu. Yushkov¹, O. S. Yakovchouk¹, and V. G. Yanke⁴

¹ Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

² Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow

³ Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

⁴ Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Troitsk, Russia

⁵ Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhny Arkhyz, Russia

⁶ Max-Planck Institut für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau, Germany

⁷ Polar Geophysical Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

⁸ Pushchino Observatory, Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia

⁹ Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

¹⁰ Institute of Space Science, Jungli, Taiwan

¹¹ Space Environment Center, Boulder, USA

¹² Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹³ Observatoire Royal de Belgique, Bruxelles, Belgium

¹⁴ Institute of Experimental Physics of the Slovak Academy of Sciences, Köse, Slovakia

¹⁵ Main (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, Pulkovo, Russia

Abstract—We present new observational data on the phenomena of extremely high activity on the Sun and in the heliosphere that took place in October–November 2003. A large variety of solar and heliospheric parameters give evidence that the interval under consideration is unique over the entire observation time. Based on these data, comparing them with similar situations in the past and using available theoretical concepts, we discuss possible cause-and-effect connections between the processes observed. The paper includes the first results and conclusions derived by the collaboration “Solar Extreme Events-2003” organized in Russia for detailed investigations of these events. As a result of our consideration it is beyond question that physical causes of solar and heliospheric phenomena in October–November 2003 are not exclusively local and belonging only to the active regions and solar atmosphere above them. Energy reservoirs and driving forces of these processes are of more global character, and in the main they are hidden from an observer, since eventually their sources lie in the subphotospheric layers of the Sun, where sufficiently fast and difficult-to-predict changes can sometimes take place (and they take place indeed). Solar flares can serve as sufficiently good tracers of these sudden changes and reconnections on the Sun, although one can find still other diagnostic indicators among the parameters of magnetic fields, motions of matter, and emission characteristics.